



بررسی عددی و تجربی سامانه پاشش سوخت لوله مشترک و ارزیابی تأثیر فشار پاشش سوخت بر ویژگی‌های پاشش و نوسانات فشار

رسول همتیان^۱، جعفر مساح^{۲*}، سیدرضا حسن بیگی^۳، علیرضا حاجی علی محمدی^۴

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران، r.hematian@ut.ac.ir

^۲ دانشیار گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران، jmassah@ut.ac.ir

^۳ استاد گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران، rhbeigi@ut.ac.ir

^۴ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ahajiali@semnan.ac.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۷ اسفند ۱۳۹۸

پذیرش: ۳۱ تیر ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

نوسانات فشار

فشار سوخت

شبیه‌سازی

سامانه پاشش

فرآیند احتراق در موتور دیزل، عملکرد موتور، مصرف سوخت، ترکیبات گاز خروجی و صدای احتراق تا حد زیادی به نحوه فراهم شدن مخلوط سوخت و هوا در موتور بستگی دارند. ویژگی‌های پاشش سوخت از جمله شروع پاشش، منحنی نرخ تخلیه و مدت زمان و فشار پاشش در کیفیت تشکیل مخلوط سوخت و هوا تعیین کننده هستند. یک روش معمول برای بررسی سامانه پاشش سوخت، فشار و اثرات آن بر مقدار و زمان پاشش، استفاده از شبیه‌سازی عددی است. در این پژوهش سامانه پاشش سوخت لوله مشترک به صورت یک بعدی و در نرم افزار AMESim شبیه‌سازی شد و اثر فشار سوخت بر نوسانات فشار سوخت در ورودی افشانه، نرخ پاشش، جرم سوخت پاشیده شده، زمان پاشش و جابه‌جایی میله مهار بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد فشار تزریق قویتر منجر به نوسانات فشار بیشتر می‌شود. به دلیل تراکم سوخت، چگالی سوخت با افزایش فشار افزایش می‌یابد و در نهایت منجر به انتشار سریعتر نوسانات فشار می‌شود. مدت زمان پاشش نیز با وجود یکسان بودن مدت زمان تحریک سیم‌پیچ در فشارهای مختلف، متفاوت است که به دلیل تأخیری است که در بسته شدن گلوگاه و حرکت سوزن به سمت پایین وجود دارد. مقدار تأخیر در بسته شدن با افزایش فشار بیشتر می‌شود.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

فرآیند احتراق در موتور دیزل، عملکرد موتور، مصرف سوخت، ترکیبات گازهای خروجی و صدای احتراق تا حد زیادی به نحوه فراهم شدن مخلوط سوخت و هوا در موتور بستگی دارند. ویژگی‌های پاشش سوخت از جمله شروع پاشش، منحنی شار تخلیه و مدت زمان پاشش، فشار پاشش و تعداد آن در کیفیت تشکیل مخلوط سوخت و هوا تعیین‌کننده هستند. در موتور دیزل، میزان گازهای خروجی، مصرف سوخت و صدا تا حد زیادی با مهار فرآیند احتراق کاهش می‌یابند.

تا دهه ۱۹۸۰ مقدار سوخت پاشیده شده و شروع پاشش در موتورهای دیزل فقط به صورت مکانیکی مهار می‌گردید. امروزه برای رعایت استانداردهای آلایندگی نیاز به تنظیم دقیق ویژگی‌های پاشش، نظیر پیش‌پاشش، پاشش اصلی، مقدار سوخت تزریق شده، فشار و شروع پاشش، متناسب با حالت کاری موتور است. این تنظیمات دقیق تنها با استفاده از یک واحد مهار الکترونیکی قابل دستیابی است که متغیرهای پاشش را به عنوان تابعی از دما، سرعت موتور، بار و غیره محاسبه کند. بنا بر این نیازها بود که مهار الکترونیکی دیزل^۱ (EDC) در موتورهای دیزلی رواج پیدا کرد. با سخت‌گیرانه‌تر شدن استانداردهای آلایندگی گازهای خروجی موتورهای دیزل، اقدامات بیشتری برای کاهش آلایندها در این موتورها انجام شده است [۱].

انتشار آلایندها و همچنین صدای احتراق با فشارهای تزریق بسیار بالا که توسط سامانه پاشش لوله مشترک^۲ تامین می‌شود، می‌تواند کاهش یابد.

علیرغم مزایای سامانه لوله مشترک، یکی از چالش‌های آن برای موتورهای با آلایندگی کم، نوسانات فشار سوخت است که تغییراتی در مقدار پاشش ایجاد می‌کند. امروزه فشار پاشش در بسیاری از موتورهای دیزلی تا حداکثر ۲۵۰۰ بار می‌رسد و این افزایش فشار می‌تواند اثر تغییرات فشار سوخت را تقویت کند. تنظیم مقدار پاشش افشانه^۳ با استفاده از افشانه‌های تنظیم شونده با تنظیم مقدار پاشش^۴ (IQA) در کارخانه سازنده و استفاده از ضریب تصحیح امواج فشار^۵ (PWC) دو روش رایج است که می‌تواند به بهبود سوخت پاشیده شده از افشانه کمک کند [۱].

یک روش معمول برای بررسی امواج فشار و اثرات آن بر مقدار و زمان پاشش سامانه پاشش سوخت موتور دیزل، استفاده از شبیه‌سازی عددی است. این روش سریع و دقیق است و در کارهای تحقیقاتی اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۲].

کیم و همکاران [۳] در تحقیقی با شبیه‌سازی افشانه سیم‌پیچی^۶ دیزل با نرم افزار AMESim، تأثیر گرانروی^۷ و چگالی سوخت را بر مقدار تزریق بررسی کردند. در این تحقیق افشانه سیم‌پیچی دیزل بوسیله نرم‌افزار به صورت تک بعدی شبیه‌سازی شد. هدف از این تحقیق بررسی اثرات گرانروی و چگالی سوخت با توجه به دما بر روی مقدار تزریق سوخت به صورت عددی بود. دقت الگوی شبیه‌سازی با نتایج تجربی و آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که تأثیر گرانروی بر مقدار تزریق بیشتر از چگالی بود. همچنین گرانروی و چگالی بر تغییرات نیروی هیدرولیکی و نیروی اصطکاک پویای داخل افشانه تأثیر می‌گذارند و با افزایش گرانروی سوخت به دلیل کاهش ضریب تخلیه جریان، مقدار نیروی هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

محبی و همکاران [۴] در پژوهشی سامانه تزریق سوخت لوله مشترک یک موتور دیزلی تک استوانه را به روش یک بعدی و در نرم‌افزار AMESim شبیه‌سازی کردند و متغیرهای فشار تزریق، زمان تحریک، قطر و طول لوله‌های فشار قوی را ارزیابی کردند. مقدار جرم تزریق شده برای نقاط مختلف سامانه تزریق سوخت محاسبه گردید که می‌تواند به عنوان نقشه مهار برقی موتور به عنوان متغیرهای ورودی استفاده شود. نتایج آن‌ها نشان داد که نوسان فشار در ورودی افشانه با کاهش قطر لوله افزایش می‌یابد در حالی که طول لوله تأثیر معنی‌داری بر روی امواج فشار ندارد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از بیودیزل به عنوان سوخت منجر به کاهش مقدار تزریق خواهد شد؛ اما تأثیری در نوسانات فشار ندارد.

سالوادور و همکاران [۵] یک تحقیق محاسباتی و تجربی بر روی فعال‌کننده پیزو^۸ برای افشانه سامانه سوخت‌رسانی موتور دیزل انجام دادند. در این تحقیق ویژگی عناصر مختلف سامانه از نظر هندسی و هیدرولیکی برای توصیف رفتار آن بررسی شد. شبیه‌سازی یک بعدی در نرم‌افزار AMESim انجام شد. نتایج اعتبارسنجی الگو با داده‌های تجربی نشان داد که الگو برای پیش‌بینی مقدار تزریق افشانه، دارای دقت عالی است و بنابراین از این شبیه‌سازی می‌توان برای مطالعات بیشتر در مورد این نوع سامانه تزریق استفاده نمود.

ژیا و همکاران [۶] در تحقیقی سامانه سوخت‌رسانی با فشار قوی را توسط نرم افزار AMESim، شبیه‌سازی نمودند. الگو با قسمت‌هایی که با نرم افزار متلب^۹ تهیه شده بود (الگوی تلمبه^{۱۰} سوخت، الگوی سامانه مهار، الگوی احتراق اعتبارسنجی شد. نتایج نشان دادند که شبیه‌سازی سامانه سوخت‌رسانی فشار قوی و سامانه مهار در موتور دیزل لوله مشترک ابزار قدرتمندی برای بهینه‌سازی عملکرد موتور

⁶ Solenoid

⁷ Viscosity

⁸ Piezoelectric

⁹ Matlab

¹⁰ Pump

¹ Electronic Diesel Control

² Common Rail

³ Injector

⁴ Injection Quantity Adjustment

⁵ Pressure Wave Correction

شبیه‌سازی گردیدند، نتایج نشان داد که شبیه‌سازی دوم سامانه را دقیق‌تر توصیف می‌کند و بر همین اساس نتایج بسیار بهتری نسبت به شبیه‌سازی اول ارائه می‌دهد.

گولاکسن [۱۲] سامانه پاشش سوخت را در نرم افزار Matlab و با کمک رابطه‌های ریاضی و فیزیکی شبیه‌سازی کرد و توانست معادله‌های مربوط به هر یک از اجزای سامانه پاشش سوخت را استخراج کند.

بررسی منابع نشان می‌دهد که شبیه‌سازی سامانه پاشش سوخت لوله مشترک یک موتور دیزل با نرم افزار AMESim برای بررسی اثر فشار پاشش سوخت بر نوسانات فشار در مسیر ورودی به افشانه و همچنین مدت زمان پاشش نسبت به مدت زمان مختلف تحریک شیر برقی در فشارهای مختلف ارزیابی نشده است؛ لذا هدف از مطالعه حاضر، شبیه‌سازی و صحنه‌گذاری شبیه‌سازی تک‌بعدی هیدرولیکی سامانه پاشش سوخت لوله مشترک با استفاده از سوخت دیزل استاندارد (دیزل شماره ۲) و بررسی اثر فشارهای مختلف پاشش سوخت بر ویژگی‌های پاشش سوخت، نوسانات فشار و مدت زمان پاشش نسبت به مدت زمان مختلف تحریک سیم‌پیچ افشانه است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سامانه پاشش لوله مشترک

در این پژوهش از سامانه پاشش سوخت لوله مشترک موتور دیزل ملی که توسط شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) طراحی و ساخته شده استفاده گردید. این سامانه شامل یک تلمبه فشار قوی تک سمبه دارای شیر مهارکننده برقی برای تنظیم شار جرمی جریان سوخت تحویلی است. افشانه‌های مورد استفاده افشانه ۸ سوراخ موتورهای دیزل لوله مشترک با سوراخ‌های SAC-Hole است. سوراخ‌های نازل دارای قطر اسمی ۰,۱۲ میلی‌متر اند.

سوخت استفاده شده در این مطالعه، سوخت دیزل شماره ۲ با مشخصات استاندارد ISO۴۱۱۳ است. در جدول ۱ برخی از مشخصات این سوخت داده شده است. متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: برخی مشخصه‌های سوخت دیزل (شماره ۲) استاندارد

مقدار مشخصه	نام مشخصه
۸۲۳	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب در ۱۵ درجه سلسیوس)
۳,۵	گرانروی (میلی متر مربع بر ثانیه در ۴۰ درجه سلسیوس)
۱۳۹۳	ضریب حجمی

است. با استفاده از شبیه‌سازی می‌توان خطمشی سوزن افشانه (که اثرات مهمی روی شرایط دور آرام، بیشینه گشتاور موتور، ویژگی تزریق سوخت و عملکرد موتور دارد) را مهار کرد و با بهینه‌سازی آن می‌توان نوسانات سرعت موتور را تا حد زیادی کاهش داد.

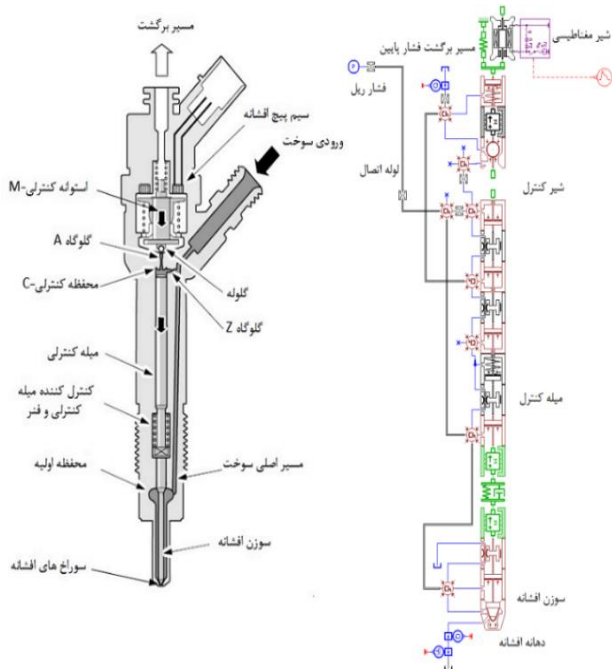
بادی و سیرز [۷] تأثیر خواص سوخت زیست‌دیزل را بر روی شار جریان جرمی پاشش سامانه پاشش سوخت لوله مشترک موتور دیزل بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که چگالی سوخت مهم‌ترین خاصیتی است که بر مقدار جرم سوخت پاشیده شده و نوسانات فشار اثر می‌گذارد و گرانروی و ضریب حجمی نیز با مرتبه کمتری بر ویژگی‌های پاشش تأثیرگذار هستند. همچنین آن‌ها دریافتند که شار جریان جرمی افشانه به‌ویژه در راهبرد پاشش چند مرحله‌ای مشخصه تعدیل‌کننده‌ای است که ضریب اصطکاک سوخت را تغییر می‌دهد.

سیکنز و همکاران [۸] در تحقیق دیگری فرآیند تزریق سامانه سوخت‌رسانی لوله مشترک را با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی AMESim شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق تلمبه سوخت، لوله و افشانه به صورت جداگانه شبیه‌سازی شدند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج عددی از نظر مقدار احتراق و انتشار مقایسه شدند. شار جریان جرمی و مقدار جابجایی سوزن بررسی گردیدند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی با تقریب خوبی سرعت پاشش سوخت را شبیه‌سازی می‌کند و مقدار شار جریان و جابجایی سوزن را هم با تقریب بسیار خوبی شبیه‌سازی نموده است.

زجسکی و همکاران [۹] مطالعاتی بر روی ضریب تخلیه‌ی نازل افشانه دیزل برای بررسی جریان آرام و آشفته برای سوخت‌های جایگزین انجام دادند. آن‌ها دریافتند که در مورد هندسه نازل افشانه ارتباطی بین عدد رینولدز و ضریب تخلیه برقرار می‌شود که وابسته به خواص سوخت نمی‌باشد.

کاپو و دوستان [۱۰] برای یک سامانه کامل پاشش سوخت لوله مشترک از روش عددی استفاده کردند و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. آنها تمرکز مطالعه خود را بر روی ویژگی‌های شبیه‌سازی افشانه گذاشتند. آن‌ها اثر کاهش قطر سوراخ تغذیه حجم مهار، کاهش ظرفیت حجم مهار و افزایش قطر گلوگاه ورودی بر ویژگی‌های پاشش افشانه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاهش قطر سوراخ تغذیه حجم مهار اثر مهمی در منحنی شار پاشش دارد و کاهش ظرفیت حجم مهار باعث پاسخ سریعتر افشانه و همچنین افزایش قطر گلوگاه ورودی باعث تاخیر در پاسخ افشانه می‌شود.

آهلین [۱۱] رفتار فشار را در سامانه سوخت‌رسانی لوله مشترک موتور دیزل با معادلات ریاضی بررسی کرد. او از دو روش شبیه‌سازی متفاوت استفاده کرد که هر دو بر پایه معادلات فیزیکی بودند. روش اول امواج فشاری به صورت امواج مکانیکی و به صورت جرم و فتر شبیه‌سازی شدند و در روش دوم امواج با استفاده از معادله موج



شکل ۲: نمایی از اجزای داخلی افشانه مورد استفاده در سامانه لوله مشترک به همراه الگوی شبیه سازی شده آن در نرم افزار AMESim

بر اساس معادلات زیر شبیه سازی تمامی قسمت ها در نرم افزار AMESim انجام گردید:

شار جریان جرمی (\dot{m}_f) عبوری از گلوگاهها با معادله برنولی (معادله ۱) محاسبه گردید که در این معادله سرعت (u_B) از رابطه ۲ به دست می آید [۱۳].

$$\dot{m}_f = C_d(\lambda) \cdot A_o \cdot \rho_f \cdot u_B \quad (1)$$

$$u_B = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_i - P_b)}{\rho_f}} \quad (2)$$

که C_d ضریب تخلیه، (λ) عدد جریان، (A_o) سطح مقطع گلوگاه، (ρ_f) چگالی سوخت، (u_B) سرعت سیال، (P_i) فشار پاشش و (P_b) فشار تخلیه است. C_d ضریب تخلیه است که برای جریان بدون حفره زایی تنها به سرعت، چگالی و گرانیوی سیال وابسته است، این وابستگی با استفاده از یک شماره جریان λ در نظر گرفته می شود که از معادله ۳ محاسبه می شود [۱۳].

$$\lambda = \frac{D_o}{v_f} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_i - P_b)}{\rho_f}} \quad (3)$$

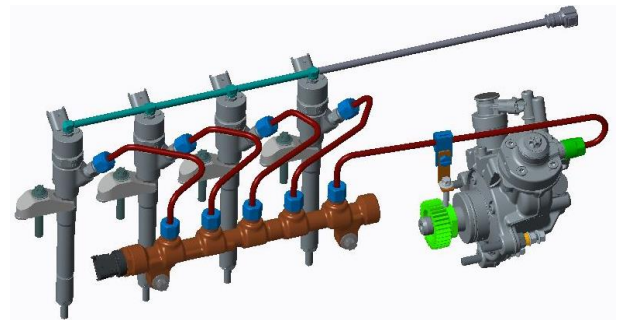
که قطر سوراخ خروجی افشانه، (v_f) گرانیوی حرکتی سوخت^۳ است. به منظور اصلاح ضریب تخلیه متغیر بی بعد عدد حفره زایی^۴ (CN) تعریف شده است که نسبت اختلاف فشار به فشار جریان پایین دست

جدول ۲: متغیرهای مورد بررسی

مقدار	نام متغیر
۱۶۰۰، ۱۳۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰	فشار پاشش (بار)
۱۱۰۰، ۹۰۰، ۷۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰	زمان تحریک (میکرو ثانیه)

۲-۲- شبیه سازی سامانه پاشش لوله مشترک

قسمت فشار قویی سامانه پاشش لوله مشترک که در شکل ۱ نشان داده شده است توسط نرم افزار AMESim شبیه سازی شد. در این نرم افزار هر جزء فیزیکی سامانه با یک نشان، نمایش داده می شود و به یک یا چند متغیر مرتبط است. به طور کلی، سامانه های هیدرولیک در AMESim می توانند توسط زیر شبیه سازی های هم دما^۱ یا عایق گرما^۲ که تک بعدی (خطوط سوخت) یا صفر بعدی (محدودیت ها، حجم ها) هستند شبیه سازی شوند. در این مطالعه به دلیل ماهیت سریع فرآیند پاشش سوخت، از شبیه سازی های هم دما استفاده شد.



شکل ۱: نمایی از قسمت فشار قویی سامانه پاشش لوله مشترک

در شکل ۲ شمای یک افشانه سامانه لوله مشترک همراه با جزئیات الگوی AMESim مربوطه نمایش داده شده است.

زمانی که سیم پیچ بالای افشانه تحریک می شود در نتیجه نیروی آهنربائی گلوله شیر را از جایگاه خود بلند می کند. از آنجا که شار جریان از مسیر دریچه Z کوچک تر از شار آن در راستای مسیر A است فشار در محفظه ی مهار افت می کند و چون فشار لوله همچنان در نوک سوزنی شکل وجود دارد سوزن به سمت بالا رفته و پاشش شروع می شود. زمانی که جریان در سیم پیچ قطع می شود نیروی فنر سیم پیچ، گلوله را سر جای خود بازمی گرداند. در نتیجه فشار در محفظه ی مهار دوباره زیاد شده و سوزن به جایگاه خود باز می گردد. در نمایش گرافیکی AMESim در شکل ۲، عناصر فیزیکی افشانه نیز مشخص اند.

³. Fuel kinematic viscosity

⁴. Cavitation number

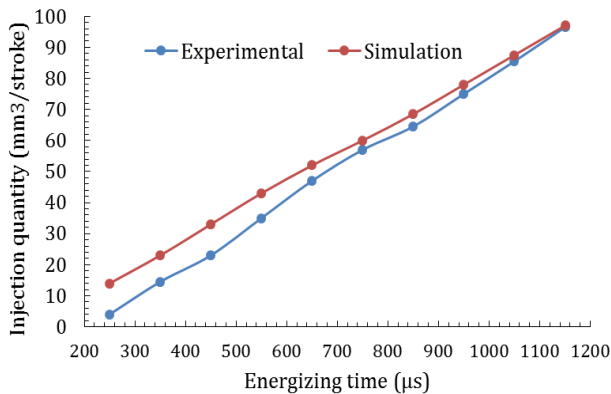
¹ Isothermal

² Adiabatic

۳- بحث بر روی نتایج

مقایسه مقادیر میزان پاشش سوخت به ازای مدت زمان‌های مختلف تحریک^۲ افشانه حاصل از شبیه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری شده میزان پاشش در آزمون‌های تجربی در شکل ۵ انجام شده است. این نتایج در فشار ۱۶۰۰ بار، دمای ۳۰ درجه سانتیگراد سوخت به‌دست آمده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود در زمان‌های پاشش کم اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد که با افزایش زمان‌های پاشش این اختلاف کاهش می‌یابد و در زمان‌های بیشتر از ۱۱۰۰ میکروثانیه تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی مشاهده می‌شود.

لازم به ذکر است که در هنگام باز شدن افشانه، ضریب تخلیه از مقادیر بسیار کم به مقادیر زیاد آن افزایش می‌یابد و شار جریان افشانه در این زمان ثابت نیست، بنابراین در این زمان رفتار افشانه خطی نمی‌باشد. این رفتار غیرخطی تا مدت زمان کمی بعد از باز شدن کامل سوزن افشانه به دلیل خیز سوزن ادامه می‌یابد [۱۴]؛ لذا می‌توان انتظار داشت که اختلاف بین نتایج آزمون تجربی و شبیه‌سازی در زمان‌های پاشش بیشتر کم باشد.



شکل ۵: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمون‌های تجربی

شکل ۶ نوسانات فشار در مسیر ورودی به افشانه در فشارهای پاشش ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ بار به ازای زمان را نشان می‌دهد. مدت زمان پاشش در تمامی حالت‌ها ۱,۱ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. افت فشاری که قبل از شروع پاشش دیده می‌شود به دلیل بالا رفتن استوانه M و جریان پیدا کردن سوخت از گلوگاه A است (شکل ۲).

است. اگر عدد حفره‌زایی از عدد حفره‌زایی بحرانی بیشتر باشد به صورت معادله ۴ بیان می‌شود [۵].

$$CN = \frac{P_i - P_b}{P_b - P_v} \quad (4)$$

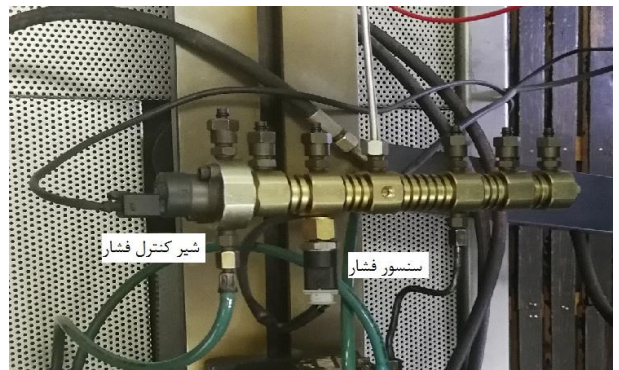
که P_v فشار بخار سوخت است که به دلیل مقدار کم آن معمولاً نادیده گرفته شده و معادله به معادله ۵ تبدیل می‌شود.

$$C_{d(critical)} = C_d \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{CN}} \quad (5)$$

برای اعتبار سنجی الگوی شبیه‌سازی شده شار حجمی پاشش افشانه با استفاده از دستگاه آزمون افشانه لوله مشترک شرکت بوش^۱ الگوی EPS 815 (شکل ۳)، برای ۱۰ زمان تحریک سیم‌پیچ افشانه و تعداد ۱۵۰ ضربه برای هر زمان مورد آزمون قرار گرفت. برای مهار بهتر فشار علاوه بر سیستم مهار فشار دستگاه از یک شیر مهار فشار بر روی لوله مشترک استفاده شد و برای خواندن دقیق‌تر فشار و بررسی آن در نزدیکی افشانه یک سنسور فشار بر روی لوله مشترک نصب گردید که موقعیت نصب آن‌ها بر روی لوله مشترک در شکل ۴ نشان داده شده است.



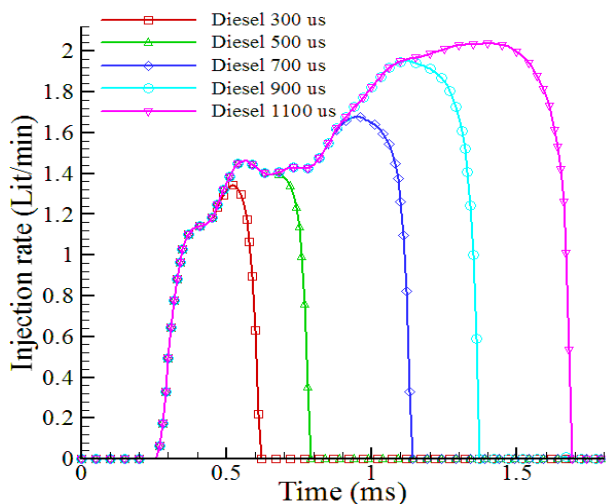
شکل ۳: دستگاه آزمون افشانه لوله مشترک



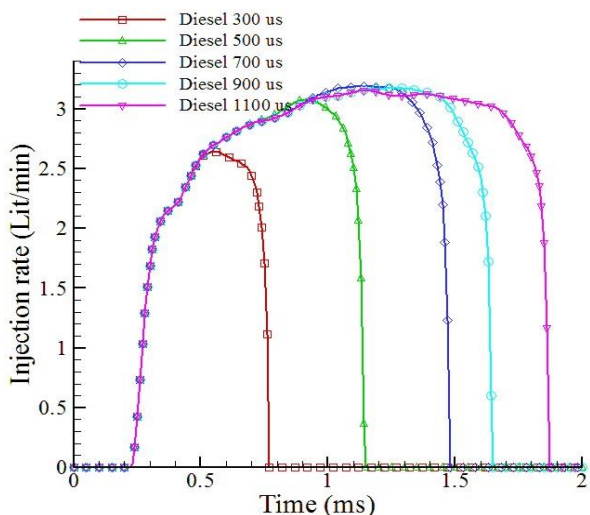
شکل ۴: لوله مشترک دستگاه آزمون افشانه

^۲ Energizing time

^۱ Bosch



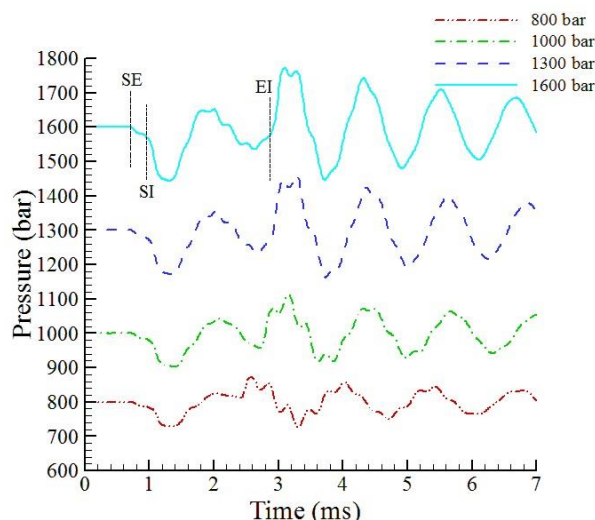
شکل ۷: شار پاشش افشانه برای فشار ۸۰۰ بار



شکل ۸: شار پاشش افشانه برای فشار ۱۶۰۰ بار

نوسان‌های ایجاد شده در این نمودارها به دلیل نوسانات فشار و مقدار جابه‌جایی میله‌مهارکننده افشانه است. به عنوان مثال در فشار ۸۰۰ بار همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود جابه‌جایی میله با نوسان بیشتری همراه بود که باعث ایجاد تغییر در منحنی شار پاشش می‌شود.

مجموع جرم سوخت پاشیده شده به ازای زمان برای فشارهای مختلف پاشش در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار مقدار جرم پاشیده شده سوخت و همچنین شیب آن نیز افزایش می‌یابد. افزایش شیب به دلیل تأخیری است که در زمان بسته شدن سوزن و قطع پاشش ایجاد می‌شود.

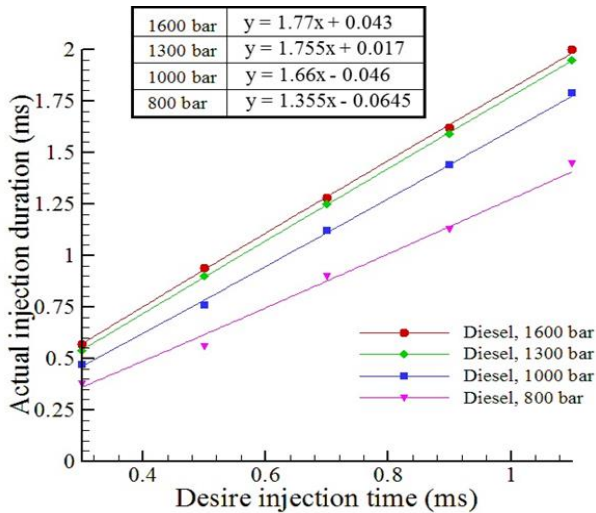


شکل ۹: نوسانات فشار در مسیر ورودی به افشانه در فشارهای پاشش ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ بار (در این شکل SE یعنی شروع تحریک، SI یعنی شروع پاشش و EI یعنی پایان پاشش).

پس از اتمام پاشش^۱ (نقطه EI) افزایش محسوسی را در فشار می‌توان مشاهده کرد که این افزایش فشار به دلیل بسته شدن ناگهانی گلوگاه است که باعث به وجود آمدن پدیده ضربه قوچ می‌شود. مدت زمان پاشش نیز با وجود یکسان بودن مدت زمان تحریک سیم‌پیچ در فشارهای مختلف، متفاوت است که به دلیل تأخیری است که در بسته شدن گلوگاه و حرکت سوزن به سمت پایین وجود دارد. علاوه بر این همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، فشار تزریق قویتر منجر به نوسانات فشار بیشتر می‌شود. به دلیل تراکم سوخت، چگالی سوخت با افزایش فشار افزایش می‌یابد و در نهایت منجر به انتشار سریعتر نوسانات فشار در مسیرهای فشار قوی سوخت می‌شود [۴]. همچنین مقدار تأخیر در بسته شدن با افزایش فشار بیشتر می‌شود.

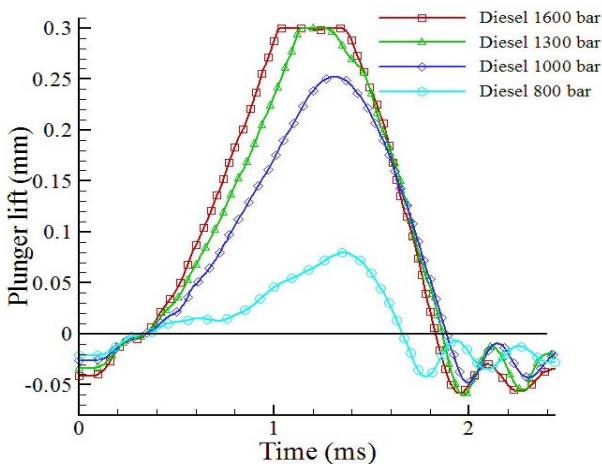
شار پاشش افشانه برای فشارهای ۸۰۰ و ۱۶۰۰ بار در زمان‌ها پاشش متفاوت به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند.

¹ End of Injection

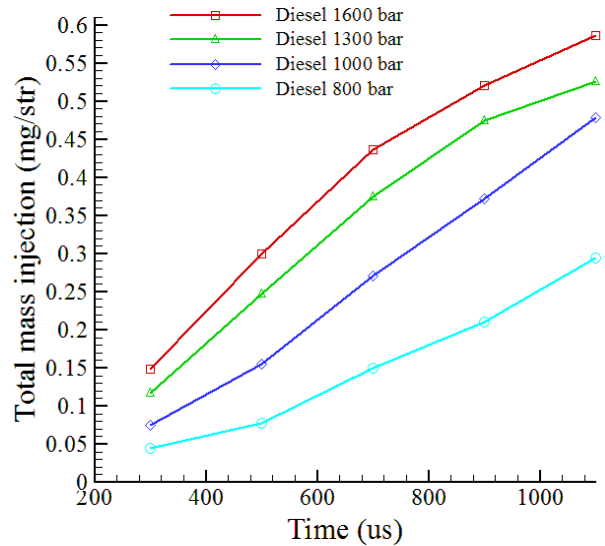


شکل ۱۰: مدت زمان پاشش نسبت به مدت زمان مختلف تحریک شیر برقی در فشارهای مختلف

شکل ۱۱ جابه‌جایی میله مه‌ار را در فشارهای ۱۶۰۰، ۱۳۰۰، ۱۰۰۰ و ۸۰۰ بار برای زمان ۱،۱ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زمان صفر موقعیت میله مه‌ار منفی است که با افزایش فشار مقدار آن کمتر می‌شود. این موقعیت منفی به دلیل فشار وارد شده به میله از جانب محفظه مه‌ار C است که با باز شدن گلوگاه A میله به سمت بالا حرکت می‌کند (C و A در شکل ۲ نشان داده شده‌اند). مقدار حرکت به سمت بالای میله به فشار پاشش و استحکام فنر میان سوزن و میله مه‌ارکننده وابسته است. حرکت نوسانی که در انتها پس از اتمام پاشش دیده می‌شود به دلیل نوسان‌های فشار در قسمت نوک سوزن است.



شکل ۱۱: جابه‌جایی میله مه‌ار در فشارهای مختلف



شکل ۹: مجموع جرم سوخت پاشیده شده به ازای زمان برای فشارهای پاشش مختلف

یکی از دشوارترین متغیرهای شبیه‌سازی مدت زمان تزریق^۱ است؛ زیرا چندین متغیر بر روی آن تأثیر می‌گذارند. در واقع، مدت زمان تزریق به ضربه برقی^۲، پیکربندی شیر برقی و همچنین زمان مورد نیاز برای تامین فشار لوله مشترک تا زمان تحریک اجزای برقی دیگر بستگی دارد. به دلیل لختی افشانه، معمولاً مدت زمان تزریق طولانی‌تر از زمان تحریک سیم‌پیچ افشانه است. بنابراین، برای استراتژی‌های چند پاشش، باید انتهای پاشش برای شکل‌گیری پاشش بعدی در نظر گرفته شود [۱۵]. به منظور ساده‌سازی مشخصه‌های این متغیر، یک متغیر زمانی به عنوان زمان بین انتهای پاشش و شروع تحریک تعریف می‌شود که این متغیر برای زینه‌بندی موتور مهم بوده و اثر تأخیر هیدرولیکی را خنثی می‌کند [۱۶]. به این ترتیب، مدت زمان پاشش نسبت به مدت زمان‌های مختلف تحریک شیر برقی در شکل ۱۰ آمده است.

مقدار تأخیر در هر فشار تقریباً مقدار ثابتی است. مقدار متوسط ضریب تأخیر برای فشارهای ۱۶۰۰، ۱۳۰۰، ۱۰۰۰ و ۸۰۰ بار به ترتیب ۱،۷۷، ۱،۷۵، ۱،۶۶ و ۱،۳۵ است که با قرار دادن مدت زمان تحریک شیر برقی در هر یک از معادلات به‌دست آمده در فشارهای پاشش مختلف (معادلات در شکل ۱۰ مشخص شده‌اند) می‌توان زمان واقعی باز بودن افشانه را محاسبه نمود.

1. Duration of Injection
2. Electric pulse

۴- نتیجه گیری

- با افزایش فشار پاشش نوسانات فشار در مسیر ورودی به افشانه و تاخیر در بسته شدن افشانه بیشتر می شود.
- با افزایش فشار سوخت به دلیل تراکم سوخت، چگالی سوخت افزایش می یابد و در نهایت منجر به انتشار سریعتر نوسانات فشار در مسیرهای فشار قوی سوخت می شود.
- با افزایش فشار پاشش مقدار تأخیر در بسته شدن افشانه بیشتر می شود.
- با افزایش فشار مقدار جرم پاشیده شده سوخت و همچنین شیب آن نیز افزایش می یابد. افزایش شیب به دلیل تأخیری است که در زمان بسته شدن سوزن و قطع پاشش ایجاد می شود.
- زمان واقعی پاشش با استفاده از معادله های استخراج شده بر اساس زمان تحریک قابل محاسبه است.
- با تغییر فشار سوخت موقعیت میله مهراکننده تغییر می کند و باعث تغییر در نحوه حرکت میله مهراکننده می شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) اعلام می دارند.

فهرست علائم

A_o	سطح مقطع گلوگاه، mm^2
u_B	سرعت سیال، m/s
C_d	ضریب تخلیه
\dot{m}_f	نرخ جریان جرمی، kg/s
P_i	فشار پاشش سوخت، bar
P_b	فشار تخلیه سوخت، bar
P_v	فشار بخار سوخت، bar
D_o	قطر خروجی افشانه، mm
CN	عدد حفزه زایی
SE	شروع تحریک
SI	شروع پاشش
EI	پایان پاشش
ms	میلی ثانیه
μs	میکروثانیه

علائم یونانی

ρ_f	چگالی سوخت، kg/m^3
v_f	گرانروی حرکتی سوخت، cSt
λ	عدد جریان

مراجع و منابع

- [1] K. Reif, Diesel engine management. Springer, Berlin. (2014).
- [2] K. Hummel, F. Boecking, J. Grob, J-O. Stein, U. Dohle, Third-generation common rail system with piezo inline injectors from Bosch for passenger cars. MTZ Worldw 65(3):9-12, (2004).
- [3] J. Kim, J. Lee, K. Kim, Numerical study on the effects of fuel viscosity and density on the injection rate performance of a solenoid diesel injector based on AMESim. Fuel, 256(2019).
- [4] M. Mohebbi, A. Abdul Aziz, A. Hamidi, A. Hajjalimohammadi, V. Hosseini, Modeling of pressure line behavior of a common rail diesel engine due to injection and fuel variation. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. (2017) 39:661-669.
- [5] F. Salvador, A. Plazas, J. Gimeno, M. Carreres, Complete modelling of a piezo actuator last generation injector for diesel injection systems. International Journal of Engine Research. Vol 15(1) 3-19. (2014).
- [6] X. Xia, K. Xu, Y. Liu, M. Liu, Sh. Wang, Co-Simulation Modeling of High-Pressure Fuel System and Engine Performance System and Control System in Common Rail Diesel Engine. Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Berlin.
- [7] F. Boudy, P. Seers, Impact of physical properties of biodiesel on the injection process in a common-rail direct injection system. Energy Convers Manag 50:2905-2912(2009).
- [8] X.L.J Seykens, L.M.T. Somers, R.S.G. Baert, Detailed modeling of common rail fuel injection process. MECCA, 3(2-3), (2005) 30-39.
- [9] M. Ziejewski, H.J. Goettler, Discharge coefficients for multi-hole fuel injection nozzle for alternative fuels, SAE International, SAE paper 890448.
- [10] M. Coppo, C. Dongiovanni, C. Negri, Numerical analysis and experimental investigation of a common rail type diesel injector. In: ASME 2002 internal combustion engine division fall technical conference: American Society of Mechanical Engineers, (2002) pp 271-80.
- [11] K. Ahlin, Modelling of pressure waves in the common rail diesel injection system. Linköpings Universitet, SE, (2000) 581, 83.
- [12] J. Gullaksen, Simulation of diesel fuel injection dynamics using MATLAB. Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition Tampa, Florida USA October 25-28, (2004).
- [13] M. Baratta, AE. Catania, A. Ferrari A, Hydraulic circuit design rules to remove the dependence of the injected fuel amount on dwell time in multi jet CR systems. J Fluids Eng 130(12):121104, (2008).

- [14] A. Hajialimohammadi, D. Honnery, A. Abdullah, MA. Mirsalim, Time resolved characteristics of gaseous jet injected by a group-hole nozzle. Fuel 113:497-505. (2013).
- [15] A. Plazas, Modelado unidimensional de inyectoros common-rail diesel. PhD Thesis, Universitat Politècnica de València (UPV), Valencia, 2005.
- [16] R. Payri, J. imeno, R. Novella, G. Bracho, On the rate of injection modeling applied to direct injection compression ignition engines. International Journal of Engine Research. Vol 17. 1015-1030. (2016).



Numerical and experimental investigation of common rail fuel injection system and evaluating influence of fuel pressure on injection characteristics and pressure fluctuations

R. Hematian¹, J. Massah^{2*}, S.R. Hassan-Beygi³, A. Hajiali Mohammadi⁴

¹ PhD Candidate, Department of Agro-Technology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran, r.hematian@ut.ac.ir

² Associate Professor, Department of Agro-Technology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran, jmassah@ut.ac.ir

³ Professor, Department of Agro-Technology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran, rhbeigi@ut.ac.ir

⁴ Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran, ahajiali@semnan.ac.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 March 2020

Accepted: 21 July 2020

Keywords:

Pressure Fluctuations

Fuel Pressure

Simulation

Fuel Injection System

ABSTRACT

The combustion processes, engine performance, fuel consumption, exhaust-gas composition, and combustion noise in the diesel engine are closely linked to appropriate mixture of air-fuel in combustion chamber. The fuel-injection parameters such as injection start point, discharge rate curve, injection time and injection pressure are defined by the quality of the mixture formation. The numerical modeling is the common method of investigation of fuel pressure and its effects on the injection quantity in the fuel system. In this study, one-dimensional common rail fuel injection system was simulated in AMEsim software. The simulation results illustrated that the higher injection pressure can lead to higher pressure fluctuations. Because of compressibility of fuel, its density increased with the increase of pressure, resulting in faster propagation of distribution in the whole high pressure tubes. The delay in closing the throat and moving the needle downwards, moreover, led to the difference between Injection time and solenoid stimulation in different pressures. Closing delay, also, increased with increasing pressure.

