



مطالعه عددی اثر محیط متخلخل بر ویژگی‌های فواره فشار قوی سوخت دیزل

ایمان سهرابی اصل^{۱*}، مفید گرجی بندی^۲، علیرضا حاجی علی محمدی^۳، سید مصطفی آقا میرسلیم^۴

^۱ دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران sohrabiasl@stu.nit.ac.ir

^۲ دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران gorji@nit.ac.ir

^۳ دانشگاه سمنان، سمنان، ایران ahajjali@semnan.ac.ir

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

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۳ شهریور ۱۳۹۵

پذیرش: ۸ تیر ۱۳۹۶

کلیدواژه‌ها:

فواره سوخت دیزل

محیط متخلخل

افت فشار

ضرایب افت گرانروی و لختی

چکیده

در دهه اخیر ابتکار استفاده از محیط متخلخل در موتورهای احتراق داخلی برای همگن کردن فرایند احتراق و کاهش سطح آلایندگی این موتورها، ارائه شده است. هدف از این پژوهش، بررسی ویژگی‌های کلان فواره سوخت دیزل در اثر برهم کنش با محیط متخلخل است. مقدار نفوذ فواره در دو حالت فواره آزاد و با حضور محیط متخلخل درون یک محفظه حجم ثابت و در فشارهای مختلف محفظه، با روش عددی بدست آمد و با نتایج تجربی موجود در ادبیات فن مقایسه شده است. برای پیش بینی افت فشار فواره در محیط متخلخل، چهار معادله تجربی برای بدست آوردن ضرایب افت گرانروی و افت لختی مورد مقایسه قرار گرفتند و بر اساس نتایج تجربی عمق نفوذ فواره، دقیق ترین معادله معرفی می‌گردد. نتایج عددی بخوبی عمق نفوذ فواره را پس از گذر از محیط متخلخل پیش بینی می‌کند. اگرچه این معادله‌ها برای سیال آب در جریان‌های سرعت کند توسعه یافته بودند ولی نتایج نشان می‌دهند که این معادله‌ها می‌توانند در جریان‌های تند نیز استفاده شوند و دامنه کاربرد آنها گسترش یافته است.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



۱- مقدمه

مشعل‌های با سوخت مایع و گازی بخوبی استفاده شده است. هدف اولیه از استفاده از این محیط افزایش پخش (توزیع) فواره سوخت فشار قوی بخوبی فرایند تبخیر، برای رسیدن به مخلوط همگن است. این فناوری اولین بار در سال ۲۰۰۱ توسط درست و وکلاس [۸-۹] ارائه شده است. آنها عملکرد محیط متخلخل را روی یک موتور دیزل تک استوانه هوا خنک و بدون استفاده از واکنشگر، بررسی کردند. محیط متخلخل استفاده شده از جنس سیلیکون کاربید بود که در بستار و بین دریچه‌های ورودی و خروجی قرار گرفته بود (شکل ۱). نتایج آنها نشان می‌داد که دمای میانگین استوانه از حدود ۲۲۰۰ کلوین در حالت کارکرد عادی به ۱۵۰۰ کلوین با وجود محیط متخلخل افت کرد و در حین احتراق نیز تغییر قابل توجهی نمی‌کرد. همچنین مقدار آلاینده‌های موتور نزدیک به صفر بود.



شکل ۱: جانمایی محیط متخلخل در بستار موتور دیزل [۹]

در سال ۲۰۰۸ خی و زاوو [۱۰] احتراق در یک موتور اشتعال تراکی را با حضور یک محیط متخلخل در بستار موتور، با استفاده از برنامه کیوا شبیه‌سازی کردند.

در سال ۲۰۱۰ وکلاس و سایپریس [۱۱] مفهوم افشانه توزیع^۵ را به صورت تجربی بر اساس سامانه پاشش دیزل مطالعه کردند. آنها از یک سامانه چند راهه مشترک برای پاشش و از یک ماده متخلخل (به شکل حلقه) به عنوان پخش کننده استفاده کردند. نتایج آنها نشان می‌داد که برخورد فواره با محیط متخلخل، سبب پخش فواره می‌شود.

در سال ۲۰۱۴ شاهنگیان و هونری [۱۲] با قرار دادن یک ماده متخلخل از جنس سیلیکات کاربید در پایین دست فواره، تلاش کردند تا اثر شرایط فشار و دمای واقعی موتور را بر مشخصه‌های فواره بعد از برهم‌کنش با مواد کفسان سفالی را، بررسی کنند.

موتورهای دیزل به دلیل بازدهی بهتر نسبت به موتورهای بنزینی به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مؤلفه‌های اساسی و تأثیرگذار بر بازدهی و آلاینده‌ی موتورهای دیزل، فواره سوخت در شرایط غیر واکنشی^۱ است. رفتار متفاوت فواره سوخت در شرایط مختلف بر فرآیند ریز سازی^۲ و تجزیه فواره^۳ سوخت و سطح اختلاط سوخت و هوا، تأثیر می‌گذارد. لذا، شناخت رفتار فواره سوخت مورد استفاده در موتورهای دیزل در شرایط تزریق و محیطی متفاوت در محفظه احتراق، مسئله‌ای ضروری در راستای افزایش بازدهی و کاهش آلاینده‌ی موتورهای دیزل قلمداد می‌شود.

با توسعه روش‌های نوری و امکان استفاده از دوربین‌های عکس برداری سریع، از اواخر دهه نود میلادی تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه بررسی فواره‌های دیزل از نظر خواص کلان و خرد انجام شده است.

وانگ و همکاران [۱] ویژگی‌های سوخت دیزل معمولی و زیست دیزل^۴ را به روش‌های تحلیلی و تجربی مطالعه کردند. آنها متغیرهای طول نفوذ، زاویه فواره، تأخیر در پاشش و قطر ریز قطره‌ها را تحت فشارهای پاشش ۳۰۰۰ بار در یک محفظه حجم ثابت بررسی کردند.

کاستاس و هونری [۲] معادلات تجربی مرتبط با نفوذ فواره در آزمایش‌های خود و استخراج روابط سرعت جبهه فواره بر اساس همان معادلات تجربی را بررسی کردند.

مشکل اصلی در موتورهای احتراق داخلی تشکیل مخلوط سوخت و هوای ناهمگن است که سبب آزاد شدن غیر یکنواخت گرما در محفظه احتراق و ایجاد گرادیان‌های بزرگ در توزیع دما و تولید آلاینده‌ها می‌شود. یکی از مشخصه‌های موتورهای احتراق داخلی آینده، مقدار آلاینده‌ی بسیار کم یا نزدیک به صفر به همراه کمترین مقدار مصرف سوخت در تمام شرایط عملکردی موتور است. این هدف با یکنواخت و همگن کردن احتراق امکان پذیر است.

روش‌های گوناگونی مانند پاشش سوخت پرفشار با پایش برقی، زمان بندی متغیر دریچه‌ها، استفاده از گازهای برگشتی، تغییر هندسه راهگاه‌های ورودی و تاج سمبه برای دستیابی به این هدف استفاده شده است [۳-۵]. اما ترکیبی از این روش‌ها هم نمی‌تواند مشکل آلاینده‌ی موتورهای احتراق داخلی را در تمام شرایط عملکردی موتور (بار و دور) حل کند. موتورهای اشتعال تراکی احتراق همگن، پیشنهاد گردید ولی متأسفانه مشکلاتی در ارتباط با پایش و زمان آزاد شدن گرما و همچنین تولید سر و صدا در این موتورها وجود دارد [۶-۷].

در دهه اخیر ایده استفاده از محیط متخلخل برای همگن کردن مخلوط سوخت و هوا و همچنین احتراق و کاهش تولید آلاینده‌ها در موتورهای احتراق داخلی مطرح شده است. استفاده از ویژگی‌های خاص ماده متخلخل برای افزایش نرخ اختلاط سوخت و هوا و بازدهی حرارتی در

⁴ Bio Diesel

⁵ Distribution Nozzle

¹ Non-reacting

² Atomization

³ Spray Breakup

سرعت‌های کند برای جریان آب یا هوا (اعداد رینولدز کوچک) بدست آمده است.

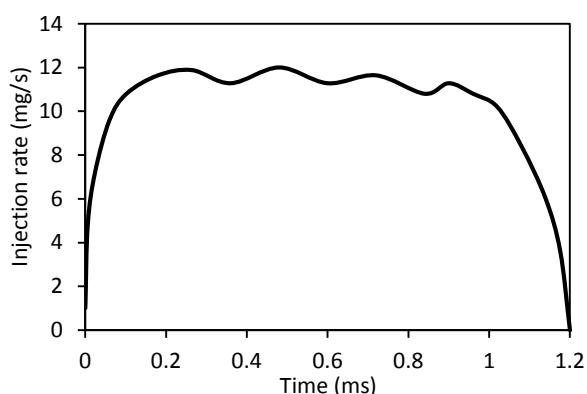
در این مقاله، مقدار نفوذ فواره سوخت دیزل به صورت آزاد و همچنین با حضور محیط متخلخل به صورت عددی بررسی شده است. همچنین برای اولین بار با توجه به بزرگ بودن عدد رینولدز فواره هنگام عبور از روزنه‌های محیط متخلخل، ضرایب افت گرانشی و لختی معادله فرچیمر، با مقایسه نتایج چهار معادله تجربی مختلف، بخوبی تخمین زده می‌شود و قابلیت کاربرد این معادله‌ها در رینولدزهای بزرگ تأیید می‌گردد.

۳- شبیه‌سازی

۳-۱- فواره آزاد

با توجه به اینکه دقت الگوهای موجود برای پیش بینی شکست فواره، برهم کنش ریز قطرها و آشفستگی در نرم افزار فایر^۶، بخوبی برای شبیه‌سازی رفتار فواره سوخت توسط محققان زیادی اثبات شده است، از این نرم افزار برای حل عددی استفاده می‌شود. از الگوی آشفستگی کی-ایسیلون^{۱۱} در حل معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس^{۱۱} استفاده شده است. الگوهای شکست اولیه و ثانویه^{۱۲} قطرات بترتیب الگوی حباب و موج^{۱۳} و همچنین الگوی برخورد بین قطره‌های اُرورک^{۱۴} با توجه به دقت خوب و کاربرد زیاد این الگوها توسط پژوهشگران [۱، ۵، ۱۰]، در شبیه‌سازی استفاده شده است.

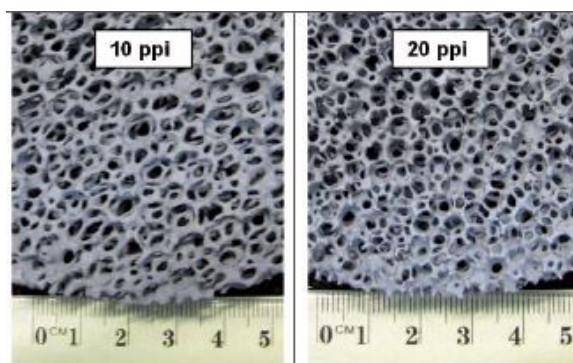
در نظر گرفتن نحوه باز شدن سوزن افشانه روی فواره، تأثیر مهمی روی نتایج عددی می‌گذارد، بنابراین بر اساس مطالعه پیکت و همکاران [۱۷] و با توجه به مشخص بودن جرم سوخت تزریقی (۱۲ میلی گرم) و طول مدت پاشش (۱،۲ میلی ثانیه) از الگوی نرخ پاشش شکل ۳ برای شبیه‌سازی استفاده می‌گردد.



شکل ۳: نرخ پاشش استفاده شده برای افشانه با فشار پاشش ۱۰۰۰ بار

در سال ۲۰۱۶ چیدمیرام و تولاسی [۱۳] با قرار دادن محیطی متخلخل منظم در بستار موتور تک استوانه دیزلی، ویژگی‌های عملکردی و سطح آلاینده‌ی موتور را بررسی کردند. نتایج آنها نشان دادند تولید آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن، دوده، بازده حرارتی و فشار داخل استوانه موتور، کاهش می‌یابد.

مواد متخلخل به صورت گسترده در کاربری‌های صنعتی مانند خنک کاری قطعات الکترونیکی، جذب انرژی حرارتی، سامانه‌های زمین گرمایی و موارد دیگر استفاده می‌شود. آنها می‌توانند به شکل‌های بستر فشرده^۶، مواد کلوخه شده^۷ و مواد حباب دار (کفسان) باشند. انتقال حرارت و افت فشار در مواد متخلخل (شکل ۲) به مانند دیگر شکل‌های مواد متخلخل مورد مطالعه گسترده قرار نگرفته است. بنابراین داده‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی در مورد آنها نسبتاً کمتر است. از طرف دیگر استفاده از داده‌ها و معادلات بسترهای فشرده و کلوخه‌ای برای پیش بینی انتقال حرارت و افت فشار مواد کفسان^۸ مانند نامناسب است زیرا ساختار داخلی آنها کاملاً متفاوت است.



شکل ۲: ماده متخلخل سفالی با چگالی ۱۰ و ۲۰ روزنه بر اینچ خطی (ppi)

ریچاردسون و همکاران [۱۴] به صورت تجربی افت فشار برای مواد کفسان سفالی را اندازه‌گیری کرده‌اند. همچنین آنها معادلاتی را برای تخمین افت فشار در مواد کفسان با چگالی‌های مختلف بدست آورده‌اند. موریرا و همکاران [۱۵] اثر متغیرهای ساختاری مانند درصد تخلخل مؤثر، قطر روزنه‌ها و مساحت سطح در پیش بینی ضریب نفوذ بر اساس روش‌های موجود در ادبیات فن بررسی می‌کنند.

بومسما و پولیکاکاس [۱۶] در سال ۲۰۰۲، اثر متراکم کردن موارد کفسان آلومینیومی را بر مقدار افت فشار سیال عبوری به صورت تجربی بررسی کردند. آنها برای بدست آوردن ضرایب نفوذپذیری و حالت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی افت فشار در واحد طول استفاده کردند. این نکته قابل اشاره است که در این مقالات، مقدار افت فشار در

¹¹ Reynolds Average Navier-Stokes (RANS)

¹² Primary and Secondary Break up Models

¹³ Blob and Wave Models

¹⁴ O'Rourke Model

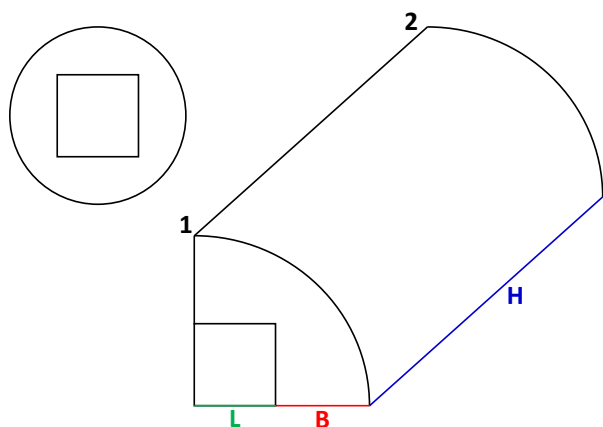
⁶ packed beds

⁷ sintered materials

⁸ Foam

⁹ AVL FIRE

¹⁰ k-ε



شکل ۵: نمایی از شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی

از این رو شبکه ۳ به عنوان شبکه بهینه و پایه برای شبیه‌سازی‌ها انتخاب می‌شود.

جدول ۱: ویژگی‌های شبکه‌های مختلف برای مطالعه استقلال

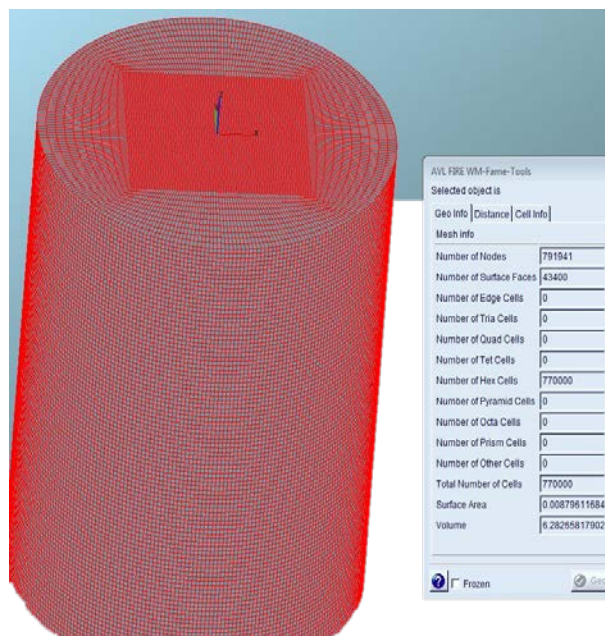
شبکه	تعداد بخش	تعداد خانه			مقدار (mm)	نفوذ
		H	B	L		
۱	۱۵	۵۰	۵	۱۵	۳۸,۶۲۲	۷۵,۰۰۰
۲	۲۵	۱۰۰	۱۰	۲۵	۳۹,۶۵۳	۴۵,۰۰۰
۳	۳۵	۱۰۰	۱۰	۳۵	۴۰,۶۸	۷۷۰,۰۰۰
۴	۴۵	۱۵۰	۱۰	۴۵	۴۱,۱۷۲	۱,۷۵۵,۰۰۰

در آزمایش‌های مرجع [۱۲] سوخت دیزل با فشار ۱۰۰۰ بار با افشانه‌ای تک سوراخ با قطر نازل ۲۰۰ میکرومتر، به داخل محفظه حجم ثابت، تزریق می‌گردد. فشار هوای داخل محفظه در سه حالت مختلف ۱، ۱۰ و ۵۰ بار و در دمای محیط (۲۹۸ کلوین) بررسی شد (جدول ۲). آنها همچنین با قرار دادن یک ماده متخلخل از جنس سیلیکات کاربرد در پایین دست فواره، تلاش کردند تا اثر شرایط فشاری و دمای واقعی موتور را بر مشخصه‌های فواره بعد از برهمکنش با ماده متخلخل سفالی، بررسی کنند.

جدول ۲: شرایط آزمایش‌های انجام شده در مرجع [۱۲]

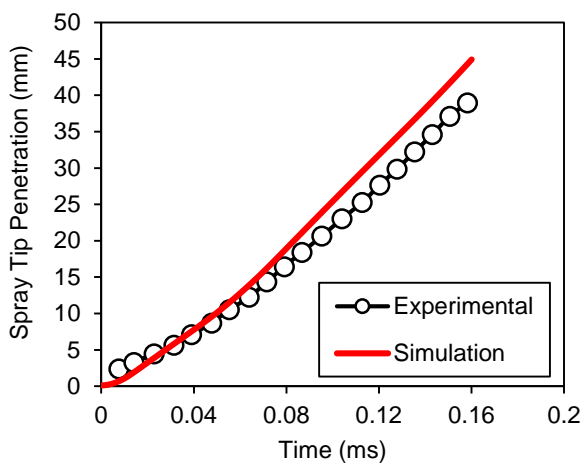
۱۰۰۰	فشار پاشش (بار)
۵۰، ۱۰، ۱	فشار محیط (بار)
۱، ۲	مدت زمان پاشش (میلی ثانیه)
۱۲	جرم سوخت تزریق شده (میلی گرم)
۲۰۰	قطر روزنه افشانه (میکرو متر)
۰، ۸	ضریب تخلیه افشانه
۱۱	فاصله محیط متخلخل از افشانه (میلی متر)
۱۴	ضخامت محیط متخلخل (میلی متر)
۱۰	چگالی روزنه محیط متخلخل (روزنه بر اینچ)

در شبیه‌سازی فواره، میدان حل یک استوانه به ارتفاع ۵ سانتی‌متر و قطر ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که مرکز آن یک مکعب به ضلع ۲ سانتی‌متر است (شکل ۴). افشانه در مرکز میدان حل قرار می‌گیرد. بخش مرکزی این استوانه به صورت سازمان یافته شبکه‌بندی می‌شود به طوری که در نواحی نزدیک به محور نازل و در نواحی نزدیک به سوراخ خروجی افشانه به دلیل سرعت تند فواره سوخت، شبکه به مقدار بیشتری ریز شده است. شبکه مورد نظر اولیه پس از تطابق با نتایج آزمایشگاهی، با شبکه‌های درشت تر و ریزتر نیز بررسی می‌شود تا استقلال از شبکه نتایج، بررسی شوند. معیار همگرایی برای هر حل، رسیدن مقدار باقیمانده‌ها برای مقدار فشار و سرعت میدان جریان به کمتر از ۰،۰۱ است. در نهایت شبکه بهینه به دست آمده است که ریزتر کردن شبکه بیش از آن، تأثیری در نتایج به دست آمده، نداشته باشد. در شبکه‌بندی بهینه، کوچکترین خانه، مکعب مستطیلی به ابعاد ۰،۳×۰،۳×۰،۵ میلی متر است. تعداد کل خانه‌ها در این شبکه، ۷۷۰،۰۰۰ خانه است.

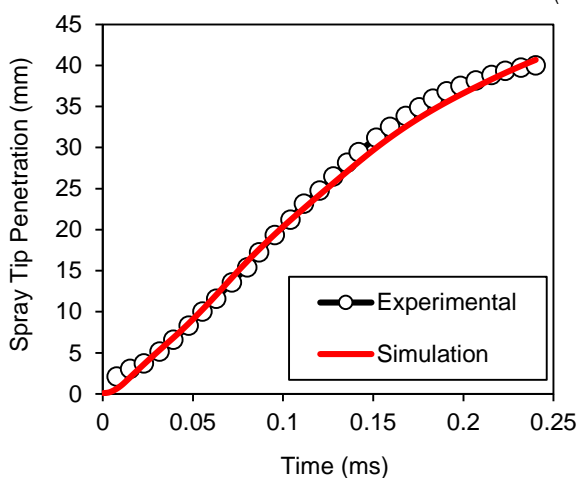


شکل ۴: شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی فواره دیزل

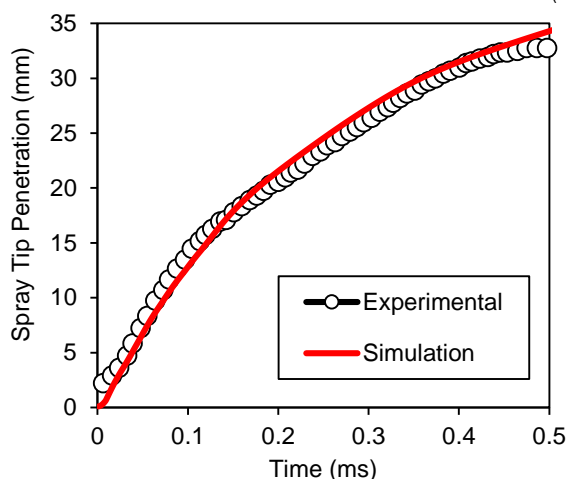
برای مطالعه استقلال از شبکه نتایج شبیه‌سازی، چهار شبکه با تعداد خانه‌های متفاوت مطابق با جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۵ نحوه تقسیم بندی خانه‌های شبکه نشان داده شده است. اندازه طول L، B و H بترتیب برابر با ۱، ۱ و ۵ سانتی‌متر است. برای دستیابی به این هدف، تحلیل حساسیت شبکه‌بندی بر روی طول نفوذ فواره برای سوخت دیزل در فشار تزریق ۱۰۰۰ بار و در فشار محفظه ۱۰ بار، مطابق شکل ۶ انجام شده است. بر مبنای جدول ۱، شبکه ۳ وضوح قابل قبولی در برابر با شبکه‌بندی ریزتر (شبکه ۴) برخوردار هست ولی از لحاظ زمان محاسباتی، حدود نصف شبکه ۴، زمان می‌برد.



(الف)



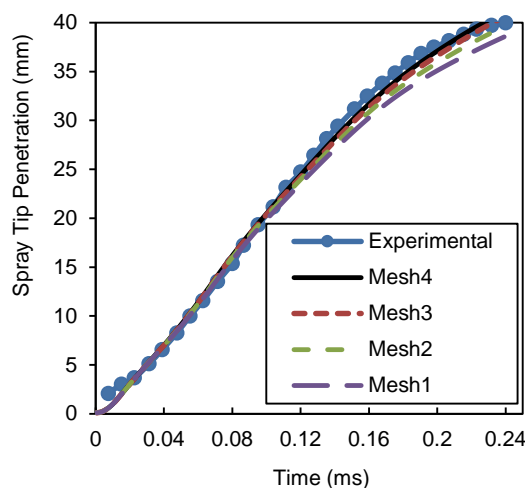
(ب)



(ج)

شکل ۷: مقایسه نتایج تجربی [۱۲] و شبیه‌سازی نفوذ فواره در فشارهای مختلف محفظه (الف) ۱ بار، (ب) ۱۰ بار، (ج) ۵۰ بار

عبارت (S_i) ، مقاومت ایجاد شده توسط محیط متخلخل در مسیر جریان را نشان می‌دهد که توسط الگوهای مختلف در برنامه فایر، به صورت کاهش فشار در جریان عبوری از محیط متخلخل، استفاده می‌شود. این



شکل ۶: آزمون استقلال از شبکه برای طول نفوذ فواره در فشار پاشش ۱۰۰۰ بار

از این رو در کار حاضر، ابتدا از داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۱۲] در حالت پاشش سوخت درون محفظه حجم ثابت بدون حضور محیط متخلخل (فواره آزاد)، برای اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی فواره استفاده می‌گردد. سپس در مرحله دوم از نتایج آزمایشگاهی با حضور محیط متخلخل برای صحت‌گذاری نتایج نفوذ فواره بعد از عبور از ماده متخلخل در پس فشارهای مختلف محفظه، استفاده می‌شود.

در شکل‌های ۷ و ۸ نتایج عددی طول نفوذ و زاویه فواره با داده‌های تجربی در فشارهای ۱، ۱۰ و ۵۰ بار محفظه بترتیب مقایسه شده است. ضمن مشاهده دقت نتایج عددی مشخص است که با افزایش فشار محفظه، مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا فواره به دیواره برسد.

۳-۲ شبیه‌سازی فواره با حضور محیط متخلخل

برای بررسی اثرات محیط متخلخل در مسیر حرکت فواره از قسمت تخلخل‌پذیری^{۱۵} برنامه فایر استفاده می‌گردد.

با استفاده از قابلیت تخلخل‌پذیری، می‌توان خانه‌های حجمی یا نواحی سطحی برای شبیه‌سازی محیط متخلخل تعریف کرد. با محیط متخلخل درون یک ناحیه از جریان، به صورت مقاومت جریانی که به طور تجربی بدست آمده است، برخورد می‌شود. به عبارت دیگر به صورت اضافه کردن یک متغیر چاه در معادله اندازه حرکت^{۱۶} بیان می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_i \quad (1)$$

¹⁶ Momentum Sink

¹⁵ Porosity Module

برای تخمین افت فشار جریان در محیط متخلخل از الگوی فرچایمر^{۱۹} استفاده شده است. در سال ۱۸۵۶ هنری داری^{۲۰} یک روش بسیار ساده برای تخمین افت فشار درون محیط متخلخل پیشنهاد کرد. او فرض کرد که یک معادله خطی بین گرادیان افت فشار با سرعت ظاهری سیال وجود دارد.

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = -\frac{\mu}{K} \cdot u \quad (۳)$$

که K ضریب نفوذ پذیری محیط متخلخل است.

برای تطابق بیشتر با نتایج آزمایشگاهی، در سال ۱۹۰۱ روشی دقیق‌تری توسط فرچایمر^{۲۱} پیشنهاد شد که نشان می‌داد که افت فشار علاوه بر عبارت خطی (افت گرانیوی) با توان دوم سرعت (افت لختی) نیز ارتباط دارد [۱۴-۱۶]:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -\alpha_i \cdot \mu \cdot w_i - \frac{1}{2} (\zeta_i \cdot \rho \cdot w_{mag} \cdot w_i) \quad (۴)$$

جایی که α_i ضریب افت گرانیوی^{۲۲}، ζ_i ضریب مقاومت لختی^{۲۳} و w_i سرعت محلی است. البته این معادله به صورت‌های ظاهری مختلفی توسط پژوهشگران استفاده شده است. در این مطالعه با توجه به دقت خوب و گستره استفاده روش فرچایمر، از این روش در شبیه‌سازی محیط متخلخل استفاده می‌شود.

در منابع [۱۴-۱۶] مقدار افت فشار جریان در مواد کفسان سفالی به طور آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و سپس معادلاتی تجربی پیشنهاد شده است که بتوان ضرایب موجود در معادله فرچایمر را بدست آورد. این معادله‌ها در جریان‌های با عدد رینولدز کوچک و بر اساس ویژگی‌های ساختاری محیط متخلخل بیان شده است.

یکی از معادلات تجربی که مشخصه‌های محیط متخلخل را در بر می‌گیرد و زیاد استفاده می‌شود توسط ارگان [۱۸] پیشنهاد گردید و از جریان درون بسترهای شنی بدست آمد. این معادله شکلی مانند معادله ۴ دارد و به این صورت بیان می‌گردد:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu v}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon) \rho v^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (۵)$$

که ε درصد تخلخل بستر و d_p قطر میانگین ذرات شکل دهنده بستر شنی است.

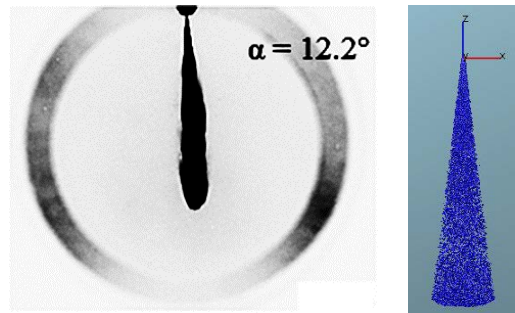
برای محیط‌های متخلخل خانه باز (کفسان^{۲۴}) تعداد بسیار محدودی معادله پیشنهاد شده است. دوپلیسیس و همکاران [۱۹] محیطی تشکیل شده از خانه‌های مکعبی را بررسی کردند و معادله (۶) را پیشنهاد دادند:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{36\tau(\tau-1) \mu v}{\varepsilon^2 d_p^2} + \frac{2.05 \tau(\tau-1) \rho v^2}{\varepsilon^2(3-\tau) d_p} \quad (۶)$$

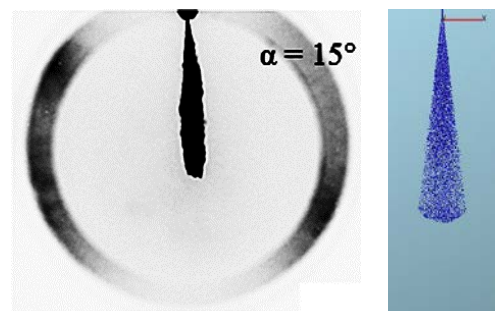
نکته قابل اشاره است که در حلگر فایر سرعت محلی^{۱۷} (w_i) مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرعت ظاهری^{۱۸} (u_i) به صورت نرخ جریان حجمی تقسیم بر سطح مقطع کل (شامل سیال و جامد) است در حالی که سرعت محلی، نرخ جریان حجمی بر سطح مقطع شامل سیال بدست می‌آید. به عبارت دیگر ارتباط این دو سرعت با معادله زیر بیان می‌شود:

$$w_i = \varepsilon \cdot u_i \quad (۲)$$

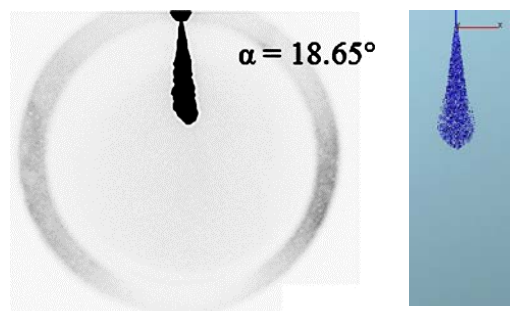
جایی که ε نسبت حجم در دسترس برای جریان در محیط متخلخل به حجم کل اشغال شده شامل جامد و سیال است به عبارت دقیق‌تر همان درصد تخلخل محیط است.



(الف) $\alpha = 12.9^\circ$



(ب) $\alpha = 16.1^\circ$



(ج) $\alpha = 19.5^\circ$

شکل ۸: مقایسه نتایج تجربی [۱۲] و عددی زاویه فواره در فشارهای مختلف محفظه (الف) ۱ بار (ب) ۱۰ بار (ج) ۵۰ بار در زمان ۱۲۰ میکرو ثانیه پس از شروع پاشش

²¹ Forchheimer

²² Viscous Loss Coefficient

²³ Inertial Loss Coefficient

²⁴ Foam

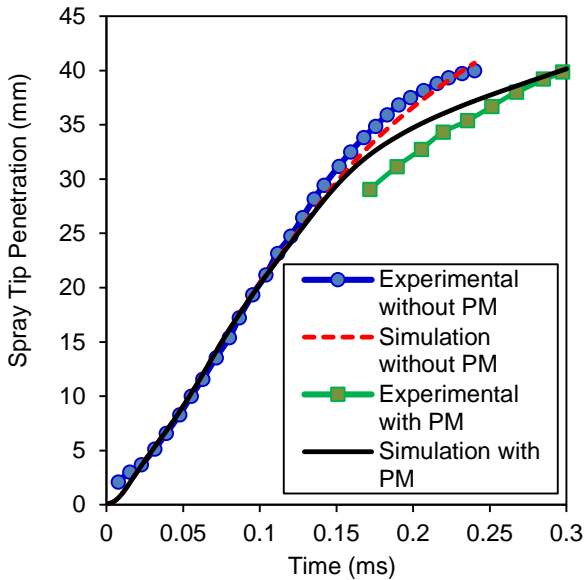
¹⁷ Interstitial Velocity

¹⁸ Superficial Velocity

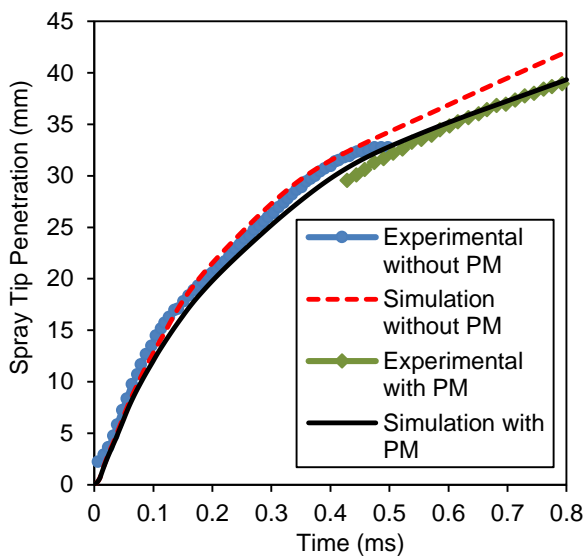
¹⁹ Forchheimer Model

²⁰ Henry Darcy

مقادیر جدول ۳ به طور مستقل در شبیه‌سازی فواره با حضور محیط متخلخل (معادله ۴)، استفاده شد و مشخص گردید که مقادیر ضرایب افت گرانبوی و لختی بدست آمده از معادله ۱۱، عمق نفوذ فواره را بخوبی در مقایسه با داده‌های تجربی پیش بینی می‌کند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).



شکل ۱۰: مقایسه نتایج تجربی و عددی با و بدون حضور محیط متخلخل در فشار ۱۰ بار محفظه



شکل ۱۱: مقایسه نتایج تجربی و عددی نفوذ فواره با حضور محیط متخلخل و بدون آن در فشار محفظه ۵۰ بار

همچنین این تخمین دقیق نشان دهنده این است که این معادله در سرعت‌های بالای لبه فواره (تقریباً ۱۵۰ متر بر ثانیه [۱۲]) هم قابل استفاده است و می‌توان در جریان‌های با رینولدز بزرگ هم به کار برد.

که τ ضریب پیچ و خم^{۲۵} محیط است.

معادله افت فشار دیگری توسط ریچاردسون و همکاران [۱۴] پیشنهاد شده است. آنها محیط متخلخل متشکل از خانه‌های سه بعدی یکنواخت را بررسی کرده‌اند:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\alpha S_v^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu v + \frac{\beta S_v (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho v^2 \quad (7)$$

که α ، β و S_v از معادلات زیر بدست می‌آید:

$$\alpha = 9.73 \times 10^2 d_p^{0.743} (1 - \varepsilon)^{-0.0982} \quad (8)$$

$$\beta = 3.68 \times 10^{-4} d_p^{-0.7523} (1 - \varepsilon)^{0.07158} \quad (9)$$

$$S_v = \frac{12.979 [1 - 0.971 (1 - \varepsilon)^{0.5}]}{d_p (1 - \varepsilon)^{0.5}} \quad (10)$$

که S_v مساحت سطح بر واحد حجم جامد، μ گرانبوی، ρ چگالی سیال هستند.

در ادامه موریرا و همکاران [۱۵] معادله تجربی افت فشار را برحسب ویژگی‌های فیزیکی محیط متخلخل، این طور پیشنهاد کرده است:

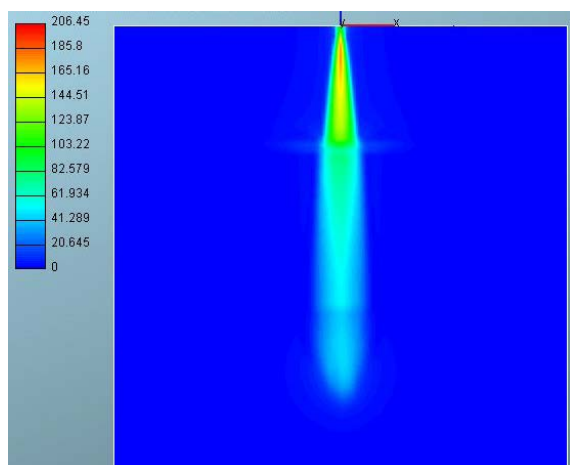
$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{1.36 \times 10^8 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^{0.264}} \mu v + \frac{1.8 \times 10^4 (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p^{-0.24}} \rho v^2 \quad (11)$$

اگرچه بازه سرعت سیال در آزمایش‌های انجام شده برای معادلات قبل (۵-۱۱)، در مقایسه با سرعت فواره دیزل، کمتر است ولی می‌تواند عملکرد و دقت این معادلات در این موضوع خاص مورد ارزیابی قرار بگیرد. از این رو برای پیش بینی ضرایب افت گرانبوی و لختی روش فرچیمر (معادله ۴)، از چهار معادله قبل (۵-۷ و ۱۱) استفاده می‌شود. چگالی روزه و درصد تخلخل ماده متخلخل سفالی استفاده شده در مرجع [۱۲] بترتیب مقادیر ۱۰ و ۰.۸۲ ذکر شده است. مقدار قطر روزه (d_p) برای محیط سفالی با چگالی روزه ۱۰ با استفاده از عکس برداری از برش این محیط‌ها و میانگین گیری از نتایج، ۱.۷ میلی متر بدست آمده است [۱۴]. ضریب پیچ و خم (τ) برای معادله ۶ با استفاده از روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، برای ماده متخلخل سفالی مرجع [۱۲]، مقدار ۱.۷ پیشنهاد شده است [۱۵]. مقادیر بدست آمده از این معادله‌ها در جدول ۳ مقایسه شده است.

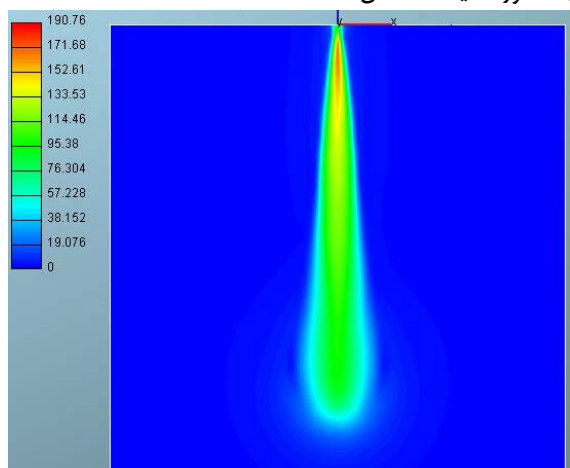
جدول ۳: ضرایب افت گرانبوی (α) و لختی (ζ) معادله (۴)

ζ	α	
۹۹۹	3.8×10^6	ارگان (۵)
۴۸۸۳	2.7×10^7	دوبلیسیس (۶)
۴۰۵	8.1×10^7	ریچاردسون (۷)
۳۷۹۲	5.2×10^7	موریرا (۱۱)

²⁵ Tortuosity



با حضور محیط متخلخل



بدون حضور محیط متخلخل

شکل ۱۲: مقایسه میدان سرعت فواره در فشار ۵۰ بار محفظه در ۰٫۵ میلی ثانیه بعد از شروع پاشش

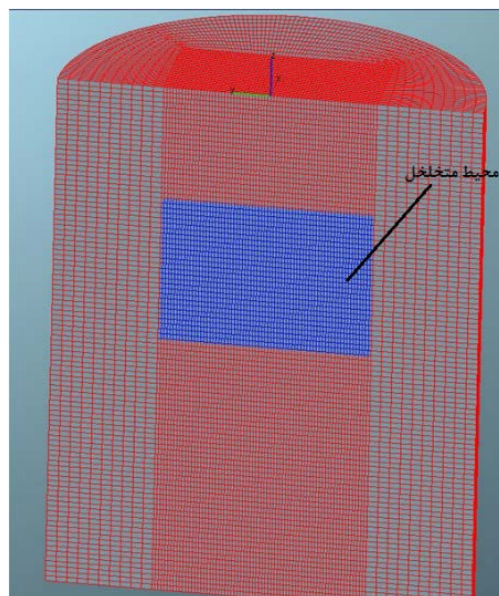
در شکل ۱۳ چگونگی برخورد فواره با محیط متخلخل در فشارهای مختلف محفظه نشان داده شده است. مشاهده می شود که برهمکنش فواره با محیط متخلخل سبب پخش گسترده تر فواره در محیط می شود. این پدیده می تواند کمک بزرگی به اختلاط بهتر سوخت و هوا در موتورهای احتراق داخلی باشد.

نویسندگان ایده استفاده از ماده متخلخل فلزی را بجای کفسان سفالی^{۲۶} برای اختلاط همگن تر، به طور آزمایشگاهی بررسی کرده اند که نتایج آن در [۲۰] ارائه شده است.

۴- نتیجه گیری

با توجه به مطرح شدن ایده استفاده از محیط متخلخل در موتورهای دیزل، برای افزایش نرخ اختلاط سوخت و هوا و کاهش سطح آلاینده‌ها، در این پژوهش به بررسی اثر برهمکنش این محیط بر ویژگی‌های کلان فواره سوخت دیزل پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که طول نفوذ فواره بعد از عبور محیط متخلخل نسبت به حالت فواره آزاد کاهش

از طرف دیگر مقادیر بدست آمده از معادله ۶ که یک معادله کاملاً تحلیلی است به مقادیر بدست آمده از معادله ۱۱ نزدیک است که نشان از دقت خوب این معادله در مقایسه با دو معادله تجربی ۵ و ۷ است. شبکه مورد استفاده در این بخش، همان شبکه بهینه معرفی شده در بخش ۳-۱ است (شبکه ۳). با این تفاوت که در این شبکه مطابق با کار مرجع [۱۲]، مجموعه‌ای از خانه‌ها به عنوان محیط متخلخل انتخاب شده است (شکل ۹). این خانه در ارتفاع ۱۱ میلی‌متر زیر افشانه و با ضخامت ۱۴ میلی‌متر قرار گرفته است.



شکل ۹: نمایی از خانه‌های انتخاب شده به عنوان محیط متخلخل

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقدار نفوذ فواره قبل و بعد از برهم کنش با محیط متخلخل در دو فشار محفظه ۱۰ و ۵۰ بار با نتایج تجربی مقایسه شده است. همان طور مشخص است نفوذ فواره بعد از گذر از محیط متخلخل از نتایج نفوذ فواره آزاد، کمتر می شود که دلیل آن افت فشار ایجاد شده در مسیر فواره هنگام عبور از محیط متخلخل است. با گذشت زمان اختلاف بین نتایج عددی و تجربی بشدت کاهش می یابد. همچنین با افزایش فشار محفظه نفوذ فواره، کاهش کمتری پس از عبور از محیط متخلخل نسبت به حالت آزاد پیدا می کند. در شکل ۱۲ میدان سرعت فواره در حالت آزاد با حالت محیط متخلخل در فشار محفظه ۵۰ بار مقایسه شده است. کاهش سرعت فواره هنگام گذر از محیط متخلخل نسبت به حالت آزاد بخوبی مشاهده می شود.

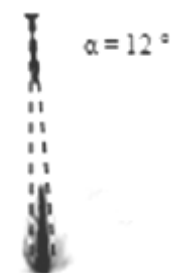
علائم یونانی

α	ضریب افت گرانیروی، $1/m^2$
ζ	ضریب افت لختی، $1/m$
ε	درصد تخلخل
μ	گرانروی دینامیکی، $N.s/m^2$
ρ	چگالی سیال، kg/m^3
τ	ضریب پیچ و خم محیط متخلخل

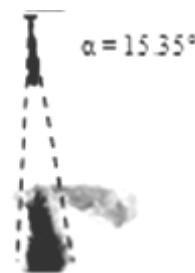
مراجع

- [1] X. Wang, Z. Huang, O.A. Kuti, W. Zhang, K. Nishida, Experimental and analytical study of biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31, pp. 656-666, 2010.
- [2] J. Kostas, D. Honnery, J. Soria, Time resolved measurements of the initial stages of fuel spray penetration, *Fuel*, Vol. 88, pp. 2225-37, 2009.
- [3] W. Liu, Ch. Song, Effect of post injection strategy on regulated exhaust emissions and particulate matter in a HSDI diesel engine. *Fuel*, Vol. 185, pp. 1-9, 2016.
- [4] L.L.F Squaiella, C.A. Martins, P. Lacava, Strategies for emission control in diesel engine to meet Euro VI. *Fuel*, Vol. 104, pp. 183-193, 2013.
- [5] M.H. Shojaefard, I. Sohrabiasl, E. Sarshari, Investigation the effect of inlet ports design on combustion characteristics and emission levels of diesel engines. *International journal of automotive engineering*; Vol. 1, No. 2, 2011.
- [6] R. H. Stanglmaier, C. E. Roberts, Homogeneous charge compression ignition (HCCI): Benefits, compromises, and future engine applications. *SAE Paper*, 1999-01-3682, 1999.
- [7] M. Ghorbanpour, R. Rasekhi, A parametric investigation of HCCI combustion to reduce emissions and improve efficiency using a CFD model approach. *Fuel*, Vol. 106, pp. 157-165, 2013.
- [8] F. Durst, M. Weclas, A new type of internal combustion engine based on the porous medium technology, *Proc Inst Mech Eng*, Vol 215, pp. 63-81, 2001.
- [9] F. Durst, M. Weclas, A new Concept of I.C engine with homogeneous combustion in a porous medium, *The Fifth International Symposium on Diagnostic and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines*, Nagoya, 2001.
- [10] Z. Zhigou, X. Mahozhao, Numerical study on the compression ignition of a porous medium engine, *Springer*, Vol. 51, No.3, pp. 277-287, 2008.
- [11] M. Weclas, J. Cypris, "Distribution-nozzle" concept: a method for Diesel spray distribution in space for charge homogenization by late injection strategy, *23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Brno, Czech Republic, Sep 2010.
- [12] N. shahangian, D. Honnery, J. Ghojel, The Role of Porous Media in Homogenization of High Pressure

می‌یابد. دلیل کاهش نفوذ فواره، افت فشار ایجاد شده به دلیل عبور فواره از محیط متخلخل است. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی مقاله مرجع اعتبارسنجی شده است. برای بدست آوردن ضرایب افت گرانیروی و لختی برای تخمین افت فشار، از معادله‌های تجربی موجود در ادبیات فن که بر اساس ویژگی‌های ساختاری محیط متخلخل بدست آمده است، استفاده گردید. پس از مقایسه خروجی این معادلات بر اساس دقت پیش بینی عمق نفوذ فواره پس از عبور از محیط متخلخل، بهترین معادله معرفی گردید. این نتیجه نشان‌دهنده آن است که این معادله تجربی در جریان‌های با سرعت تند، مانند عبور فواره از محیط متخلخل نیز قابل استفاده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۳: نمایی از برهمکنش فواره با محیط متخلخل در فشارهای مختلف محفظه (الف) ۱ بار (ب) ۱۰ بار (ج) ۵۰ بار [۱۲]

فهرست علائم

d_p	قطر روزنه، mm
k	ضریب نفوذ پذیری، m^2
S_i	افت فشار، Pa/m
S_v	مساحت سطح بر واحد حجم، m^2/m^3
w	سرعت محلی، m/s

flow characteristics of metal foams, *Journal of Fluids Engineering--Transactions of the ASME*, 124, pp. 263-272, 2002.

[17] L. Pickett, J. Manin, R. Payri, M. Bardi, Transient rate of injection effects on spray development, SAE Technical Paper, 2013.

[18] S. Ergun, Flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, 48(2), 1952.

[19] P. Du Plessis, A. Montillet, J. Comiti and J. Legrand, Pressure drop prediction for flow through high porosity metallic foams, *Chemical Engineering Science*, 49(21), pp. 3545-3553, 1994.

[20] I. Sohrabiasl, M. Gorji-Bandpy, A. Haji alimohammadi, 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.

Diesel Fuel Spray Combustion, ASME, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 136, 2014.

[13] K. Chidambaram, V. Thulasi, Two zone modeling of combustion, performance and emission characteristics of a cylinder head porous medium engine with experimental validation, *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, Vol. 12, 2016.

[14] J. T. Richardson, Y. Peng, and D. Remue, Properties of ceramic foam catalyst supports: pressure drop, *Applied Catalysis A: General*, 204, pp. 19-32, 2000.

[15] E.A. Moreira, M.D.M. Innocentini, J.R. Coury, Permeability of ceramic foams to compressible and incompressible flow, *Journal of the European Ceramic Society* 24, pp. 3209-3218, 2004.

[16] K. Boomsma, D. Poulikakos, The effects of compression and pore size variations on the liquid



Numerical study of the characteristics of high pressure diesel spray in interaction with porous media

I. Sohrabiasl^{1*}, M. Gorji-Bandpy², A. Haji Alimohammadi³, M. Mirsalim⁴

¹ Babol University of Technology, Babol, Iran sohrabiasl@stu.nit.ac.ir

² Babol University of Technology, Babol, Iran gorji@nit.ac.ir

³ Semnan University, Semnan, Iran ahajiali@semnan.ac.ir

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

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 September 2016

Accepted: 29 June 2017

Keywords:

Diesel Fuel Spray

Porous Media

Pressure Loss

Viscous and Inertia Loss

Coefficients

ABSTRACT

The idea of using porous media in internal combustion engines is developed to achieve charge homogenization in recent decade. In this paper, the macroscopic characteristics of high pressure diesel spray has been studied in interaction with porous media. Spray penetration length has been obtained numerically in both free spray and porous media (PM) presence in a constant volume chamber under different ambient pressure conditions.

Four empirical correlations in the literature has been compared to predict the spray pressure drop through the PM and obtained the viscous and inertia loss coefficients in the Forchheimer equation and then the most accurate correlation will be introduced based on the experimental results. The numerical results predict correctly the length of the spray penetration after passing through porous media. Although these correlations were developed for water in low Reynolds flows but the result indicates that the correlations can be used in high Reynolds streams and expanded scope of its applications.

