



معادله تجربی برای عمق نفوذ بر حسب زمان و فشار در افشانه تزریق درگاهی موتور بنزینی با استفاده از عکسبرداری تند از فواره سوخت

مهدی نظری چکووری^۱، علیرضا حاجی علی محمدی^{۲*}، سید مصطفی میرسلیم^۳، حمیدرضا فجرری^۴

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، mahdinazari2701@gmail.com

^۲ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ahajiali@semnan.ac.ir

^۳ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، mirsalim1@yahoo.com

^۴ کارشناس اداره کل سوخت و توسعه احتراق، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، h_fajri@ipco.com

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۵ فروردین ۱۳۹۹

پذیرش: ۲۸ مرداد ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

افشانه تزریق درگاهی

عکسبرداری شیلرین

پردازش تصاویر

عمق نفوذ

چالش‌هایی که اخیراً برای آلاینده‌های موتورهای دیزل خصوصاً آلاینده ذرات معلق مطرح شده، موجب شده، تولید این موتورها روند کاهشی در پیش گیرد. این امر موجب شتابگیری توسعه فناوری‌های جدید برای موتورهای بنزینی تزریق درگاهی و مستقیم شده است. یکی از مهمترین متغیرهای مؤثر بر بازده احتراق، توان و آلاینده‌های خروجی موتور مشخصات فواره سوخت خروجی از افشانه است. در این تحقیق تأثیر فشار پاشش بر عمق نفوذ فواره خروجی از موتور دوسوخته تزریق درگاهی EFV بررسی شد و معادله تجربی برای عمق نفوذ فواره این موتور پیشنهاد گردید. همچنین تأثیر فشار پاشش بر زوایای مخروطی و جدایش فواره، برای دو نوع افشانه تنفس طبیعی و پرخوران مطالعه شد. روش عکسبرداری شیلرین تند برای به دست آوردن مشخصات هندسی فواره استفاده شد. تصاویر حاصل از عکسبرداری، در نرم‌افزار متلب پردازش شده تا عمق نفوذ، زاویه مخروط و زاویه جدایش فواره به عنوان مشخصه هندسی محاسبه شود. به منظور به دست آوردن حد آستانه مناسب لبه‌یابی از روش اوتسو بهره گرفته شد. بررسی تغییرات عمق نفوذ با فشار تزریق برای دو نوع افشانه، معادله‌ای بر حسب زمان و فشار تزریق برای فواره‌های خروجی از افشانه موتور پرخوران و تنفس طبیعی نتیجه داد. این معادله بر حسب زمان و جذر فشار، خطی بود و برای پیش بینی عمق نفوذ فواره‌های تزریق راهگامی خطای بیشینه ۸٫۴٪ را دارد. نتایج همچنین نشان داد نفوذ دو فواره در فشارها و زمان‌های تزریق یکسان دارای اختلاف کمی هستند و زاویه مخروط و زاویه جدایش فواره‌ها با افزایش فشار تزریق افزایش می‌یابد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

موتور تزریق درگاهی^۱ یکی از مفاهیم موتوری است که سال‌هاست بیشترین تولید موتور احتراقی به آن اختصاص دارد. در این گونه از موتورها، افشانه^۲ سوخت را در مرحله مکش در درگاه هوا تزریق می‌نماید. به طور معمول این افشانه‌ها دارای فشار کاری تزریق سوخت ۳،۵ و ۴ بار بوده اما قابلیت کارکرد در فشارهای دیگر (۲ تا ۶ بار) را دارند. باید توجه داشت که افشانه نقش بسیار مهمی در توان، عملکرد و آلایندگی موتور دارد. افشانه وظیفه گردافشانی^۳ سوخت را بر عهده دارد تا قطرات سوخت با هوا مخلوط شده و مخلوطی همگن از سوخت و هوا وارد محفظه احتراق گردد. کاهش قطر قطرات، بازدهی احتراق را افزایش داده و کاهش آلودگی موتور منجر می‌شود [۱].

از سویی فواره‌های خروجی از افشانه‌ها دارای مشخصات متفاوتی هستند. به طور کلی مشخصات فواره افشانه‌ها به دو دسته خواص خرد^۴ و کلان^۵ تقسیم بندی می‌شوند. برای اندازه‌گیری این خواص روش‌های متفاوتی وجود دارد که هرکدام از روش‌های موجود قابلیت اندازه‌گیری برخی از خواص را دارند و با پیشرفت فناوری‌های این روش‌ها توسعه می‌یابند. برخی از این روش‌ها برای بررسی خواص فواره‌ها بر پایه اندازه‌گیری نوری^۶ و لیزری هستند که از این رو عبارتند از: سایه‌نگاری^۷، عکسبرداری شیلرین^۸، سرعت‌سنجی به کمک ذرات نشانگر^۹، بازتابش فلورسنت لیزر^{۱۰} و روش‌های دیگر. هر یک از روش‌ها ذکر شده دارای مزیت‌ها و معایبی هستند، به عنوان مثال روش سایه‌نگاری ساده‌ترین روش برای بررسی برخی خواص کلان فواره در حالت دوبعدی است. اساس کار این روش تغییر مکان بوده و دارای حساسیت نسبت به مشتق دوم چگالی سیال عبوری است [۲].

روش شیلرین مشابه سایه‌نگاری بوده که فقط در آن از یک لبه چاقویی^{۱۱} به منظور حذف ناهنجاری^{۱۲}ها و افزایش کیفیت تصاویر استفاده می‌شود. در روش شیلرین اساس کار بر مبنای تغییر زاویه انحراف نور بر اثر تغییر ضریب شکست به دلیل تغییرات چگالی است و حساسیت این روش نسبت به تغییرات مشتق اول چگالی سیال است. مزیت روش شیلرین این است که عملکردش بسیار ساده بوده و

تحلیل با این روش بسیار راحت خواهد بود، ولی نسبت به روش‌های لیزری از دقت بسیار کمی برخوردار بوده و قابلیت ارائه مشخصات خود فواره از قبیل اندازه ریز قطرات، سرعت و نسبت جرمی را ندارد. کاهش مرتبه مشتق چگالی به معنای تحلیل دشوارتر فواره خروجی خواهد بود [۳ و ۴].

روش‌های ذرات نشانگر و بازتابش فلورسنت لیزر در موارد بررسی خواص خرد و کلان فواره، سیالات و احتراق کاربرد داشته و حتی قابلیت اندازه‌گیری قطر قطرات فواره^{۱۳} را دارند و این در حالی که در روش شیلرین فقط امکان به‌دست آوردن مشخصات کلان فواره وجود دارد [۵].

در سال ۱۹۷۱ دنت [۶] با استفاده از آزمایش افشانه تک سوراخه دیزل در شرایط مختلف، معادله‌ای برای عمق نفوذ فواره خروجی ارائه نمود. در این معادله، نفوذ با توان یک چهارم اختلاف بین فشار تزریق و محیط نسبت مستقیم و با توان یک چهارم دمای محیط و چگالی گاز محیط نسبت عکس داشت. همچنین در این روش، نفوذ با جذر زمان و قطر اوریفیس نسبت مستقیم داشت. معادله ۱ توسط دنت برای نفوذ ارائه شد:

$$S = 3.07 \left(\frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{0.25} (d_o t)^{0.5} \left(\frac{294}{T_g} \right)^{0.25} \quad (1)$$

که S نفوذ، ΔP اختلاف بین فشار تزریق و فشار محیط، ρ_g چگالی گاز، T_g دمای گاز، d_o قطر روزنه و t زمان تزریق است.

در سال ۱۹۹۰ هیرویاسو و آرای [۷] برای نفوذ فواره دیزل، معادله‌ای بر حسب فراسنج‌های مختلف ارائه نمودند. آن‌ها دریافتند که در زمان‌های کم‌تر از زمان شکست، نفوذ با زمان معادله خطی دارد و در زمان‌های پس از آن به صورت جذر زمان و معادله‌ای متشابه با مرجع [۶] خواهد بود. معادله ۲ نفوذ در زمان‌های قبل از شکست و معادله ۳ نفوذ در زمان‌های پس از شکست را در نظر می‌گیرند و از معادله ۴ زمان شکست به‌دست خواهد آمد.

$$S = 0.39 \left(\frac{2\Delta P}{\rho_l} \right)^{0.5} t, 0 < t < t_b \quad (2)$$

$$S = 2.95 \left(\frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{0.25} (d_o t)^{0.5}, t > t_b \quad (3)$$

$$t_b = 28.65 \frac{\rho_l d_o}{(\rho_g \Delta P)^{0.5}} \quad (4)$$

که S نفوذ، ΔP اختلاف بین فشار تزریق و فشار محیط، ρ_g چگالی گاز، ρ_l چگالی مایع، d_o قطر روزنه، t زمان تزریق و t_b زمان شکست است.

1 Port Fuel Injection

2 Injector

3 Atomize

4 Microscopic

5 Macroscopic

6 Optical Measurement

7 Shadowgraphy

8 Schlieren Imaging

9 PIV (Particle Image Velocimetry)

10 LIF (Laser Induced Fluorescence)

11 Knife Edge

12 Noise

قطرات بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش فشار سوخت عمق نفوذ افزایش خواهد یافت. همچنین در فشار ۶ بار عمق نفوذ اتانول و بنزین با هم برابر و در فشار ۲٫۵ بار اتانول کمی با اختلاف دارای عمق نفوذ بیشتری است. همچنین یافتند که زاویه مخروط فواره با تغییر بنزین به اتانول و همچنین با قوی کردن فشار، افزایش خواهد یافت.

در سال ۲۰۱۵ سارانج جین و همکاران [۱۳] افشانه موتور تزریق درگاهی را در فشارهای ضعیف مطالعه نمودند. آن‌ها تغییرات شار پویا با فشار را بررسی و در فشارهای ۱ تا ۳ بار رفتار خطی برای شار را یافتند. همچنین اثر گرد کردن فراصوت را با استفاده از روش شیلین بررسی نموده و این روش را برای فشارهای ضعیف، راه اندازی سرد^۶ و جریان‌های با سرعت کند پیشنهاد کردند.

لی و همکاران [۱۴] فواره افشانه تزریق مستقیم^۷ را با سوخت‌های ان‌هپتان، ایزواکتان، بنزین و ان‌دکان را در دماهای مختلف سوخت و محیط به روش‌های عکسبرداری تند شیلین و مای بررسی نمودند. نتایج روش‌های یادشده برای عمق نفوذ با هم منطبق بودند. با افزایش دمای سوخت، مقدار عمق نفوذ در یک زمان مشخص برای تمامی سوخت‌ها کاهش خواهد یافت. در دمای اتاق، عمق نفوذ سوخت‌ها برابر و در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد و در زمان یکسان پس از تزریق مقدار عمق نفوذ ان‌هپتان به شدت کاهش یافت.

در مورد زاویه فواره، دو روش با یکدیگر اختلاف داشته و با افزایش دمای سوخت و همچنین دمای محیط، زاویه فواره افزایش یافت. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند، عمق نفوذ با افزایش دمای محیط برای ان‌هپتان افزایش و برای دیگر سوخت‌ها کاهش می‌یابد.

یانگ لی و همکاران [۱۵] اثر استفاده تزریق دو راهگاهی^۸ هوا برای یک استوانه^۹ را بررسی و نتیجه گرفتند که سبب بهبود توان شده و به کاهش آلاینده‌گی می‌انجامد. آن‌ها همچنین اثر زاویه قرارگیری افشانه را به روش عکسبرداری مستقیم بررسی نموده و دریافتند که زوایای فواره گسترده‌تر به کاهش مصرف سوخت ویژه^{۱۰} انجامیده در حالی که، آلاینده‌گی هیدروکربن‌های^{۱۱} نسخته در شروع سرد افزایش می‌یابد.

نظری و همکاران [۱۶] معادله‌ای تجربی برای شار پویا و ایستایی افشانه تزریق درگاهی ارائه نموده و تأثیر زاویه قرارگیری افشانه روی عمق نفوذ را بررسی کردند. نتایج بررسی این مقاله نشان داد که معادله بین شار پویا و زمان پاشش معادله‌ای خطی است و زاویه قرارگیری افشانه، تأثیر چندانی روی عمق نفوذ ندارد.

زو و همکاران [۸] با استفاده از شبیه‌سازی، برخورد فواره سوخت به دیواره را در شرایط مختلف بررسی و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. آن‌ها دریافتند که با افزایش دمای دیواره، ضخامت غشای سوخت روی دیواره کاهش و نرخ تبخیر افزایش می‌یابد. آن‌ها اثر استفاده از دو سوخت ایزو اکتان و بنزین را بررسی و دریافتند که نرخ تبخیر بنزین از دیواره بیشتر خواهد بود. آن‌ها یافتند که با افزایش سرعت برخورد سوخت به صفحه تحت، در زمان معین ضخامت غشا کاهش می‌یابد. آن‌ها اثر زاویه قرارگیری افشانه را بررسی و دریافتند که، در صورت افزایش زاویه افشانه از ۴۵ درجه به ۹۰ و در صورتی که فواره به صورت عمودی با دیواره برخورد کند، ضخامت غشای تشکیلی بر روی دیواره در پایین دست کاهش و در نزدیکی محل برخورد افزایش خواهد داشت و نرخ تبخیر کاهش و پاشش از سطح افزایش خواهد یافت.

نصیری و همکاران [۹] با استفاده از شبیه‌سازی عددی موتور تزریق درگاهی، اثر سرعت تزریق سوخت و زاویه قرارگیری افشانه را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش سرعت تزریق، اندازه حرکت^۱ و در نتیجه نرخ تبخیر سوخت افزایش خواهد یافت. همچنین دریافتند که با تغییر زاویه افشانه، نرخ تبخیر تغییر خواهد نمود. یکی دیگر از نتایج این بود که کاهش غشاء سوخت بر روی دیواره، به تبخیر سوخت بیشتر می‌انجامد.

بانجی و همکاران [۱۰] از روش پی‌دی‌ای به منظور به‌دست آوردن مشخصات افشانه استفاده نمودند و توزیع و سرعت قطرات و طول نفوذ را به‌دست آوردند. آن‌ها دریافتند که طول نفوذ به صورت خطی با زمان تزریق تغییر خواهد نمود.

آناند و همکاران [۱۱] افشانه‌های دو و چهارسوراخه با قطر سوراخ‌های مختلف را به دو روش مای و ال‌اس دی^۲ در فشار ۲٫۴ بار بررسی کردند و مشخصات خروجی فواره را به‌دست آوردند. قطر میانگین قطرات خروجی در افشانه با سوراخ کوچک‌تر، کم‌تر از افشانه دیگر بود. آن‌ها همچنین، قطر میانگین بر حسب زمان و مکان را به‌دست آوردند و در فواصل بزرگ‌تر از نوک افشانه، قطر میانگین قطرات کوچک‌تر از فواصل نزدیک نوک افشانه بود و بر حسب زمان تزریق، این قطرها کاهش یافته تا به مقداری ثابت نزدیک می‌شود. آن‌ها توزیع قطرات، مقادیر زاویه مخروط^۳ و الگوی شکل ظاهری فواره را به‌دست آوردند و دریافتند که در این افشانه‌ها عمق نفوذ بر حسب زمان بصورت خطی تغییر خواهند نمود.

آناند و همکاران [۱۲] با استفاده از روش‌های عکسبرداری لیزری^۴ و تحلیل عکس قطرات و ذرات^۵، اثر فشار را بر عمق نفوذ و اندازه قطر

⁶ Cold Start

⁷ Gasoline Direct Injection (GDI)

⁸ Dual Port Fuel Injection

⁹ Cylinder

¹⁰ Brake-Specific Fuel Consumption (BSFC)

¹¹ Hydrocarbons Emission

¹ Momentum

² LSD

³ Cone Angel

⁴ Laser Backlight Imaging

⁵ Particle\ Droplet Image Analysis

بر روی حسگر دوربین نقش بسته و توسط دوربین ثبت خواهند شد. هر کدام از پرتوهای برخوردی با فواره به دلیل شکست، از مسیر منحرف می‌شوند. در آزمون‌های صورت گرفته موقعیت قرارگیری افشانه، عمودی و رو به پایین بود.

آزمون‌ها مطابق با استانداردهای SAE J1832 [۲۰] و SAE J2715 [۲۱] انجام پذیرفت. در این دو استاندارد توضیح داده شده است که افشانه‌های تزریق درگاهی برای پاشش سوخت بنزین در موتور طراحی شده‌اند اما سوخت بنزین خود از اجزای مختلفی تشکیل شده است که با تبخیر و یا تغییر درصد این اجزاء، خصوصیات سوخت تغییر خواهد نمود و نتایج مختلفی در آزمون‌های دبی و فواره در برخواهد داشت؛ بنابراین باید از یک مایع خالص با خواص فیزیکی نسبتاً ثابت که دارای خواص فیزیکی کاملاً مشخص و نزدیک به بنزین استفاده شود؛ مطمئناً تشخیص داده شده است که هیچ یک از مایعات آزمایشی در برابر عملکرد افشانه با سوخت هیدروکبی آرمانی^۲ نیستند؛ اما بر اساس در دسترس بودن در سراسر جهان و پایداری خواص فیزیکی در صورت استفاده مجدد، سوخت ان‌هپتان به عنوان بهترین انتخاب برگزیده شده است؛ از سویی متغیرهای فواره حاصل از ان‌هپتان بسیار نزدیک به فواره بنزین بوده و از تکرارپذیری بسیار مناسبی در شکل هندسی فواره، نفوذ و سرعت نفوذ برخوردار است [۲۰ و ۲۱].

از سویی بسیاری از محققین در کارهای گذشته از سوخت ایزواکتان استفاده کرده‌اند اما تهیه‌کنندگان این پژوهش با توجه به استانداردهای ذکر شده و مشخصاتی که از جانب سازندگان افشانه بر حسب ان‌هپتان در اختیار داشته‌اند و موارد ایمنی، تصمیم به استفاده از سوخت ان‌هپتان گرفتند. نکته‌ای که باید ذکر شود این است که در انتخاب سوخت تنها خواص فیزیکی مدنظر قرار گرفته است و از مدنظر قرار دادن مشخصات شیمیایی سوخت صرف نظر شده است. همچنین در جدول ۱ برخی از مشخصات فیزیکی ان‌هپتان با مشخصات فیزیکی بنزینی که توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا^۳ ارائه نموده است، ارائه شده است. این بنزین در استانداردها تحت عنوان CFR 40.113 ذکر شده است.

هو و همکاران [۱۷] ویژگی‌های فواره با دو نوع سوخت، نفت سفید و بنزین، همراه با سامانه تزریق سوخت هوا تحت فراسنج‌های مختلف با استفاده از روش تصویربرداری^۱ تند را بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که فشار شدید محیط یا فشار کم سوخت، باعث کاهش زاویه فواره نفت سفید می‌شود در حالی که زاویه فواره بنزین اساساً ثابت است.

پارک و همکاران [۱۸]، فواره آب و ان‌هپتان در افشانه تزریق درگاهی را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که تغییرات عمق نفوذ بر حسب زمان خطی بوده و فواره با سوخت ان‌هپتان بلندتر از فواره با سوخت آب است.

با توجه مرور ادبیات انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت کارهای مختلفی در مورد بررسی فواره افشانه تزریق درگاهی انجام شده است ولی در هیچ کدام تاکنون معادله‌ای تجربی برای این منظور ارائه نشده است. روابطی که تاکنون ارائه شده است بیشتر برای فواره دیزل هستند. نوآوری این مقاله یافتن معادله‌ای برای عمق نفوذ این نوع افشانه‌ها با استفاده از نتایج تجربی‌ای که از آزمون‌های عکسبرداری^۱ تند به دست آمده اند، است. این معادله برای طراحی مفهومی موتور و صحت‌گذاری شبیه‌سازی‌های عددی، می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

۲- آزمون‌های تجربی

۲-۱- طراحی آزمون

در این تحقیق، برای مطالعه تجربی فواره خروجی افشانه موتور تزریق درگاهی نیاز به آشکارسازی و تحلیل جریان خروجی از افشانه بود. بدین منظور، از روش شیلرین استفاده شد که امکان استخراج خصوصیات فواره در حالت کلان از جمله عمق نفوذ، سرعت نفوذ و زوایای فواره را فراهم می‌کند.

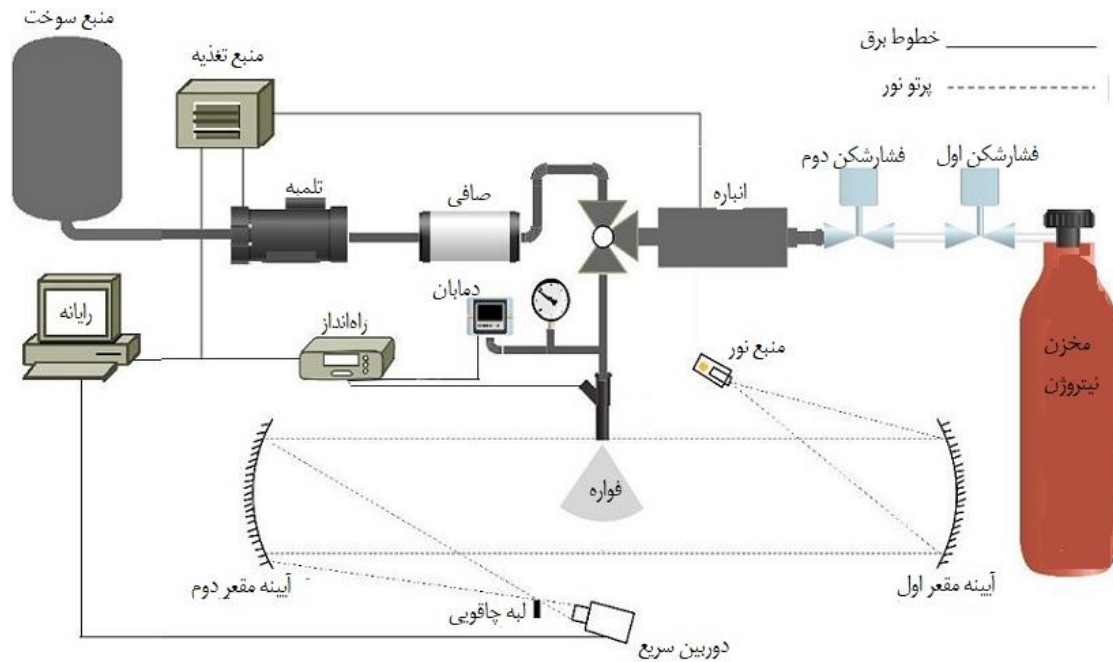
عملکرد روش شیلرین بر مبنای تغییر ضریب شکست پرتوهای موازی نور عبوری از منطقه آزمون بر اثر تغییر چگالی سیال نسبت به حالت پایدار در آن منطقه است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده از چیدمان Z شکل شیلرین برای انجام آزمون‌های عکسبرداری فواره استفاده شد. به منظور دستیابی به فشار تزریق ثابت با کمترین تغییرات فشار در هنگام تزریق، سامانه تزریق سوخت انباره‌ای^۱ بکار رفت که معمولاً برای تزریق پرفشار بنزین در سامانه‌های تزریق مستقیم سوخت استفاده می‌شود [۱۹].

پرتوهای نورانی از منبع نوری که در محل کانون آیینة مقعر اول قرار دارد، به صورت واگرا خارج شده و به آیینة اول برخورد و به صورت موازی در خواهند آمد. پرتوهای موازی از محل تصویربرداری عبور نموده و با برخورد به آیینة مقعر دوم در محل کانون آن جمع و به وسیله لبه چاقویی پرتوهای اضافی حذف شده و پس از عبور از عدسی

² Ideal

³ United States Environmental Protection Agency (EPA)

¹ Accumulator type fuel injection system



شکل ۱: تصویر نمادین چیدمان z شکل آزمون شیلرین

۲-۲- تجهیزات آزمون

در آزمون‌ها، از دو آینه سهمی‌وار^۱ مقعر با فاصله کانونی ۲۵۷۰ و ۲۶۱۰ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد. یک لامپ هالوژن که بر روی آن یک محفظه آلومینیومی دارای یک سوراخ کوچک به منظور خروج پرتوهای واگرا تعبیه گردیده، به عنوان منبع نورانی استفاده شد. برای تصویربرداری از دوربین تند Cube 3 با حسگر CMOS، ساخت شرکت Motion Blitz آلمان استفاده شد. تصاویر در این دوربین به صورت خاکستری، سیاه و سفید نقش می‌گیرند. این دوربین دارای بیشینه قدرت تفکیک^۲ 512×512 نقطه^۳ در سرعت ۲۵۰۰ عکس بر ثانیه^۴ است. بیشینه سرعت عکسبرداری ۱۲۸۰۰۰ عکس بر ثانیه است. باید این نکته را در مورد سرعت عکسبرداری متذکر شد که با افزایش آن قدرت تفکیک کاهش خواهد یافت. آزمون‌ها با سرعت ۵۳۳۹ عکس بر ثانیه و قدرت تفکیک 232×234 انجام شد. عکس‌ها با پسوند bitmap و با حافظه پویا^۵ ۸ بیتی ذخیره سازی شد.

تحریک افشانه توسط یک راه انداز افشانه با قابلیت تغییر در زمان‌بندی تحریک انجام گرفت. راه‌انداز افشانه همانند واحد پایش برقی^۶ خودرو بود.

سامانه تغذیه افشانه، شامل یک انباره سوخت سنبه‌ای^۷ است. این انباره دارای یک استوانه بوده که در داخلش یک سنبه قرار دارد که

در یک سمت آن سوخت و در سمت دیگر گاز نیتروژن وجود دارد که فشار گاز توسط دستگاه تنظیم‌کننده^۸، تنظیم می‌شود. پس از پرمودن انباره با سوخت، فشار سوخت به وسیله سنبه و گاز نیتروژن تأمین شده و سوخت به ورودی افشانه خواهد رسید. فشار سوخت در قبل از افشانه توسط یک فشارسنج با قابلیت اندازه‌گیری ۰ تا ۱۵ بار با دقت ۰٫۲ بار اندازه‌گیری شد. افشانه‌های مورد بررسی در آزمون‌ها، افشانه‌های ساخت شرکت بوش برای موتور EFV تنفس طبیعی و پرخوران بود. هر دو نوع افشانه، دارای چهار سوراخ بوده و قطر سوراخ‌ها در افشانه تنفس طبیعی ۲۶۶ میکرومتر و در افشانه پرخوران ۳۱۶ میکرومتر است. تصاویر افشانه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که قبلاً هم گفته شد و در شکل مشخص است تفاوت دو افشانه در قطر سوراخ خروجی سوراخ‌ها است و در واقع برای بررسی اثر قطر سوراخ روی عمق نفوذ از این دو افشانه استفاده شد.

¹ parabolic

² Resolution

³ Pixel

⁴ Frames Per Second

⁵ Dynamic Range

⁶ ECU (Engine Control Unit)

⁷ Piston

⁸ Regulator

جدول ۱: برخی از مشخصات فیزیکی سوخت‌های ان‌هپتان، ایزواکتان و بنزین [۲۰-۲۲]

نوع سوخت	چگالی ویژه (20°C)	لزجت (20°C) cP	تنش سطحی (20°C) N.m	دمای خود اشتعالی ($^{\circ}\text{C}$)	فشار بخار (20°C) kPa
ان‌هپتان	۰,۶۸	۰,۴۳۸	۰,۰۱۹۶۶	۲۲۰	۴,۶
ایزواکتان	۰,۶۹	۰,۴۷۳	۰,۰۱۸۱۶	۴۱۷	۵,۱
بنزین 40CFR86.113	۰,۷۵	۰,۴۶۸	-	-	-

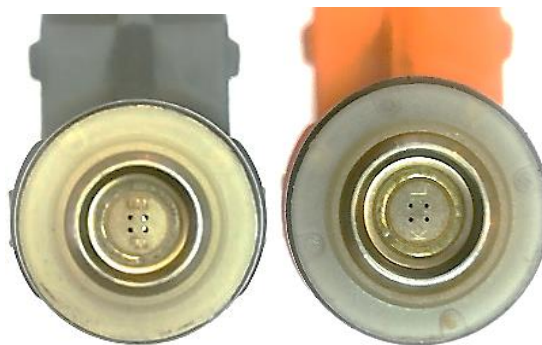
یک نقطه خواهد بود. هر عضو این جدول به صورت صفر (سیاه) و یک (سفید) خواهد بود که در این حالت به راحت شدن کار با تصاویر می‌انجامد.

به منظور به‌دست آوردن فاصله نقاط، از یک قطعه با اندازه استاندارد با ابعاد 40×40 میلی‌متر عکسبرداری شده و تعداد نقاط قطعه در راستاهای افقی و عمودی توسط برنامه دودویی شمرده و به‌دست خواهد آمد [۲۳]. از برابر قرار دادن تعداد نقاط با ابعاد قطعه می‌توان ضریب مقیاس را به‌دست آورد. ضریب مقیاس از این منظر دارای اهمیت است که باید مشخصات خروجی افشانه از جمله عمق نفوذ بر حسب فاصله میلی‌متر بیان شود. این ضریب دارای مقدار $0,5555$ میلی‌متر بر نقطه شد.

تعداد تصاویر ذخیره شده در حافظه رایانه به ازای هر تکرار آزمون 100 عدد است، که تعدادی از آن‌ها قبل از تحریک افشانه بوده و همچنین در تعدادی نوک فواره به انتهای محدوده عکسبرداری رسیده، در نتیجه قابلیت تحلیل ندارند و بنابراین تنها یک عکس قبل از شروع تحریک افشانه و 17 تا 30 عکس (با توجه به فشار پاشش متفاوت خواهد بود) پس از آن به منظور تحلیل بهره برده می‌شود.

برای تحلیل تصاویر از روش لبه‌یابی کنی^۲ [۲۴] توسط نرم‌افزار متلب^۳ استفاده شد. در این روش مشتق گاوسی به تصاویر اعمال شده و با توجه به حد آستانه^۴ تعریف شده در صورتی که مشتق مورد نظر از مقدار حد آستانه بیشتر باشد، مقدار آن نقطه را یک (رنگ سفید) و آن نقطه را تحت عنوان لبه تشخیص داده و در صورتی که مشتق کم‌تر از حد آستانه باشد، مقدار آن نقطه را صفر (رنگ سیاه) قرار خواهد داد و در این حالت تصاویر خاکستری به دودویی تبدیل می‌شود. قبل از اعمال لبه‌یابی تصاویر فواره، تصویر قبل از تحریک افشانه از آن‌ها تفریق شد. با اعمال تفریق اثر ذرات گرد و غبار روی آینه‌ها و دوربین، ناهنجاری‌های موجود در تصاویر و همچنین اثر اجزای ثابت آزمون از تصاویر حذف و تصویر فواره به‌تنهایی برجای ماند.

در روش کنی تابع گاوس دوبعدی به صورت معادله^۵ تعریف می‌شود [۲۴ و ۲۵]:



شکل ۲: تصاویر چیدمان سوراخ‌های افشانه تنفس طبیعی (سمت چپ) و افشانه پرخوران (سمت راست)

آزمون‌ها با فرض اینکه دمای سوخت و افشانه برابر محیط است انجام پذیرفت که با توجه به فواصل زمانی بین آزمون این فرض درستی است. آزمون‌ها در شرایط محیط با دما 22 ± 1 درجه سانتیگراد و در فشار هوا $0,88$ بار و در خارج از هرگونه محفظه انجام شد. ولتاژ تحریک افشانه‌ها برابر با 12 ولت بود. تمامی آزمون‌های این تحقیق در آزمایشگاه نور مرکز تحقیق، توسعه و تولید موتور ایران خودرو انجام پذیرفت.

۲-۳- تحلیل تصاویر

تصاویر حاصل از عکسبرداری در ابتدا دارای 240×232 نقطه و پس از برش خوردن توسط نرم‌افزار به 180×80 نقطه تغییر یافت. این تصاویر در ابتدا به صورت خاکستری هستند و هر یک از نقاط تصاویر به صورت یک بایت تعریف می‌شود. هر بایت دارای 8 سلول بوده که هر کدام از این سلول‌ها می‌تواند دارای مقدار صفر یا یک باشد، بنابراین هر بایت دارای 256 حالت ممکن بوده و مقدار متناظر هر بایت می‌تواند 0 تا 255 باشد، به این صورت که صفر به نشانگر رنگ سیاه و 255 نشانگر رنگ سفید خواهد بود. هر عددی بین این دو مقدار به منزله خاکستری بوده و با توجه به مقدارش، شدت سیاه بودن تغییر خواهد نمود. به منظور تحلیل راحت‌تر این تصاویر خاکستری باید به تصاویر دودویی^۱ تبدیل شود. در حالت دودویی یک جدول تشکیل شده، که تعداد سطر و ستون آن برابر با تعداد نقاط عمودی و افقی هر عکس است و همچنین هر عضوی از آن بیانگر

² Canny

³ Matlab

⁴ Threshold

¹ Binary

با استفاده از تکرار می‌توان از این خطا کاست. این تعداد تکرار با توجه به مرجع [۱۹] انتخاب شده است.

در کار حاضر تنها به بررسی بخش مایع فواره پرداخت شد و تمامی نتایج برای فواره مایع بوده و از بررسی بخش تبخیر شده فواره اجتناب شده است (به دلیل محدودیت‌های روش آزمایشگاهی) و همچنین بیشترین فاصله نوک فواره مایع سوخت تا نوک افشانه در هر لحظه به عنوان عمق نفوذ مدنظر قرار گرفت. البته باید ذکر نمود که در دما و فشار هوای محیط آزمایشگاهی این آزمون‌ها مقدار تبخیر بسیار ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردند است.

۳- نتایج

آزمون‌های عکسبرداری از فواره در شرایطی غیرموتوری انجام پذیرفت و اثرات آشفتگی جریان هوا بر روی فواره بررسی نشد. در نتیجه عمق نفوذ واقعی فواره‌ها در شرایط کاری موتوری متفاوت خواهد بود. اما با این حال نتایج حاصل از این بخش برای طراحی موتور و بررسی نحوه عملکرد افشانه‌ها بسیار مهم خواهد بود و این روش توصیه شده در استانداردهای مراجع [۲۰ و ۲۱] است. همچنین باید متذکر شد که برای بررسی کامل فواره باید محدوده عکسبرداری بزرگ‌تر از محدوده در این تحقیق باشد تا مقدار فاصله‌ای که در آن نوک فواره به طور کامل تبخیر خواهد شد، به دست آید. اما به دلیل محدود بودن ناحیه عکسبرداری تجهیزات آزمون ممکن نخواهد بود. فواره‌ها در آزمون عکسبرداری با فشارهای سوخت ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ بار تزریق شد. آزمون‌ها در هر یک از فشارهای تزریق، ده مرتبه تکرار شد. تزریق سوخت در هر یک از تکرارهای آزمون‌ها به مدت ۷ میلی ثانیه انجام پذیرفت.

در شکل ۳ تصاویر فواره پرخوران همراه پس‌زمینه و فواره پرخوران پس از حذف پس‌زمینه در زمان‌های مختلف و در فشارهای تزریق ۲، ۴ و ۶ بار نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ و مقایسه تصاویر فشارهای مختلف می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش فشار تزریق در زمان‌های یکسان پس از شروع تزریق، پیشروی فواره افزایش خواهد یافت. تغییرات عمق نفوذ فواره برحسب زمان در فشارهای تزریق مختلف برای دو افشانه تنفس طبیعی و پرخوران بترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده اند. از مقایسه نمودارها می‌توان نتیجه گرفت با افزایش فشار سوخت، عمق نفوذ افزایش خواهد یافت و نفوذ دو فواره به طور تقریبی با هم برابر است. در حالت کلی باید گفت که این دو افشانه دارای شرایط کارکرد موتوری یکسانی نیستند و شاید مقایسه فواره‌های حاصل، کار درستی نباشد ولی دلیل مقایسه این دو افشانه بر این مبنا استوار بوده که ساختار داخلی این دو افشانه کاملاً مشابه بوده و تنها قطر روزنه خروجی دو افشانه با یکدیگر

$$G = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

که در آن G تابع گاوس، x و y مختصات و σ عدد ثابت تعیین کننده شکل تابع گاوس هستند. نقاط بیشینه محلی که با توجه به حد آستانه‌ای که تعریف شده است به عنوان لبه تشخیص داده می‌شود را می‌توان از حل معادله ۶ به دست آورد [۲۳ و ۲۴]:

$$\frac{\partial}{\partial n} G_n * I = 0 \quad (6)$$

که G_n مشتق تابع گوس در راستای n ، n راستای عمود بر لبه، * علامت ضرب کانولوشن، I جدول شدت نور عکس در نقاط مختلف است.

نتایج خروجی تحلیل تصاویر به روش کنی دارای حساسیت محسوسی به حد آستانه لبه‌یابی است. در صورتی که این حد افزایش یابد، سبب نادیده گرفتن برخی از لبه‌های فواره در تصاویر توسط نرم‌افزار شده و نتایج درستی ارائه نمی‌شود و این در حالی است که با کوچک شدن این حد، اثر ناهنجاری‌های تصاویر زیاد شده و در برخی از نقاط به اشتباه لبه فواره شناسایی می‌شود.

به منظور یافتن حد آستانه مناسب لبه‌یابی در تصاویر فواره، از روشی بر مبنای روش اوتسو^۱ استفاده شد. این نظام تصاویر را به صورت دو بخش، فواره و زمینه در نظر می‌گیرد و بهترین حد آستانه‌ای که این دو بخش را از هم جدا خواهد نمود را درمی‌یابد. اگر حد آستانه را tr و شدت نقاط را (i) در نظر گرفته شود، گروهی از شدت نقاط هستند که از حد آستانه کوچک‌تر ($i < tr$) و گروهی دیگر از این حد آستانه بزرگ‌تر ($i > tr$) خواهند بود.

حداقل مجموع وزنی انحراف معیار این دو گروه توسط روش اوتسو داده می‌شود و همچنین این روش حد آستانه‌ای را پیشنهاد خواهد نمود که σ_w^2 حداقل می‌شود و از معادله ۷ به دست می‌آید [۲۰]:

$$\sigma_w^2(tr) = q_1(tr)\sigma_1^2(tr) + q_2(tr)\sigma_2^2(tr) \quad (7)$$

که در آن q_1 و q_2 احتمال وقوع شدت‌های بزرگتر و کوچکتر از tr در هر تصویر بوده و σ_1^2 و σ_2^2 مجذور انحراف معیار در دو گروه ذکر شده است.

در برنامه نوشته شده در نرم‌افزار متلب عمق نفوذ با توجه به سر فواره تعریف شده است. باید متذکر شد که زمان شروع فواره به درستی مشخص نیست و ممکن است در هر لحظه از زمان بین دو عکس شروع شده باشد. بنابراین هر یک از آزمون‌ها ۱۰ بار تکرار شده و عمق نفوذ ارائه شده به صورت میانگین ارائه شده است. از سویی فاصله‌ای زمانی بین هر دو تصویر پیاپی وجود دارد که سبب ایجاد خطا به مقدار مسافت طی شده در فاصله زمانی خواهد شد و

¹ Otsu Algorithm

متفاوت هستند.

همچنین با عبور خطوط مستقیمی از نمودارهای طول نفوذ شکل ۴ و شکل ۵، می توان معادله خط گذرنده از مبدأ را به دست آورد. خطوط برازش شده با ضریب تعیین (R^2) مناسبی از داده های تجربی پیروی نموده و در نتیجه تغییرات عمق نفوذ با زمان بصورت خطی و مطابق با نتایج مرجع [۱۲] خواهد بود. در صورتی که شیب خطوط (m) طول نفوذ برازش شده بر مجذور

فشار تزریق ($\Delta P^{0.5}$) تقسیم شود، مشاهده خواهد شد که مقادیر به دست آمده با اختلافی کم دارای مقادیر نسبتاً ثابت هستند. در جدول ۲ و ۳ به ترتیب مقادیر حاصل از معادله برازش شده طول نفوذ فواره تنفس طبیعی و پرخوران نشان داده شده است.

t (ms)	$P = 2bar$	$P = 2bar$	$P = 4bar$	$P = 4bar$	$P = 6bar$	$P = 6bar$
۰,۳۷۴						
۰,۹۳۶						
۱,۴۹۸						
۲,۰۶۰						
۲,۶۲۲						
۳,۱۸۴						
۳,۷۴۶						

شکل ۳: تصاویر فواره پرخوران همراه پس زمینه و فواره پرخوران پس از حذف پس زمینه در زمان های مختلف و در فشارهای تزریق ۲، ۴ و ۶ بار

جدول ۳: مقادیر حاصل از معادله برازش شده طول نفوذ فواره پرخوران

ΔP (bar)	m	R^2	$\frac{m}{(\Delta P)^{0.5}}$
۲	۱۵,۰۳۸	۰,۹۹۸۳	۱۰,۶۳۳۴
۳	۱۸,۶۳۲	۰,۹۹۸۴	۱۰,۷۵۷۷
۳,۵	۱۹,۵۴۱	۰,۹۹۹	۱۰,۴۴۵۱
۴	۲۱,۱۸۷	۰,۹۹۸۹	۱۰,۵۹۳۵
۵	۲۳,۷۲۸	۰,۹۹۹۱	۱۰,۶۱۱۴
۶	۲۵,۹۳۳	۰,۹۹۷۸	۱۰,۵۸۷۱

جدول ۴: مقادیر حاصل از معادله برازش شده طول نفوذ فواره تنفس طبیعی با سوخت بنزین

ΔP (bar)	m	R^2	$\frac{m}{(\Delta P)^{0.5}}$
۲	۱۸,۳۱۶	۰,۹۹۲۷	۱۲,۹۵۱۳
۳	۲۰,۲۲۷	۰,۹۸۸۲	۱۱,۶۷۸۰
۳,۵	۲۱,۲۱۵	۰,۹۹۱۵	۱۱,۳۳۴۰
۴	۲۲,۸۲۴	۰,۹۸۵۶	۱۱,۴۱۲
۵	۲۵,۳۷۸	۰,۹۷۱۳	۱۱,۳۴۹۴
۶	۲۷,۹۵۶	۰,۹۸۲۵	۱۱,۴۱۳۰

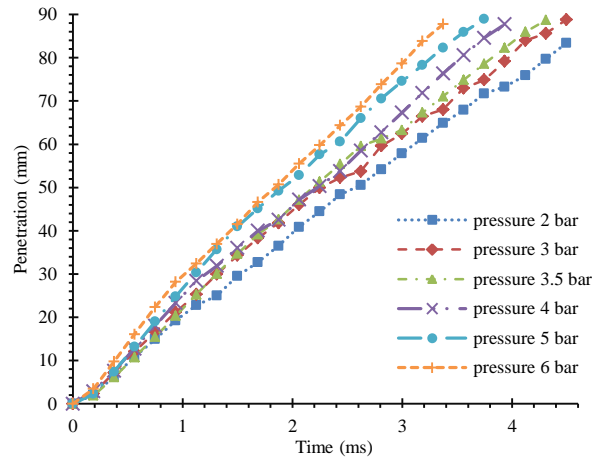
جدول ۵: مقادیر حاصل از معادله برازش شده طول نفوذ فواره پرخوران سوخت بنزین

ΔP (bar)	m	R^2	$\frac{m}{(\Delta P)^{0.5}}$
۲	۱۵,۶۵۹	۰,۹۹۷	۱۱,۰۷۲۵
۳	۱۸,۴۸۲	۰,۹۹۸۸	۱۰,۶۷۰۶
۳,۵	۱۸,۹۲۲	۰,۹۹۸۸	۱۰,۱۱۴۳
۴	۱۹,۹۹	۰,۹۹۷۶	۹,۹۹۵
۵	۲۲,۶۱۷	۰,۹۹۵۶	۱۰,۱۱۴۶
۶	۲۵,۷۱۹	۰,۹۹۹۱	۱۰,۴۹۹۷

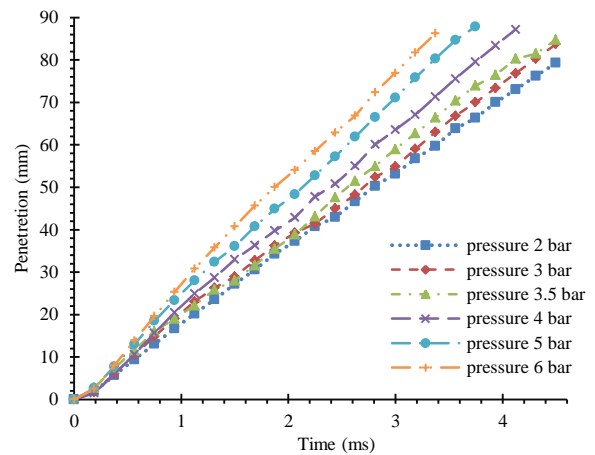
در صورتی که از مقادیر $m/(\Delta P^{0.5})$ به دست آمده در جدول ۲ و ۳ میانگین گرفته شود و مقدار میانگین را k بنامیم، آنگاه معادله خطوط برازش بر نمودارهای نفوذ فواره را می توان به فرم معادله ۸ ذکر نمود:

$$S = k(\Delta P)^{0.5}t \quad (8)$$

مقادیر k به دست آمده برای فواره تنفس طبیعی و پرخوران به ترتیب برابر با ۱۱,۳۵۷۳ و ۱۰,۶۰۴۷ هستند و بیشینه خطای استفاده از k با مقادیر جدول ۲ و ۳ به ترتیب برای فواره تنفس طبیعی و پرخوران برابر با ۸,۴٪ و ۱,۵٪ خواهد بود. بنابراین با دقت مناسبی قابلیت استفاده از معادله ۸ در بازه فشار تزریق ۲ تا ۶ بار وجود خواهد داشت.



شکل ۴: تغییرات عمق نفوذ بر حسب زمان پاشش در فشارهای مختلف برای افشانه تنفس طبیعی

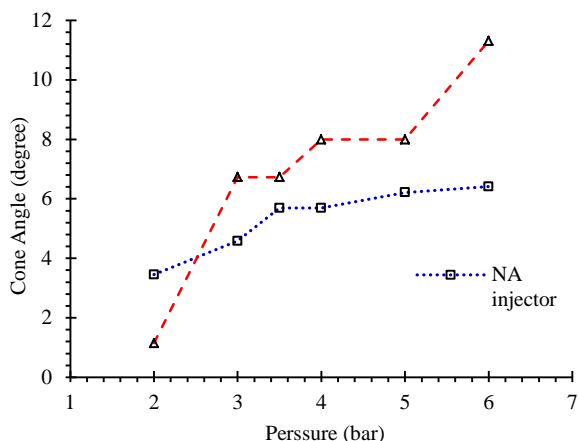


شکل ۵: تغییرات عمق نفوذ بر حسب زمان پاشش در فشارهای مختلف برای افشانه پرخوران

جدول ۲: مقادیر حاصل از معادله برازش شده نفوذ فواره تنفس طبیعی

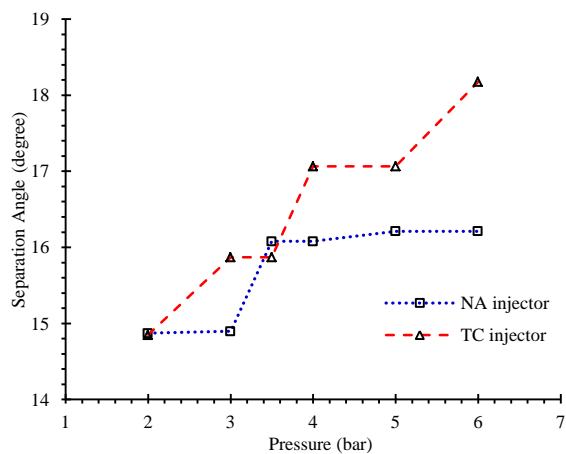
ΔP (bar)	m	R^2	$\frac{m}{(\Delta P)^{0.5}}$
۲	۱۷,۴۱۲	۰,۹۸۴۹	۱۲,۳۱۲۱
۳	۱۹,۹	۰,۹۸۹۷	۱۱,۴۸۹۲
۳,۵	۲۱,۳۹۲	۰,۹۹۳۹	۱۱,۴۳۴۵
۴	۲۲,۶۲۸	۰,۹۹۷۷	۱۱,۳۱۴
۵	۲۴,۲۱	۰,۹۹۴۲	۱۰,۸۲۷۰
۶	۲۴,۳۷۳	۰,۹۹۹۱	۱۰,۷۶۷۱

می توان به افزایش پخش شونگی فواره با افزایش فشار تزریق نسبت داد.



شکل ۷: زاویه مخروط سوخت افشانه تنفس طبیعی و پرخوران

زاویه جدایش فواره‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. در صورت مراجعه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش فشار تزریق، زاویه جدایش در حالت کلی افزایش خواهد یافت. نکته‌ای که در مورد شکل ۷ و شکل ۸ باید بیان نمود این است که تغییرات زاویه‌های مخروط و جدایش در فواره پرخوران بیشتر از فواره تنفس طبیعی است.



شکل ۸: زاویه جدایش فواره سوخت افشانه تنفس طبیعی و پرخوران زوایای و جرم خروجی فواره پرخوران بیش از تنفس طبیعی است و این در حالی است که نفوذ فواره پرخوران و تنفس طبیعی در فشارها و زمان‌های یکسان دارای مقادیر نزدیک به هم است. بنابراین افزایش جرم خروجی از فواره پرخوران در فشار یکسان سبب افزایش مساحت جانبی آن فواره نسبت به فواره تنفس طبیعی خواهد شد.

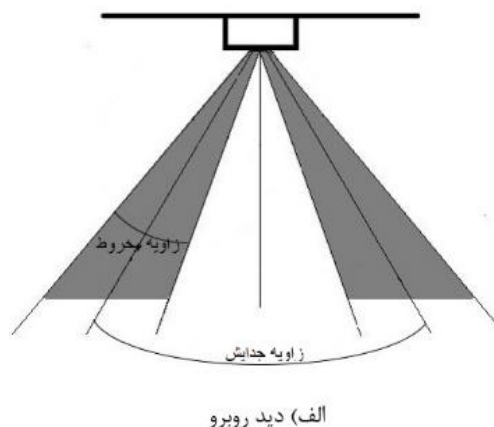
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تغییرات عمق نفوذ با فشار تزریق برای دو نوع افشانه موتور پرخوران و تنفس طبیعی بررسی شد که نفوذ دو فواره در فشارها و زمان‌های تزریق یکسان دارای اختلاف کمی بود. همچنین معادله‌ای بر حسب زمان و فشار تزریق برای فواره‌های خروجی از

با تکرار آزمون‌ها با بنزین اکتان ۸۷ نتایج مشابه با نتایج به‌دست آمده برای سوخت ان‌هپتان به‌دست می‌آید، که در جدول ۴ و جدول ۵ نشان داده شده است. همچنین مقادیر k میانگین برای فواره‌های بنزین افشانه تنفس طبیعی و پرخوران به ترتیب برابر بود با ۱۱۶۸۹ و ۱۰۴۱۱.

با توجه به اینکه آزمون‌های انجام گرفته برای بررسی فواره سوخت، در دمای محیط انجام گرفت، فواره بررسی شده از نوع فواره غیر تبخیری بوده و در حین آزمون‌ها نیز تبخیر سوخت که به راحتی توسط روش شیلرین قابل تشخیص است، در تصاویر فواره مشاهده نشد. از طرفی نتایج ارائه شده برای دو نوع افشانه با قطر خروجی‌های سوراخ مختلف، نشان داد، قطر سوراخ افشانه (با مقادیر بررسی شده در این مقاله) در فشارهای آزمون مورد بررسی در مقاله حاضر تأثیری روی عمق نفوذ فواره سوخت ندارد.

از جمله مشخصات قابل بررسی فواره، زاویه مخروط و زاویه جدایش^۱ فواره هستند (این زوایا توسط استانداردهای مرجع [۲۰ و ۲۱] بیان شده است). در شکل ۶ تصویر نمادین زاویه مخروط و زاویه جدایش نشان داده شده است.



شکل ۶: تصویر نمادین زاویه مخروط و زاویه جدایش

استفاده از مشخصه سطح تصویر شده فواره برای توصیف پخش شونگی به جای مشخصه زاویه کلی فواره، می‌تواند اطلاعات کامل تری در مورد توزیع یکنواخت سوخت و هوا در اختیار قرار دهد ولی برای فواره تزریق درگاهی بررسی شده در این مقاله با توجه به فشارهای پاشش کم، سطح فواره حالت منقطع داشته و این موضوع تحلیل تصاویر و محاسبه سطح تصویر شده را مشکل می‌نماید، بنابراین در این مقاله زاویه فواره به جای سطح تصویر شده بررسی شد.

در شکل ۷ مقادیر زاویه مخروط فواره تنفس طبیعی و پرخوران نشان داده شده است. با توجه به این شکل، افزایش فشار تزریق سوخت در هر دو فواره موجب افزایش زاویه مخروط خواهد شد که این را

¹ Separation Angle

علائم یونانی

ρ	چگالی
σ	عدد ثابت تعیین کننده شکل تابع گوس
σ_w	مجموع انحراف معیار وزنی

زیرنویس‌ها

g	گاز
l	مایع
n	راستا

نمادها

*	ضرب کانولوشن
---	--------------

افشانه موتور پرخوران و تنفس طبیعی ارائه شد و این نتیجه حاصل شد که این معادله بر حسب زمان و بر حسب جذر فشار تزریق، خطی است. معادله تجربی استخراج شده برای عمق نفوذ بر حسب فشار و زمان تزریق، مشابه معادله سوخت دیزل پرفشار در زمان قبل از زمان شکست، است. زاویه مخروط و زاویه جدایش فواره‌ها با افزایش فشار تزریق به صورت کلی افزایش یافتند. مقادیر زاویه مخروط و زاویه جدایش فواره پرخوران در حالت کلی بیش از فواره تنفس طبیعی بود. از تحلیل تصاویر به دست آمده همچنین می‌توان این طور نتیجه گرفت که در حالت کلی با افزایش فشار تزریق، زوایای فواره‌ها افزایش خواهد یافت. از طرفی این نتیجه حاصل شد که قطر سوراخ افشانه در فشارهای تزریق و محدوده قطرهای بررسی شده در این مقاله تأثیری روی عمق نفوذ فواره ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از پرسنل و مدیریت شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) اعلام می‌دارند.

فهرست علائم

d_o	قطر روزنه
G	تابع گوسی دو بعدی
G_n	مشتق تابع گوس در راستای n
i	شدت نور در نقطه
k	عدد ثابت
I	جدول شدت نور عکس در نقاط مختلف
LE	درصد خطای نسبی خطی بودن
n	راستای عمود بر لبه
P	فشار، bar
q	شار پویا، g/1000stroke
q	احتمال وقوع شدت‌ها نور
Q	شار ایستایی، g/min
t	زمان تزریق، ms
t_i	زمان پاشش، ms
T	دوره تزریق، ms
T	دما
θ	زاویه قرارگیری افشانه نسبت به خط قائم، degree
S	عمق نفوذ، mm
tr	حد آستانه لبه یابی
x	مختصات در راستای افق
y	مختصات در راستای عمود

مراجع و منابع

- [1] Combustion of Biomass Particles in a Small Scaled CHP Unit. JEM, pp 56-63, 2016.
- [2] I. Sohrabiasl, M. Gorji-Bandpy, A. Hajjalimohammadi, M. Agha Mirsalim Effect of open cell metal porous media on evolution of high pressure diesel fuel spray. Fuel, vol 206, pp 133-144, 2017.
- [3] C. Tropea, A. Yarin, Springer handbook of experimental fluid mechanics. Springer Science & Business Media, 2007.
- [4] G. Settles, Schlieren and shadowgraph techniques-Visualizing phenomena in transparent media (Book). Springer-Verlag GmbH. 2001.
- [5] F. Mayinger, Optical measurements techniques and applications. Springer Science & Business Media, 2013.
- [6] J. Dent, A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration, SAE Technical Paper, No 710571, 1971.
- [7] H. Hiroyasu, M. Arai, Structures of fuel sprays in diesel engines, SAE Technical Paper, No 900475, 1990.
- [8] G. Zhu, et al., Modelling characteristics of gasoline wall films in the intake port of port fuel injection engines, International Journal of Engine Research, Vol. 2, No. 4, pp. 231-248, 2001.
- [9] A. Nassiri-Toosi, A.L. Nozari, and M. Etghani. Numerical Study of the Effect of Fuel Spray Velocity and Targeting on Fuel Evaporation Rate in a Port Fuel Injection Engine by Using Kiva3-V2 Simulation Code. in ASME 2007 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. 2007. American Society of Mechanical, ICEF2007-1641, 2007.
- [10] G. Bianchi, et al., CFD analysis of injection timing and injector geometry influences on

- injection system using kerosene and gasoline, Fuel, Vol. 235, pp, 782-794, 2019.
- [18] Park, Jeonghyun, Kyung-Hwan Lee, and Suhan Park. Comprehensive Spray Characteristics of Water in Port Fuel Injection Injector, Energies Vol. 13, Issue.2 , 2020.
- [19] S. rahmani, A. Haljialimohammadi, H. fathollahy, S. Aghamirsalim, Introducing of the propagation criterion and investigation of that for near vacuum chamber pressures for multi hole gasoline direct injector spray, Journal of engine research, Vol 51, No 51, pp 35-42, 2018.
- [20] Low Pressure Gasoline Fuel Injector Standard, SAE International, No J1832_201610, 2016.
- [21] Gasoline Fuel Injector Spray Measurement and Characterization Standard, SAE International, No J2715_200703, 2007.
- [22] <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/>
- [23] I. Erfan, A. Hajialimohammadi, I. Chitsaz, M. Ziabasharhagh, R.J. Martinuzzi, Influence of chamber pressure on CNG jet characteristics of a multi-hole high pressure injector, Fuel, Vol. 197, pp 18-193, 2013.
- [24] A. Hajialimohammadi, D. Honnery, A. Abdullah, S. Mirsalim, Sensitivity analysis of parameters affecting image processing of high pressure gaseous jet images . JER. 2014, Vol 33, pp. 43-52, 2014.
- [25] N. Otsu, A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol. 9, pp. 62-66, 1979.
- mixture preparation at idle in a PFI motorcycle engine, SAE Technical Paper, No 2007-24-0041, 2007.
- [11] C. Anand, et al., Laser-based spatio-temporal characterisation of Port Fuel Injection (PFI) sprays, International Journal of Spray and Combustion Dynamics, Vol. 2, No. 2, pp. 125-149, 2010.
- [12] T. Anand, A.M. Mohan, R. Ravikrishna, Spray characterization of gasoline-ethanol blends from a multi-hole port fuel injector. Fuel. Vol. 102, pp. 613-623, 2012.
- [13] S. Jain, T. Anand, A Novel Concept for Mixture Preparation in Port Fuel Injected Engines, SAE Technical Paper, No 2015-32-0773, 2015.
- [14] T. Li, et al., Understanding the Effects of Fuel Type and Injection Conditions on Spray Evaporation Using Optical Diagnostics, SAE Technical Paper, No 2015-01-0926, 2015.
- [15] Y. Lee, et al., The dual-port fuel injection system for fuel economy improvement in an automotive spark-ignition gasoline engine. Applied Thermal Engineering. Vol. 138, pp. 300-306, 2016.
- [16] M. Nazari Chekoveri, A. Hajialimohammadi, S. M. Mirsalim , H. R. Fajri, Experimental investigation on the effect of injection pressure and injector installation angle on the penetration of the gasoline port fuel injector using high speed imaging method, Journal of engine research, Vol 52, No 52, pp 29-42, 2018.
- [17] Hu, J., et al. Experimental study on the spray characteristics of an air-assisted fuel



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



An Experimental formulation for PFI injector penetration length versus time and pressure using high speed spray imaging results

M. Nazari Chekoveri¹, A. Hajiali Mohammadi^{2*}, S. M. Mirsalim³, H. Fajri⁴

¹ Master degree of mechanical engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, mahdinazari2701@gmail.com

² Faculty of Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran, ahajiali@semnan.ac.ir

³ Faculty of Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, mirsalim1@yahoo.com

⁴ Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, h_fajri@ipco.com

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 03 April 2020

Accepted: 18 August 2020

Keywords:

PFI injector

Schlieren Imaging

Image Processing

Tip Penetration

ABSTRACT

Recently, there have been problems with particulate matter pollution in diesel engines and it has reduced production rate of these engines and also, it has accelerated the development of new technologies for PFI and GDI gasoline engines. The spray characteristics has significant impact on the combustion efficiency, power and emissions on internal combustion engines. In This study, effect of injection pressure on the fuel spray penetration, spray cone angle and separation angle has been investigated for EF7 bi fuel engine and an experimental formulation for spray penetration was introduced. The method of Schlieren Imaging method was used to obtain the geometric characteristics of the fuel spray. The images were processed in MATLAB software and the penetration, cone angle and spray separation angle as geometrical properties were calculated. The Otsu method was used to obtain an appropriate edge threshold of image. Investigation of the injection pressure effect on the penetration concluded an experimental formulation for penetration versus time and injection pressure. This equation was linear according to time and square root of injection pressure with maximum error of 8.4%. The penetration of the two fuel sprays (for both injectors tested) had a little difference at the similar pressures and injection times. It was concluded also the cone angle and spray separation angle increased with increasing injection pressure.

