



شبیه‌سازی دقیق فواره کم‌فشار سوخت و آب در موتورهای احتراق داخلی؛ مطالعه عددی و آزمایشگاهی

هادی نظری کیان^۱، علی قاسمیان^{۲*}، حمیدرضا فجری^۳، مهدی نظری چکووری^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، hadi.nazari.kian@gmail.com

^۲ عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، qasemian@iust.ac.ir

^۳ کارشناس اداره کل سوخت و توسعه احتراق، شرکت تحقیق طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، h_fajri@ipco.com

^۴ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، mahdinazari2701@gmail.com

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۴ شهریور ۱۳۹۹

پذیرش: ۲۴ آبان ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

موتورهای احتراق داخلی

شبیه‌سازی فواره

پاشش سوخت، پاشش آب

الگوی شکست

یکی از راه‌حل‌های کاهش آلاینده‌ها و افزایش توان موتور استفاده از پاشش آب در موتورهای احتراق داخلی است. در این نوع از موتورها فواره سوخت و آب نقش مهمی در عملکرد موتور ایفا می‌کنند. در همین راستا هدف مطالعه پیش‌رو شبیه‌سازی دقیق فواره‌های سوخت و آب و ارائه ضرایب بهینه برای رسیدن به بهترین نتایج مدلسازی فواره است. بدین منظور ابتدا ویژگی‌های کلیدی فواره با انجام کار آزمایشگاهی که شامل عکسبرداری از فواره در یک محفظه شیشه‌ای با دوربین پر سرعت و سپس پردازش تصویر است، برای هر دو فواره سوخت و آب استخراج گردیده است. در ادامه شبیه‌سازی دو فواره سوخت و آب به صورت سبب‌مدلی در نرم‌افزار تجاری کنورج به کمک الگوهای فیزیکی مناسب برای تعیین رفتار فواره به طور کامل انجام شده است. تحلیل حساسیت و نتایج شبیه‌سازی فواره بر اساس الگوهای موجود حاکی از آن بود که مهم‌ترین تأثیر در رفتار فواره مربوط به الگوی شکست است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که فواره آب بسیار صلب است و با ایجاد تغییر در متغیرهای پاشش و ضرایب الگوهای فیزیکی، تغییر محسوسی در رفتار آن به وجود نمی‌آید. در نهایت به کمک نتایج تجربی موجود و پس از شناسایی دقیق عوامل مؤثر بر شبیه‌سازی و میزان اثرگذاری آنها، ضرایب بهینه برای الگوهای موجود در شبیه‌سازی فواره سوخت و آب در افشانه‌های کم‌فشار که در موتورهای احتراق داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرند، معرفی گردیده است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

و [۹]. همچنین می‌توان اشاره نمود که طبق نظر محققین مهم‌ترین بخش در شبیه‌سازی فواره انتخاب و تنظیم الگوی شکست^۸ است. مشهورترین الگوی شکست، الگوی KH_RT^{۱۰} است که توسط پیل و ریتز [۱۰] ارائه شده است که در عمده شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است [۱۱]. تحقیقات بسیاری با استفاده از این الگوی شکست روی فواره‌های پرفشار^{۱۱} و کم‌فشار^{۱۲} با سوخت‌های مختلف مانند سوخت دیزل، اتانول و بنزین انجام شده است که هر کدام به تنظیم ثابت‌های این الگوی شکست برای فواره مورد نظر خود پرداخته‌اند. برخی محققین با بررسی تحلیلی اثر هر کدام از ثابت‌ها [۸] و [۱۲]، به تنظیم الگوی شکست پرداخته‌اند و برخی دیگر به صورت عددی و با روش طراحی آزمایش^{۱۳} [۱۳] اثر هر ثابت را مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیق پیش‌رو با توجه به تعریف و اثرگذاری هر ثابت و بنا بر نتایج تعدادی شبیه‌سازی انجام شده، ثابت‌های الگوی شکست برای فواره‌های مورد نظر تنظیم شده‌اند و ثابت‌های بهینه برای آن‌ها ارائه شده‌اند.

هدف از این تحقیق تعیین مقادیر بهینه برای ثابت اثرگذار در الگوهای ارائه شده برای شبیه‌سازی افشانه کم‌فشار با سیال سوخت و آب است. شایان ذکر است تا به حال تحقیقی جدی در راستای شبیه‌سازی پاشش آب با افشانه کم‌فشار انجام نشده است. بدین منظور و در راستای صحت‌گذاری شبیه‌سازی‌های عددی، از نتایج آزمون‌های تجربی روی افشانه‌های مورد نظر استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمون افشانه سوخت موجود بوده اما به دلیل عدم وجود نتایج افشانه آب، آزمون تجربی برای آن طراحی و انجام شده است. در آزمون‌های تجربی، افشانه در محفظه-ای قرار گرفته و تصویربرداری و داده‌برداری از آن انجام شده است. شبیه‌سازی افشانه نیز مشابه شرایط آزمون در نرم‌افزار کانورج^{۱۴} برای هر دو سیال سوخت و آب انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی با توجه به نتایج آزمون صحت‌گذاری شده و اختلاف رفتار افشانه با دو سیال متفاوت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر متغیرهای ورودی و الگوهای فیزیکی بخصوص الگوی شکست نیز مورد تحلیل و بررسی واقع شده است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق آزمون‌های تجربی روی افشانه مورد نظر صورت گرفته است تا نتایج مورد نیاز برای تنظیم و صحت‌گذاری شبیه‌سازی بدست آید. در ادامه به به روش انجام آزمون و شبیه‌سازی برای فواره‌های سوخت و آب پرداخته شده است.

امروزه قوانین سختگیرانه آلاینده‌گی موجب شده است تا محققین بیش از پیش بر روی فرآیند احتراق در موتورهای احتراق داخلی متمرکز شوند و به روش‌های مختلف در پی بهبود بازده احتراق و کاهش آلاینده‌های حاصل از آن باشند. در این راستا، یکی از فناوری‌هایی که امروزه مورد توجه محققین قرار گرفته است استفاده از پاشش آب^۱ به داخل محفظه احتراق و کنترل آلاینده‌ها از این طریق است. پاشش آب با کاهش دمای مخلوط نسوخته می‌تواند تمایل به کوبش^۲ را کاهش دهد و نیز با کاهش دمای احتراق، میزان آلاینده NO_x را کاهش می‌دهد؛ همچنین پاشش آب با بالابردن ظرفیت گرمایی مخلوط، دمای دود را کاهش می‌دهد و از این رو غنی‌سازی^۳ مخلوط می‌تواند کاهش پیدا کند و به تبع آن مصرف سوخت کاهش یابد [۱]-[۳]. یکی از مراحل بسیار مهم در شبیه‌سازی احتراق که اثر قابل توجهی بر انتشار شعله و محصولات احتراق می‌گذارد، موضوع شبیه‌سازی پاشش سوخت است. بنابراین شبیه‌سازی درست سه‌بعدی فواره^۴ سوخت خارج شده از افشانه^۵ می‌تواند کمک شایانی به فرآیند اصلاح و بهینه نمودن مرحله احتراق در موتور نماید. همچنین برای در نظر گرفتن مزایای فناوری پاشش آب نیاز است تا فواره آب نیز به درستی مورد شبیه‌سازی قرار گیرد. شبیه‌سازی فواره -چه سوخت و چه آب- به دلیل تعامل پدیده‌های مختلف فیزیکی از پیچیدگی زیادی برخوردار است که رویکرد شبیه‌سازی در آن بسیار حائز اهمیت است.

در شبیه‌سازی سه‌بعدی فواره مهم‌ترین رویکرد، انتخاب دستگاه مختصات و الگوهای ارائه شده برای پدیده‌های فیزیکی مرتبط با فواره است. همچنین نحوه مدل‌سازی آشفستگی^۶ جریان دارای اهمیت است زیرا انتخاب الگوهای فیزیکی و نیز اندازه شبکه محاسباتی به انتخاب مدل آشفستگی بسیار وابسته است [۴]. تحقیقات بسیاری در مورد شبیه‌سازی فواره‌های سوخت انجام شده است که برخی فواره را بدون رخ دادن تبخیر و برخی دیگر با تبخیر در نظر گرفته‌اند. در نظر گرفتن پدیده تبخیر در فواره باعث می‌شود معیار اندازه شبکه محاسباتی و نیز معیار صحت‌گذاری نتایج متفاوت باشد [۵] و [۶]. در این میان به منظور صحت‌گذاری شبیه‌سازی از نتایج طول نفوذ مایع^۷، قطر میانگین قطرات^۸ و تصویر فواره استفاده می‌شود [۷] و [۸]. نتایج مورد نیاز برای صحت‌گذاری از آزمون‌های صورت گرفته روی افشانه و فواره خروجی از آن استخراج می‌شود. بنابراین با توجه به داده‌های موجود از آزمون افشانه، صحت‌گذاری شبیه‌سازی می‌تواند با روش‌های مختلفی انجام شود که عمدتاً صحت‌گذاری با استفاده از نتایج طول نفوذ مایع انجام می‌شود [۶]

⁸ SMD (sauter mean diameter)

⁹ Break-up model

¹⁰ Kelvin-Helmholtz / Rayleigh-Taylor

¹¹ High-pressure

¹² Low-pressure

¹³ DOE (design of experiment)

¹⁴ CONVERGE CFD software

¹ Water injection

² Knock

³ Enrichment

⁴ Spray

⁵ Injector

⁶ Turbulence

⁷ Liquid penetration length

۱-۲- آزمون افشانه

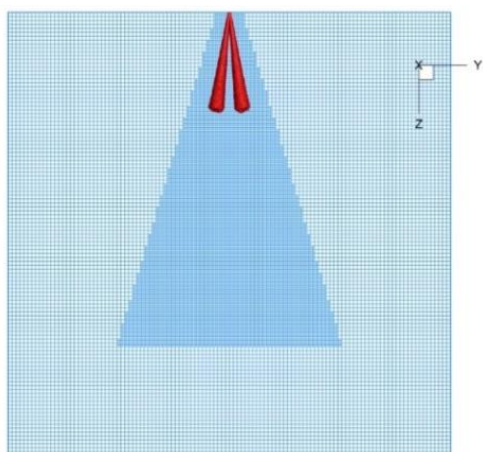
یکی از متغیرهای مختص افشانه، مقطع خروجی و ضریب تخلیه آن است. در این تحقیق اندازه مقطع خروجی نازل مجهول است اما می‌توان با فرض مقداری برای ضریب و با استفاده از روابط حاکم بر افشانه، اندازه مقطع خروجی نازل را بدست آورد. مقطع خروجی نازل‌های افشانه می‌تواند با استفاده از داده‌های آزمون محاسبه شود به طوری که مطابق با رابطه جرم خروجی از یک روزنه (معادله ۱) قابل تعیین است. در این رابطه با تعیین فشار پاشش، مقدار جرم پاشیده شده و مدت پاشش، و با فرض ضریب تخلیه برابر ۰,۹، مقدار قطر نازل برابر با ۲۴۵ میکرومتر تعیین شده است.

$$\dot{m} \propto A C_d \sqrt{\Delta P} \quad (1)$$

که در این رابطه \dot{m} شار جرمی خروجی، A سطح مقطع روزنه، C_d ضریب تخلیه و ΔP اختلاف فشار در دو طرف روزنه است.

۲-۲- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی فواره در نرم افزار کانورج و در محفظه‌ای با حجم ثابت انجام شده است. این محفظه استوانه‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر است. افشانه در مرکز و بالای استوانه قرار گرفته و فضای داخلی استوانه با سیال هوا پر شده است. فواره سوخت در فشار ۳,۵ بار و فواره آب در فشار ۴ بار به عنوان هدف شبیه‌سازی انتخاب شده‌اند. خواص ترمودینامیکی هوا و سیال مورد استفاده در افشانه مطابق شرایط آزمون در شبیه‌سازی لحاظ شده‌اند و در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. شبکه محاسباتی ایجاد شده برای این تحلیل دارای اندازه مبنای ۳,۵ میلی‌متر است و در ناحیه‌هایی که فواره وجود دارد در یک فضای مخروطی شکل، شبکه به اندازه ۲ برابر کوچک شده است که نمای برش خورده آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

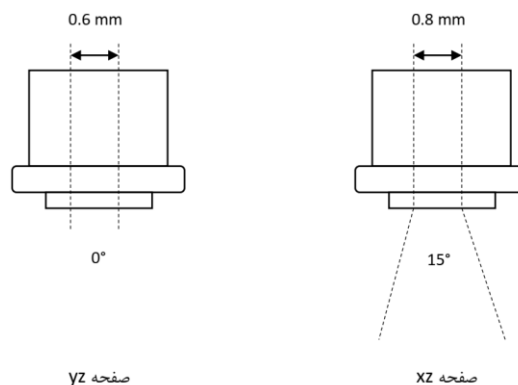


شکل ۲: نمای برش خورده از هندسه شبیه‌سازی و شبکه محاسباتی

روش کلی آزمایش بدینگونه بوده است که به منظور مشاهده و تصویر برداری از سیال پاشیده شده از افشانه، افشانه مورد استفاده درون محفظه‌ای شیشه‌ای قرار گرفته و نورپردازی و سپس تصویربرداری از آن انجام می‌شود. افشانه در قسمت بالای محفظه‌ای شیشه‌ای قرار می‌گیرد و فواره خروجی از آن در محفظه قابل مشاهده است. با استفاده از دوربین پر سرعت و روش تصویربرداری شیلرین^۱، تصویر فواره درون محفظه در هر لحظه بدست آمده است. برای هر دو سیال سوخت و آب تصویربرداری در فشارهای پاشش مختلف صورت گرفته است. در آزمون افشانه سوخت انجام گرفته شده از این-هپتان به جای بنزین استفاده شده است زیرا این مایع از ایمنی و تکرارپذیری بهتری در مقایسه با بنزین برخوردار است و استانداردها نیز آن را توصیه کرده‌اند. در آزمون مربوط به آب نیز با توجه عدم دسترسی به افشانه‌ای مناسب‌تر برای پاشش آب و موجود بودن اطلاعات افشانه مورد استفاده برای سوخت، از همین افشانه برای پاشش آب استفاده شده است. در این آزمون‌ها با استفاده از راه‌انداز الکترونیکی مدت باز بودن افشانه به اندازه مشخصی تعیین می‌شود و سپس مقدار جرم خارج شده از افشانه اندازه‌گیری می‌شود. نحوه تنظیم فشار پاشش در آزمون و جزئیات بیشتر در مورد آن در مرجع [۱۴] ذکر شده است.

۱-۱-۲- مشخصات افشانه

افشانه مورد استفاده، افشانه‌ی سوخت یک موتور پاشش راهگاهی^۲ است. افشانه‌های مورد استفاده در راهگاه موتور از فشار پاششی حدود ۳ تا ۶ بار استفاده می‌کنند. افشانه مورد استفاده دارای چهار نازل^۳ است که در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل این نازل‌ها در صفحه YZ زاویه‌ای نسبت به هم ندارند اما در صفحه XZ نسبت به هم ۱۵ درجه زاویه دارند.



شکل ۱: نمایش هندسی نازل‌های افشانه

³ Nozzle

¹ Schlieren photography

² Port injection

ورودی محاسبات باید اندکی تغییر کند تا مقدار جریان خروجی به درستی تطبیق پیدا کند. با توجه به اهمیت فشار پاشش در افشانه، این متغیر به عنوان خروجی محاسبات تعیین می‌شود و جرم پاشیده شده یا مدت پاشش اندکی می‌تواند تغییر کنند تا فشار پاشش دقیقاً با مقدار مورد نظر برابر شود.

۲-۲-۲- الگوهای فیزیکی

برای شبیه‌سازی‌های فواره که دو فاز سیال (قطرات مایع و محیط گازی) وجود دارد از دیدگاه لاگرانژی-اولری^۲ بهره گرفته می‌شود [۱۶]. در این دیدگاه سیال گازی در مختصات اولری قرار دارد و معادلات حاکم بر آن در این دستگاه مختصات حل می‌شوند. قطرات مایع نیز در مختصات لاگرانژی قرار دارند که به سیال گازی در مختصات اولری وارد می‌شوند. الگوهای بسیاری برای توصیف پدیده‌های فیزیکی که در این محیط رخ می‌دهند ارائه شده‌اند که هر کدام معادلاتی را برای تعامل این دو فاز در نظر می‌گیرند. مهم‌ترین الگوهای فیزیکی که در شبیه‌سازی فواره باید بکار گرفته شوند عبارتند از: الگوی شکست قطرات، الگوی برخورد^۳ قطرات و الگوی تبخیر قطرات. همچنین اندازه و نحوه توزیع قطر قطرات در ابتدای خروج از نازل که دارای اهمیت است در این بخش بررسی می‌شود. همچنین الگوی آشفستگی مورد استفاده و تعامل دیگر الگوها با آن نیز مهم است، که در این شبیه‌سازی از الگوی آشفستگی k-ε RNG استفاده شده است.

۲-۲-۲-۱- نحوه توزیع قطر اولیه قطرات

دستگاه محاسباتی برای حل معادلات شکست و تعامل قطرات با سیال گازی نیازمند شرط اولیه برای قطر قطرات است. این شرط اولیه در ابتدای خروج قطرات از نازل روی آن‌ها اعمال می‌شود. مقدار قطر قطرات می‌تواند بر مبنای داده‌های تجربی و یا بر مبنای الگوهای دیگر باشد، توزیع قطر قطرات نیز می‌تواند یکنواخت یا غیریکنواخت باشد. عموماً چهار روش برای تعیین قطر قطرات و توزیع آن وجود دارد که عبارت‌اند از: روش لکه‌ای^۴ [۱۷]، روش توزیع مربعی^۵، روش توزیع روسین-رامر^۶ و قطر یکنواخت قطرات بر مبنای داده‌های تجربی. در این شبیه‌سازی با توجه به عدم وجود داده‌های تجربی برای قطر قطرات از روش لکه‌ای که روش ساده‌ای است و مبنای مناسبی دارد استفاده شده است. در این روش قطر قطرات در ابتدای خروج از نازل یکنواخت و برابر با قطر نازل فرض می‌شود [۱۵].

۲-۲-۲-۲- الگوی شکست قطرات

قطرات با ورود به محیط گازی در اثر نیروهای مختلف شکسته شده و به قطرات ریزتری تبدیل می‌شوند. انتخاب الگو برای شکست قطرات

جدول ۱: خواص ترمودینامیکی لحاظ شده در شبیه‌سازی

دمای هوا	۲۵ درجه سانتی‌گراد
فشار هوا	۸۸ کیلوپاسکال
دمای سوخت و آب	۲۲ درجه سانتی‌گراد

در ابتدای شبیه‌سازی لازم است بعضی متغیرهای ورودی شبیه‌سازی با محاسبات بی‌بعد بدست آورده شوند، بدین منظور نرم‌افزار قسمتی مجزا برای محاسبات صفربعدی مورد استفاده در شبیه‌سازی افشانه دارد که در ادامه شرح داده می‌شود.

۲-۲-۱- محاسبات صفربعدی

ورودی موردنیاز برای شبیه‌سازی سه‌بعدی فواره، سرعت جریان خروجی از نازل است. با استفاده از معادلات صفربعدی جریان خروجی از یک روزنه، نرخ جریان یا سرعت جریان خروجی از نازل‌ها بدست آورده می‌شود. نرخ جریان خروجی از یک روزنه را می‌توان با معادله ۲ بیان کرد؛ طبق این رابطه برای بدست آوردن مقدار نرخ جریان خروجی باید مقدار فشار پاشش و مقطع خروجی نازل‌های افشانه مشخص باشد. بنابراین با در اختیار داشتن فشار پاشش و مقطع جریان، نرخ جریان خروجی قابل محاسبه است.

$$\dot{q} = A C_d \sqrt{\Delta P / \rho} \quad (2)$$

که در این رابطه \dot{q} شار حجمی خروجی و ρ چگالی سیال است و مابقی متغیرها در معادله ۱ تعریف شده‌اند.

با ثابت بودن مقطع جریان (با در نظر گرفتن قطر نازل‌ها و ضریب تخلیه) و چگالی سوخت، سه متغیر فشار پاشش، مدت پاشش و جرم پاشیده شده در این بخش، تعیین‌کننده‌ی نتایج محاسبات خواهند بود. از میان متغیرهای مذکور، دو متغیر به عنوان ورودی و متغیر باقیمانده به عنوان خروجی محاسبات در نظر گرفته می‌شود [۱۵].

بخش محاسبات صفربعدی سرعت جریان را در هر لحظه حل می‌کند. برای داشتن سرعت در طول پاشش باید پروفیل سرعت خروجی در طول پاشش مشخص باشد. بدین منظور نرم‌افزار الگوی نرخ پاشش^۱ را به صورت بی‌بعد به عنوان ورودی در نظر می‌گیرد. با توجه به عدم وجود اطلاعات سرعت لحظه‌ای جریان، در این شبیه‌سازی الگوی نرخ پاشش به صورت فرضی قرار داده شده است. این الگوی پاشش در کل طول پاشش یکنواخت و در ابتدا و انتهای پاشش به صفر می‌رسد تا رفتار دینامیکی افشانه را حداقل در نظر بگیرد.

با توجه به تقریب الگوی نرخ پاشش، ممکن است مقدار نرخ جریان خروجی از واقعیت اندکی انحراف پیدا کند. بنابراین یکی از متغیرهای

⁴ Blob method

⁵ X (chi) squared distribution

⁶ Rosin-Rammler distribution

¹ Injection rate shape

² Lagrangian-Eulerian

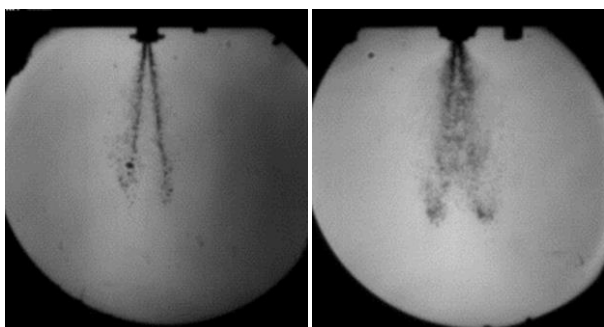
³ Collision

بدست آورد. روش انجام پردازش تصاویر در مرجع [۱۴] ارائه شده است. در ادامه به بررسی تصاویر پاشش و نتایج بدست آمده از آن‌ها در فشارهای مختلف و برای دو سیال مختلف پرداخته می‌شود.

۳-۱-۱- تصویر فواره

تصاویر ضبط شده از فواره می‌توانند به صورت کیفی رفتار فواره‌های مختلف را توصیف کنند. به عنوان نمونه برای مقایسه دو سیال مختلف، در شکل ۳ تصویر فواره سوخت و آب در فشار پاشش ۴ بار و در زمان ۳ میلی‌ثانیه بعد از شروع پاشش نشان داده شده است. مطابق با این تصاویر فواره آب نسبت به فواره سوخت دچار شکست کمتری شده است و فواره صلب‌تر و قطرات درشت‌تری را دارد.

می‌توان گفت مطابق با خواص آب و سوخت که در جدول ۲ آورده شده است، آب کشش سطحی بیشتری نسبت به آن-هپتان دارد، بنابراین شکست کمتر برای قطرات آن رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود قطرات شکسته شده و تبخیر شده در اطراف فواره سوخت بسیار نمایان‌اند در حالی که در فواره آب چنین نیست، می‌توان اینگونه گفت که آب فشار بخار کمتری دارد که باعث می‌شود تبخیر قطرات آن به آسانی تبخیر قطرات سوخت رخ ندهد.



(الف) (ب)

شکل ۳: تصویر فواره در فشار ۴ بار
(الف) سوخت، (ب) آب

جدول ۲: خواص فیزیکی آب و سوخت [۱۹]

این-هپتان	آب	
۶,۱۳۲	۳,۱۶۹	فشار بخار (کیلوپاسکال) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد
۰,۰۱۹	۰,۰۷۲	کشش سطحی (نیوتن بر متر)

و تنظیم آن بخش مهمی از شبیه‌سازی فواره است. در این شبیه‌سازی از الگوی شکست مشهور KH_RT [۱۰] استفاده شده است. این مدل برای شبیه‌سازی فواره‌های توخالی^۱ و توپر^۲ و برای سیال‌های مختلف، بسیار پرکاربرد است [۱۱].

در این الگوی شکست، الگوی ناپایداری KH اولین شکست قطرات در اثر تعدای برهم‌کنش و الگوی ناپایداری RT، دومین شکست را در اثر دیگر برهم‌کنش‌ها در نظر می‌گیرد و نهایتاً به صورت ترکیبی اثر هر دو شکست با هم در نظر گرفته می‌شود. برای تنظیم رفتار مدل برای تطابق نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی افشانه، این الگوی ثابت‌های قابل تنظیمی دارد که تحقیقات بسیاری برای تنظیم این ثابت‌ها برای افشانه‌های مختلف انجام شده است که شرحی از کارهای انجام شده در رابطه با آن در مقدمه نوشته آورده شده است.

۲-۲-۲- الگوی برخورد قطرات

قطرات فواره وقتی به قطرات کوچک‌تر در اثر نیروی مقاوم شکسته می‌شوند ممکن است در ناحیه‌هایی به هم برخورد کنند و قطره‌های بزرگتری را ایجاد کنند. این پدیده با استفاده از الگوی برخورد در نظر گرفته می‌شود که این مدل باید تعداد و اندازه‌های قطرات جدید را محاسبه کند. در این شبیه‌سازی از الگوی برخورد NTC^۳ برای برخورد قطرات برمبنای مرجع [۱۸] استفاده شده است.

۲-۲-۲- الگوی تبخیر قطرات

قطرات در اثر شکست و نفوذ جرمی نهایتاً در محیط تبخیر می‌شوند که الگوی تبخیر این پدیده را در نظر می‌گیرد. مجدداً طبق توصیه تحقیق [۱۸] در این شبیه‌سازی از مدل فراسلینگ^۴ برای تبخیر استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

در ادامه نتایج حاصل از آزمایش افشانه با دو سیال متفاوت ارائه و تحلیل آن‌ها انجام شده است. همچنین پس از آن نتایج شبیه‌سازی ارائه و عوامل مؤثر بر آن واکاوی شده و به همراه صحنه‌گذاری‌های مربوطه ارائه می‌گردد.

۳-۱- نتایج تجربی

تصاویر ضبط شده از فواره در بردارنده اطلاعات مهمی برای شبیه‌سازی‌اند. طول نفوذ مایع و زاویه مخروط^۵ فواره، دو داده مهم برای توصیف رفتار فواره‌اند که در شبیه‌سازی نیز بکارگرفته می‌شوند. با استفاده از روش پردازش تصویر^۶ می‌توان مقدار طول نفوذ فواره در هر لحظه را

^۴ Frossling

^۵ Cone angle

^۶ Image processing

^۱ Hollow cone

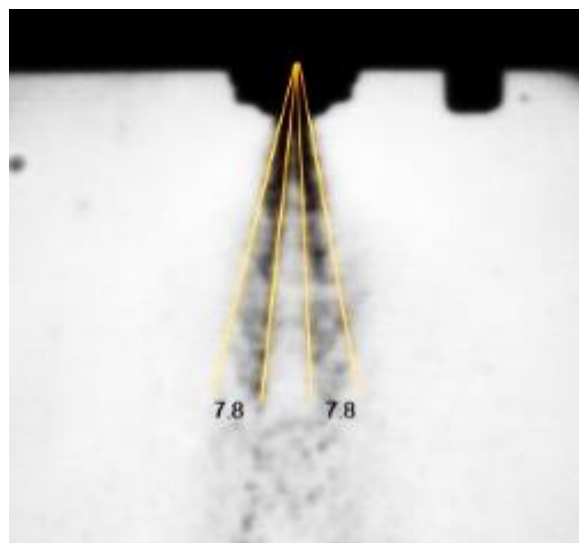
^۲ Solid cone

^۳ No Time Counter

۳-۱-۲- زاویه مخروط

یکی از متغیرهای ورودی برای شبیه‌سازی فواره، زاویه مخروط آن است. زاویه مخروط را می‌توان با توجه به تصاویر ضبط شده از فواره بدست آورد. زاویه مخروط در صفحه XZ مربوط به شکل ۱، برای فواره خارج شده از هر نازل اندازه‌گیری می‌شود.

این زاویه با ترسیم خطوط روی مرز فواره و اندازه‌گیری زاویه بین خطوط، همانند شکل ۴ تعیین می‌شود. اندازه‌گیری در تصاویری انجام شده است که تصویر فواره واضح است تا خطوط اندازه‌گیری روی مرز مشخصی از فواره قرار گیرند و سپس برای چند پاشش مجزا میانگین داده‌های زاویه مخروط ثبت می‌شود.



شکل ۴: اندازه‌گیری زاویه مخروط در تصاویر پاشش

داده‌های اندازه‌گیری زاویه مخروط برای فواره سوخت و آب به ترتیب در جدول ۳ و جدول ۴ آورده شده‌اند. مطابق این نتایج مشاهده می‌شود با افزایش فشار پاشش، زاویه مخروط بزرگ‌تر می‌شود. می‌توان اینگونه تفسیر کرد که با افزایش فشار پاشش، سرعت خروج قطرات از نازل بیشتر شده و در نتیجه قطرات در محیط بزرگ‌تری پخش می‌شوند و فواره زاویه بزرگتری را می‌سازد.

جدول ۳: زاویه مخروط برای فواره سوخت	
فشار پاشش (بار)	زاویه مخروط (درجه)
۳,۵	۷,۸
۴,۰	۱۲,۱

جدول ۴: زاویه مخروط برای فواره آب	
فشار پاشش (بار)	زاویه مخروط (درجه)
۴,۰	۶,۳
۵,۰	۶,۵
۵,۵	۶,۷

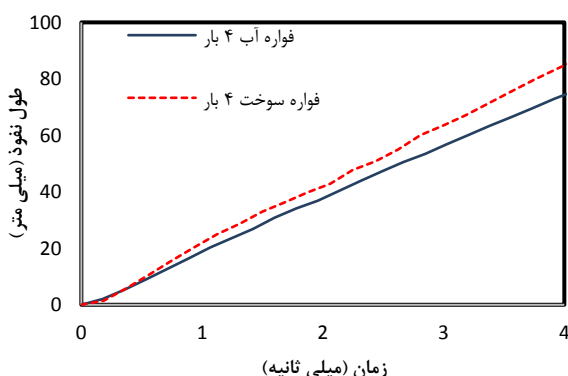
همچنین با مقایسه زاویه مخروط فواره سوخت و فواره آب، مشاهده می‌شود فواره آب زاویه مخروط کمتری نسبت به فواره سوخت دارد و با افزایش فشار پاشش، مقدار زاویه مخروط برای فواره آب کمتر تغییر می‌کند. مجدداً می‌توان گفت که آب دارای چسبندگی سطحی زیادی است بنابراین فواره صلب‌تری تشکیل می‌دهد و حتی با افزایش فشار پاشش نیز، تغییر قابل توجهی در زاویه مخروط آن نسبت به فواره سوخت به‌وجود نمی‌آید.

۳-۱-۳- طول نفوذ

طول نفوذ مایع فواره با استفاده از پردازش تصاویر ضبط شده محاسبه شده است. نتایج طول نفوذ نسبت به زمان ثبت می‌شود و می‌تواند معیار مناسبی برای صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی باشد.

با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که طول نفوذ فواره سوخت بیشتر از طول نفوذ فواره آب در فشار پاشش یکسان است. می‌توان اینگونه تفسیر کرد که با توجه به زاویه مخروط بزرگتر برای فواره سوخت نسبت به فواره آب و اینکه فواره سوخت طول نفوذ بیشتری هم دارد، فضای بیشتری را در محیط اشغال می‌کند؛ از این رو شار حجمی آن بیشتر است.

مطابق معادله ۲ در شرایطی که سطح مقطع، ضریب تخلیه و فشار پاشش یکسان است و در حالی که سوخت در مقایسه با آب چگالی کمتری دارد، در نتیجه شار حجمی خروجی آن بیشتر است؛ بنابراین بخشی از اینکه فواره سوخت فضای بیشتری را اشغال می‌کند می‌تواند ناشی از شار حجمی بیشتر آن باشد. شکست قطرات نیز در طول نفوذ فواره بی‌تأثیر نیست؛ زیرا فواره سوخت از فواره آب راحت‌تر شکسته می‌شود و قطرات فواره کمتر می‌توانند به داخل محیط نفوذ کنند و از این رو این عامل می‌تواند باعث کاهش کاهش طول نفوذ فواره سوخت شود. اما در نهایت مشاهده می‌شود که مجموع دو اثر ذکر شده باعث شده است که فواره سوخت طول نفوذ بیشتری نسبت به فواره آب در فشار یکسان داشته باشد.

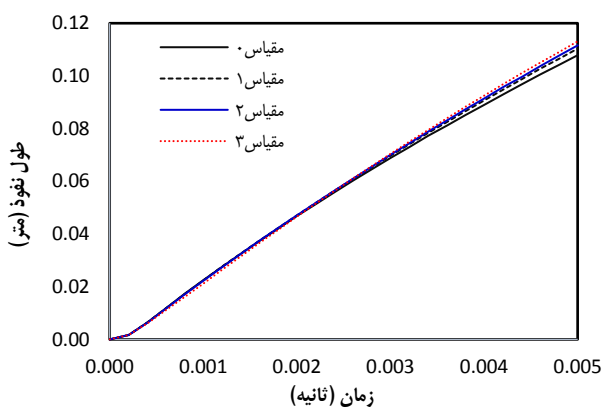


شکل ۵: طول نفوذ فواره سوخت و آب در فشار ۴ بار

نتایج طول نفوذ فواره آب در فشارهای مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فشار پاشش، طول نفوذ فواره نیز افزایش پیدا می‌کند. این نتیجه قابل انتظار است و می‌توان اینگونه

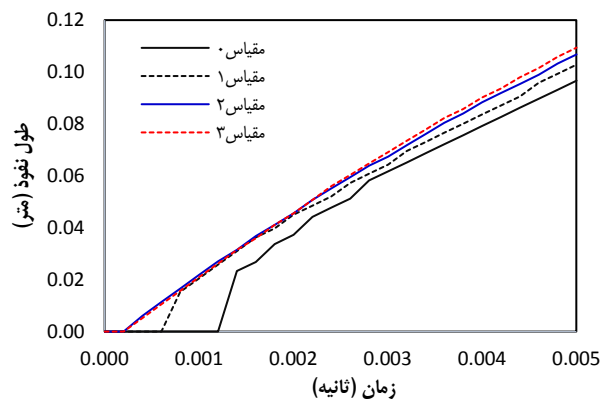
می‌توانند برای تحلیل شبکه محاسباتی در شبیه‌سازی افشانه کفایت کنند. نتایج مورد بررسی عبارت‌اند از: طول نفوذ مایع فواره، طول نفوذ بخار فواره، سرعت ذرات و انرژی جنبشی آشفته‌گی^۱ در راستای محوری. نتایج شبیه‌سازی اولیه با استفاده از شبکه‌های مختلف در ادامه آورده شده است.

با توجه شکل ۷ می‌توان گفت طول نفوذ مایع نسبت به اندازه شبکه حساسیت کمی دارد و نمی‌توان با استناد به روند آن در مورد شبکه محاسباتی اظهار نظر نمود. اما در شکل ۸ مشاهده می‌شود طول نفوذ بخار حساسیت بیشتری نسبت به اندازه شبکه نشان داده است و می‌توان برداشت نمود که تخییر قطرات در شبکه‌های درشت‌تر با خطای بیشتری همراه است و از این رو طول نفوذ بخار در شبکه‌های درشت‌تر با خطا همراه است.



شکل ۷: طول نفوذ مایع فواره

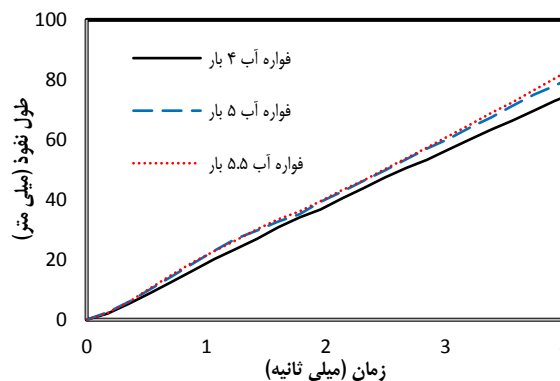
مطابق شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که در اندازه مقیاس ۲ طول نفوذ بخار به همگرایی رسیده است.



شکل ۸- طول نفوذ بخار فواره

نتایج سرعت محوری و انرژی جنبشی آشفته‌گی که به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰ ارائه شده‌اند؛ روند یکسانی در همگرایی را نشان می‌دهند و می‌توان گفت که اندازه مقیاس ۲ در این شکل‌ها به همگرایی خوبی

گفت که با افزایش فشار پاشش، سرعت خروج قطرات از نازل بیشتر می‌شود و قطرات می‌توانند نفوذ بیشتری به داخل محیط داشته باشند.



شکل ۶: طول نفوذ فواره آب در فشار پاشش مختلف

۲-۳- نتایج شبیه‌سازی

پس از بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی از نتایج تجربی، شبیه‌سازی افشانه سوخت و آب انجام می‌شود. قبل از ارائه نتایج اولیه و به منظور اطمینان از نتایج شبیه‌سازی در شبکه محاسباتی مفروض، موضوع استقلال حل از شبکه محاسباتی بایستی مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۲-۱- استقلال از شبکه

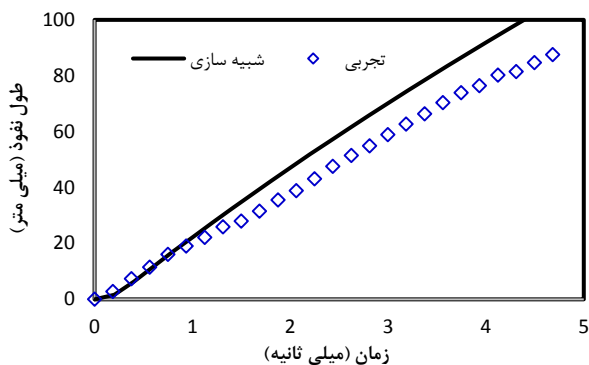
برای دریافت استقلال نتایج از شبکه محاسباتی، شبکه ایجاد شده مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این تحلیل اندازه شبکه مبنای ثابت باقی می‌ماند و اندازه شبکه در مخروط نزدیک فواره کوچک‌تر می‌شود. اندازه شبکه در این مخروط با یک عدد صحیح مقیاس می‌شود، به طوری که اندازه شبکه به مقدار ۲ به توان عدد مقیاس کوچک‌تر می‌شود (نرم‌افزار بدین صورت قراردادی می‌تواند اندازه شبکه را تغییر دهد). شبیه‌سازی با اندازه شبکه در حالت‌های مختلف انجام شده است که در جدول ۵ اندازه شبکه آورده شده است.

جدول ۵: اندازه شبکه در مخروط نزدیک فواره

عدد مقیاس	اندازه شبکه در اطراف فواره (میلی‌متر)
۰	۳,۵
۱	۱,۷۵
۲	۰,۸۷۵
۳	۰,۴۳۷۵

برای ساده‌تر شدن تحلیل و کاهش محاسبات، شبیه‌سازی فقط روی یکی از نازل‌های افشانه در راستای محور فضای استوانه‌ای انجام می‌شود. بر مبنای تحقیق [۱۸] نتایجی که در ادامه اشاره می‌شوند

¹ Turbulent kinetic energy

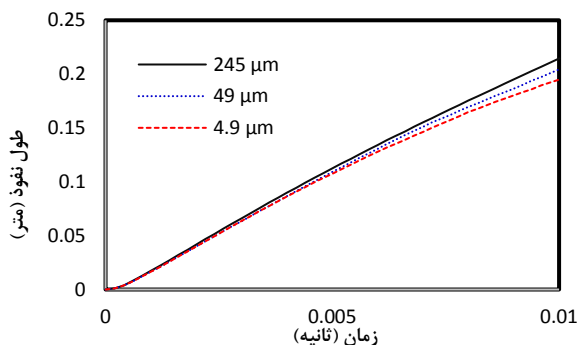


شکل ۱۱: نتایج شبیه سازی اولیه طول نفوذ فواره سوخت

۳-۲-۳- تأثیر متغیرهای ورودی

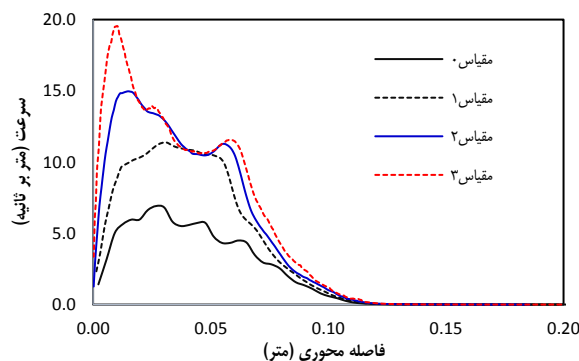
سرعت قطرات در نفوذ به محیط گازی مهم ترین عامل تعیین کننده رفتار فواره است، هر چه سرعت قطرات بیشتر باشند می توانند در محیط بیشتر نفوذ کنند اما در مقابل نیروهای مقاوم در برابر حرکت آن نیز بیشتر می شوند. سرعت متوسط خروج قطرات از نازل با استفاده از معادله شار خروجی از روزنه (معادله ۲) تعیین می شود؛ بنابراین برای بهبود نتایج، با توجه به تعیین مشخصه های افزایش تغییر سرعت متوسط قطرات امکان پذیر نیست.

از طرف دیگر الگوی نرخ پاشش بر سرعت لحظه ای قطرات در خروج از نازل مؤثر است، به طوری که با تغییر این الگو می توان شیب نمودار طول نفوذ را بسیار بهبود بخشید. با توجه به عدم امکان استخراج نتایج سرعت قطرات در خروج از نازل با روش تصویربرداری انجام شده، برای تغییر الگوی نرخ پاشش مبنای مناسبی وجود ندارد و فرض الگوی نرخ پاشش یکنواخت باقی می ماند. در معادلات حاکم بر فواره، قطر قطرات توسط الگوی شکست و الگوی برخورد محاسبه می شود اما شرط اولیه نیز مهم است. بنابراین قطر اولیه قطرات نیز می تواند در مقدار طول نفوذ تأثیر داشته باشد. قطرات با قطر بیشتر اندازه حرکت بیشتری برای حرکت در محیط دارند اما با داشتن سطح بزرگتر نیروی پسی^۱ بیشتری نیز به آن ها وارد می شود. نتایج شبیه سازی مطابق شکل ۱۲ نشان می دهد که با تغییر قابل توجه قطر اولیه قطرات، طول نفوذ در زمان های انتهایی کاهش می یابد.

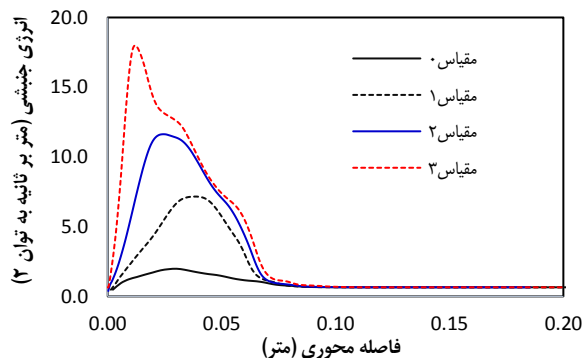


شکل ۱۲: طول نفوذ فواره آب با قطر اولیه متفاوت

رسیده است. اما مشاهده می شود هر چه اندازه شبکه ریزتر می شود مقادیر سرعت و انرژی جنبشی آشفستگی در فاصله های نزدیک تر به نازل افزایش پیدا می کنند که می تواند در همگرایی نتیجه گیری شده ایجاد تردید نماید؛ اما باید گفت که نتایج در فواصل نزدیک نازل (کمتر از ۲۵ میلی متر) از اهمیت کمتری برخوردارند، زیرا این فواصل انتهایی فواره است که در شبیه سازی موتور احتراق داخلی دارای اهمیت است. بنابراین نتیجه گرفته می شود اندازه مقیاس ۲ می تواند مبنای شبکه محاسباتی در شبیه سازی باشد.



شکل ۹: سرعت ذرات فواره در راستای محوری



شکل ۱۰: انرژی جنبشی آشفستگی در راستای محوری

۳-۲-۳- تأثیر عوامل مختلف بر نتایج

پس از شبیه سازی فواره های سوخت و آب با توجه به فرضیات و متغیرهای تعیین شده و صحت گذاری، نتایج طول نفوذ مایع محاسبه شده با نتایج طول نفوذ مایع فواره در حالت تجربی مقایسه شده اند. نتایج اولیه شبیه سازی فواره سوخت (شکل ۱۱) نشان دهنده وجود اختلاف بین طول نفوذ محاسبه شده با مقادیر تجربی است؛ به طوری که طول نفوذ محاسبه شده مقدار بیشتری نسبت به مقادیر تجربی دارد. در این شکل طول نفوذ فواره سوخت نشان داده شده است که حساسیت بیشتری نسبت به فواره آب از خود نشان می دهد. در ادامه به منظور کاهش اختلاف و تطبیق بین نتایج، تأثیر برخی از متغیرهای ورودی و الگوهای فیزیکی بررسی خواهند شد و در صورت نیاز تغییرات لازم اعمال می گردد.

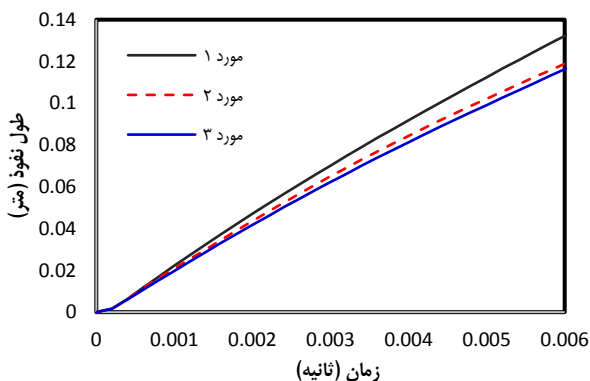
^۱ Drag

می‌کند. در صورت غلبه نیروها بر چسبندگی قطرات، قطرات کوچکتر ایجاد می‌شوند و قطرات بعد از اعمال الگوی KH تحت عنوان قطرات دنباله^۱ شناخته می‌شوند.

در الگوی ترکیبی KH_RT، الگوی RT روی قطرات دنباله اعمال می‌شود تا شکست بیشتر قطرات را در نظر بگیرد. ثابت طول شکست RT ثابتی است که تعیین می‌کند الگوی RT چه موقع روی قطرات اعمال می‌شود. در صورت تنظیم این ثابت برابر با صفر، در هر موقع که قطرات دنباله تشکیل شوند الگوی RT روی آن‌ها اعمال می‌شود. با تنظیم این ثابت با مقداری غیرصفر، در طول مشخصی از ابتدای نازل الگوی RT روی قطرات فواره اعمال می‌شود.

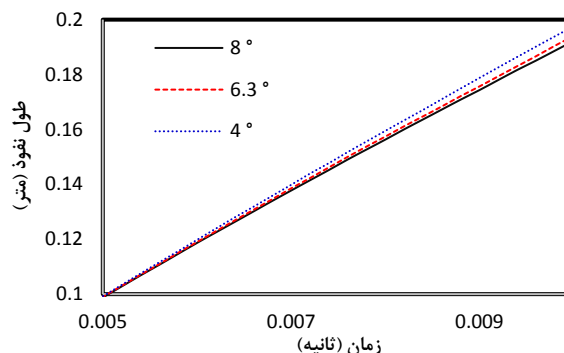
الگوی شکست KH ثابت‌هایی برای تنظیم دارد اما اکثر این ثابت‌ها طبق نظر توسعه دهندگان [۱۰] با مقدار مشخصی تعیین شده و توصیه به تغییر آن‌ها نشده است و تنها ثابت زمانی شکست KH ثابت قابل تنظیم برای این الگو است. در مورد ثابت مذکور با قراردادن مقادیر بزرگتر برای آن، شکست قطرات به قطرات ریزتر بیشتر انجام می‌شود و با قراردادن مقدار کوچک‌تر، فواره چگال‌تر در نظر گرفته شده و شکست قطرات کمتر انجام می‌شود. همچنین بسته به چسبندگی قطرات فواره، کمتر از مقدار مشخصی برای این ثابت، شکست قطرات اصلاً رخ نمی‌دهد و الگوی KH قطرات دنباله را بدون تغییر قطر یا حتی افزایش قطر آن‌ها تولید می‌کند.

همچنین الگوی RT نیز دو ثابت برای تنظیم دارد که عبارت اند از: ثابت زمانی شکست RT و ثابت اندازه RT. ثابت اندازه RT تأثیر قابل توجهی در شکست قطرات در مدل RT دارد، اما از آن سو ثابت زمانی شکست RT تأثیر چندانی روی شکست قطرات نداشته و این ثابت در مقایسه با ثابت اندازه RT، شکست قطرات را تنها اندکی کاهش یا افزایش می‌دهد. شکل ۱۴ اثر تغییر ثابت‌های الگوی RT را روی طول نفوذ فواره سوخت نشان می‌دهد. مطابق این شکل ثابت اندازه RT اثر قابل توجهی روی شکست قطرات و کاهش طول نفوذ دارد و اثر ثابت زمانی شکست RT کمتر از اثر ثابت اندازه RT است. در حالتی که ثابت اندازه RT برابر با کمترین مقدار است، کاهش ثابت زمانی شکست RT باعث کاهش طول نفوذ می‌شود.



شکل ۱۴: اثر ثابت‌های الگوی شکست RT بر طول نفوذ

زاویه مخروط فواره نیز می‌تواند در مقدار طول نفوذ فواره مؤثر باشد. نتایج شبیه‌سازی با زاویه مخروط متفاوت در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این شکل کمی بزرگنمایی شده است و طول نفوذ را در زمان‌های انتهایی پاشش نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود زاویه مخروط بزرگتر باعث کاهش طول نفوذ شده است اما تأثیر آن کم است. می‌توان اینگونه برداشت کرد که در زاویه مخروط بزرگتر، توده قطرات با سطح تماس بزرگتری با محیط در ارتباط اند و افزایش سطح تماس منجر به افزایش نیروی پسی وارد شده به قطرات می‌شود و بدین ترتیب نفوذ قطرات در محیط کمتر می‌شود.



شکل ۱۳: طول نفوذ فواره آب با زاویه مخروط متفاوت

متغیرهای ذکر شده با توجه به مبنای مشخصی تعیین شده‌اند و با توجه به اینکه تأثیر آن‌ها بر مقدار طول نفوذ نیز کم است، تغییر این متغیرها برای تطبیق بهتر نتایج طول نفوذ نمی‌تواند راهکار مناسبی تلقی گردد.

۳-۲-۴- تأثیر الگوهای فیزیکی

در رویکرد شبیه‌سازی فواره، الگوی شکست بیشترین تأثیر را در تعیین رفتار فواره و طول نفوذ آن دارد. در این شبیه‌سازی نیز تحلیل حساسیت الگوی شکست و بررسی رفتار آن برای بهبود نتایج طول نفوذ انجام شده است. همچنین الگوی برخورد نیز می‌تواند در نتایج طول نفوذ مایع تأثیر داشته باشد، اما الگوی تبخیر تأثیری در طول نفوذ مایع ندارد؛ به طوری که ثابت‌های الگوی تبخیر و ثابت‌های نفوذ جرمی و انتقال حرارت فقط می‌توانند در طول نفوذ بخار اثر داشته باشند. در ادامه رفتار الگوی شکست و الگوی برخورد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۲-۴-۱- الگوی شکست

در این شبیه‌سازی برای شبیه‌سازی شکست از الگوی KH_RT استفاده شده است. در ادامه به تفصیل به بررسی ساز و کار این مدل و اثر آن بر فواره پرداخته می‌شود. ساز و کار این الگوی شکست بدین گونه است که ابتدا الگوی شکست KH با در نظر گرفتن ناپایداری‌هایی در اثر نیروهای وارد بر قطره، شکست قطرات به قطرات ریزتر را بررسی

¹ Child parcels

۳-۲-۵- نتایج نهایی

با توجه به رویکرد مورد نظر برای کاهش طول نفوذ و تطبیق آن با نتایج تجربی و اینکه شکست بیشتر قطرات باعث کاهش طول نفوذ می‌شود، تنظیم نهایی برای شبیه‌سازی به گونه‌ای انجام می‌شود تا شکست بیشتری برای قطرات رخ دهد. مطابق تحلیل‌های انجام شده، شکست بیشتر فقط با تنظیم ثابت‌های الگوی شکست قابل دستیابی است.

در این رابطه طبق مطالعاتی که در مراجع [۸] و [۱۲] روی فواره‌های پرفشار با الگوی شکست KH_RT انجام شده است، اینگونه گزارش شده است که بیشترین تأثیر بر طول نفوذ را به ترتیب ثابت زمانی شکست KH، ثابت طول شکست RT، ثابت اندازه RT و ثابت زمانی شکست RT دارند. اما در این تحقیق با توجه به نتایج بدست آمده از فواره سوخت و آب با فشار پاشش کم، تحلیلی برای انتخاب ثابت‌های الگوی شکست در زیر ارائه می‌شود.

در الگوی شکست KH برای شکست بیشتر قطرات، ثابت زمانی شکست KH برابر با مقدار حداکثر انتخاب می‌شود و اجازه افزایش قطر قطرات نیز در این مدل داده نمی‌شود. اما می‌توان گفت با توجه به عدم توانایی این مدل در شکست قطرات و عدم اجازه به افزایش قطر قطرات دنباله، مقدار این ثابت تأثیری بر نتایج ندارد.

با توجه به اینکه شکست تماماً توسط مدل RT انجام می‌شود، ثابت طول شکست RT برابر با مقدار صفر انتخاب می‌شود تا به محض تشکیل قطرات دنباله، شکست آن‌ها انجام شود. در مدل RT نیز ثابت اندازه RT بیشترین تأثیر را دارد و برای کاهش حداکثری طول نفوذ برای تطابق با نتایج تجربی، ثابت اندازه RT در کمترین مقدار انتخاب می‌شود. همچنین هر چند اثر ثابت زمانی شکست RT کم است، این ثابت نیز برای کاهش طول نفوذ برابر با کمترین مقدار انتخاب می‌شود. جدول ۷ نشان‌دهنده مقدار انتخاب شده برای ثابت‌های الگوی شکست برای هر دو فواره سوخت و آب است.

جدول ۷: مقدار ثابت‌های تنظیم شده برای الگوی شکست KH-RT

مقدار ثابت	ثابت زمانی شکست KH	ثابت طول شکست RT	ثابت اندازه شکست RT	ثابت زمانی شکست RT
۱۰۰	۰	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱

این مقادیر برای هر دو فواره سوخت و آب انتخاب شده اند تا طول نفوذ بیشترین کاهش را داشته باشد و به نتایج تجربی نزدیک شود. نتایج طول نفوذ نهایی در فواره سوخت و آب با استفاده از ثوابت ارائه شده در جدول ۷، به ترتیب در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ نشان داده شده‌اند. با مقایسه شکل ۱۶ با شکل ۱۱ می‌توان مشاهده نمود که در اثر بکارگیری ثوابت جدید مطابق جدول ۷، نتایج طول نفوذ فواره سوخت و آب تطابق خوبی با نتایج تجربی از خود نشان می‌دهند.

جدول ۶: مقدار ثابت‌های الگوی شکست RT در شکل ۱۴

ثابت اندازه RT	ثابت زمانی شکست RT
۰٫۶	۱٫۰
۰٫۱	۱٫۰
۰٫۱	۰٫۱

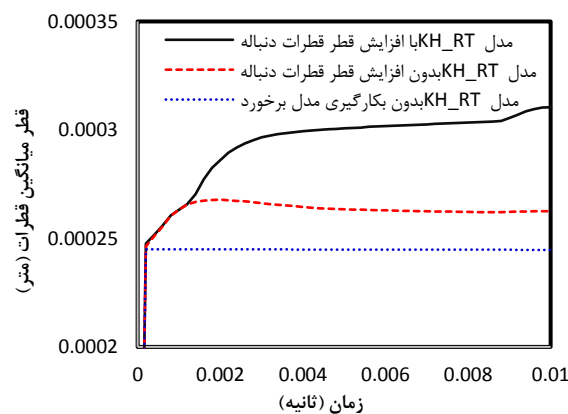
۳-۲-۴- الگوی برخورد

بکارگیری یا عدم بکارگیری الگوی برخورد یا انتخاب آن نیز می‌تواند در نتایج طول نفوذ تأثیر داشته باشد؛ بگونه‌ای که برخورد قطرات به یکدیگر می‌تواند قطرات بزرگتری را ایجاد کند و مجدداً الگوی شکست می‌تواند آن‌ها را دچار شکست کند. در این شبیه‌سازی از الگوی برخورد NTC استفاده شده است و تأثیر بکارگیری یا عدم آن بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی در فواره آب برای نشان دادن اثر الگوی برخورد در شکل ۱۵ آورده شده است.

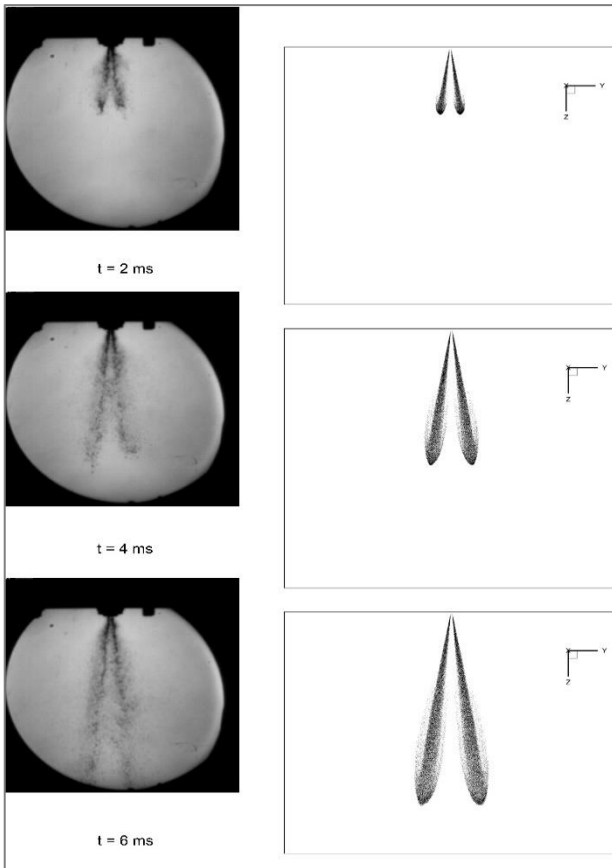
در این شکل اثر الگوی برخورد بر قطر میانگین قطرات نشان داده شده است. در این شکل یک بار الگوی KH مجاز به افزایش قطر قطرات دنباله شده است و بار دیگر مجاز نشده است. در اینجا ذکر این نکته ضروری است که در فواره آب به دلیل چسبندگی زیاد قطرات، الگوی شکست قادر به شکست قطرات به قطری کمتر از قطر اولیه نیست.

مطابق شکل ۱۵ مشهود است که بکارگیری الگوی برخورد باعث افزایش قطر قطرات می‌شود. در حالتی که الگوی KH مجاز است قطر قطرات دنباله را افزایش دهد، افزایش زیادی در قطر قطرات وجود دارد و سپس مدل RT باعث شکست قطرات و کاهش اندازه آن‌ها می‌شود. از سوی دیگر در حالتی که الگوی KH مجاز به افزایش قطر قطرات دنباله نیست، ابتدا قطر قطرات توسط الگوی برخورد افزایش می‌یابد و دوباره الگوی RT باعث کاهش قطر قطرات می‌گردد.

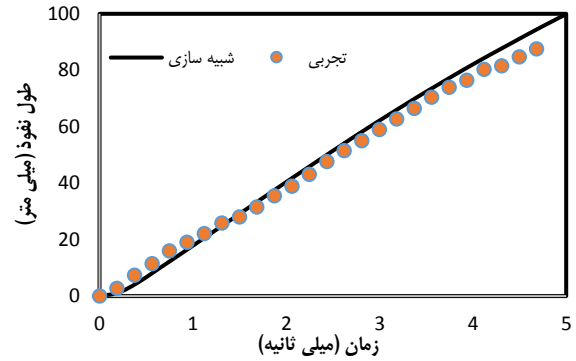
بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که وجود الگوی برخورد در این فواره باعث افزایش قطر قطرات در ابتدا شده اما در نهایت الگوی شکست قطر قطرات را کاهش می‌دهد. از این رو با توجه به نمودار مربوط به عدم بکارگیری الگوی برخورد که قطر قطرات تغییر نمی‌کند، بکارگیری الگوی برخورد امری منطقی است.



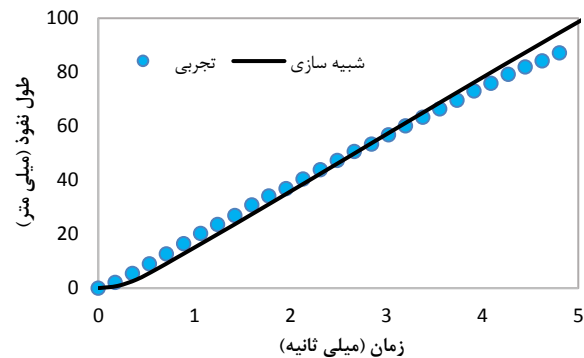
شکل ۱۵- اثر الگوی برخورد بر قطر میانگین قطرات



(الف)



شکل ۱۶: نتایج نهایی طول نفوذ فواره سوخت



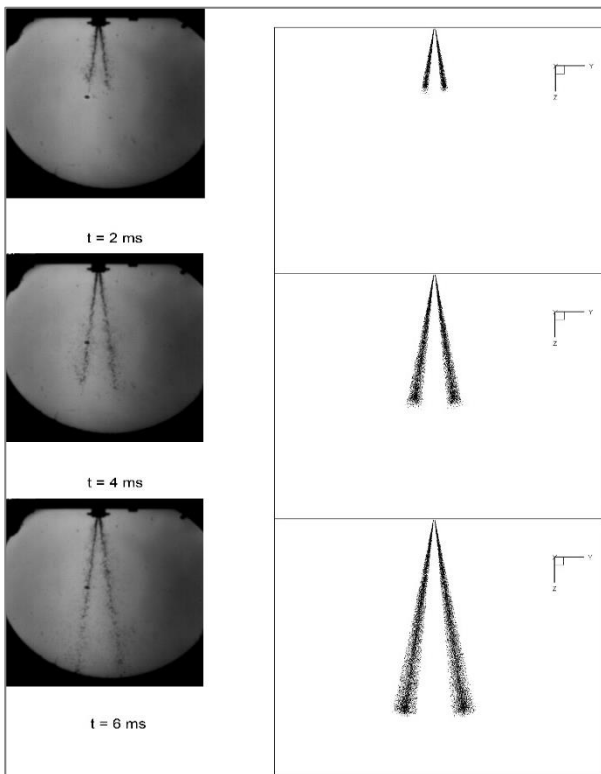
شکل ۱۷: نتایج نهایی طول نفوذ فواره آب

۳-۲-۶- بررسی تصاویر

یکی دیگر از نتایج شبیه‌سازی که می‌تواند با نتایج تجربی مقایسه شود و درستی نتایج را تایید کند، مقایسه تصاویر فواره است. با استفاده از خروجی نرم‌افزار می‌توان تصویری از فواره را ایجاد کرد و بتوان آن را با تصاویر فواره اصلی که در آزمایشگاه گرفته شده است، مقایسه کرد. تصاویر گرفته شده حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشگاه در زمان سپری شده مشخص از شروع پاشش و با مقیاس درست در کنار هم در شکل ۱۸ برای هر دو فواره سوخت و آب نشان داده شده‌اند.

همانطور که مشخص است زاویه مخروط فرض شده، تصویر قابل قبولی را برای فواره در نتایج شبیه‌سازی ایجاد کرده است. همچنین طول نفوذ فواره نیز از اندازه نوک انتهایی فواره قابل تشخیص است که تطابق خوبی بین تصاویر وجود دارد. شکست قطرات در فواره سوخت و آب نیز هر دو به صورت قابل قبولی نمایان است.

با توجه تصاویر شبیه‌سازی می‌توان گفت که فواره آب دارای قطرات درشت‌تر است و شکست کمتری برای قطرات آن رخ داده است، در عوض فواره سوخت به قطرات ریزتری تبدیل شده و شکست بیشتری برای قطرات آن رخ داده است، در این فواره وجود نیروی مقاوم بیشتر در برابر نفوذ فواره باعث جمع‌شدن نوک انتهایی فواره شده است و قطرات ریزتر در اطراف مخروط اصلی فواره قرار گرفته‌اند. بنابراین وجود تطابق بین تصاویر حاصل از شبیه‌سازی و تصاویر آزمایشگاه درستی شبیه‌سازی را تایید می‌کند.



(ب)

شکل ۱۸: تصاویر گرفته شده از فواره در شبیه‌سازی و آزمایشگاه، (الف) سوخت، (ب) آب

Characteristics of Methanol and Ethanol Sprays from a Multi-hole DISI Injector," in *The 13th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems- Asia*, 2009.

- [8] R. M. Braga, M. G. Vaz, C. de Moraes Martins, G. Hindi, and R. Huebner, "3D Numerical Characterization of a Multi-Holes Injector in a Quiescent Vessel and Its Application in a Single-Cylinder Research Engine Using Ethanol," 2017.
- [9] S. K. Addepalli, O. P. Saw, and J. M. Mallikarjuna, "Effect of Mixture Distribution on Combustion and Emission Characteristics in a GDI Engine - A CFD Analysis," 2017.
- [10] J. Beale and R. Reitz, "MODELING SPRAY ATOMIZATION WITH THE KELVIN-HELMHOLTZ/RAYLEIGH-TAYLOR HYBRID MODEL," *At. Sprays*, vol. 9, pp. 623-650, 1999.
- [11] "Modeling Spray and Mixture Formation," in *Mixture Formation in Internal Combustion Engine*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 85-210.
- [12] H. Wang, R. D. Reitz, and M. Yao, "Comparison of Diesel Combustion CFD Models and Evaluation of the Effects of Model Constants," 2012.
- [13] J. Brulatout, F. Garnier, C. Mounaïm-Rousselle, and P. Seers, "Calibration strategy of diesel-fuel spray atomization models using a design of experiment method," *Int. J. Engine Res.*, vol. 17, no. 7, pp. 713-731, Sep. 2016.
- [14] M. Nazari Chekoveri, A. Hajiali Mohammadi, S. M. Mirsalim, and 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 TT," *Engine*, vol. 52, no. 52, pp. 29-42, Oct. 2018.
- [15] "CONVERGE 2.4 manual." Convergent science, 2018.
- [16] S. Subramaniam, "Lagrangian-Eulerian methods for multiphase flows," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 39, no. 2-3, pp. 215-245, Apr. 2013.
- [17] R. D. Reitz and R. Diwakar, "Structure of High-Pressure Fuel Sprays," 1987.
- [18] E. Pomraning, K. Richards, and P. K. Senecal, "Modeling Turbulent Combustion Using a RANS Model, Detailed Chemistry, and Adaptive Mesh Refinement," 2014.
- [19] "National Center for Biotechnology Information. PubChem Database. Heptane." [Online]. Available: pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Heptane (accessed on July 12, 2020)

۴- نتیجه گیری

مقایسه تصاویر گرفته شده از فواره‌های سوخت و آب در آزمایشگاه نشان می‌دهد به دلیل کشش سطحی زیاد آب، فواره آب در مقایسه با فواره سوخت به قطرات درشت‌تری شکسته می‌شود و فواره صلب‌تری را تشکیل می‌دهد. به همین دلیل نیز رفتار فواره آب حساسیت کمتری از فواره سوخت نسبت به فشار پاشش دارد. پس از شبیه‌سازی انجام شده برای این فواره‌ها مشاهده شد که الگوهای موجود می‌توانند تطابق اولیه نسبتاً خوبی را با نتایج تجربی ایجاد کنند. در ادامه به منظور بهبود نتایج شبیه‌سازی یک تحلیل حساسیت از الگوهای موجود انجام شد و مشخص گردید که در این میان بکارگیری و تنظیم الگوی شکست مهم‌ترین بخش در شبیه‌سازی بوده است. شایان ذکر است که وجود اطلاعات تجربی بیشتر مانند قطر قطرات و سرعت خروج قطرات از نازل می‌توانند در بهبود هر چه بیشتر دقت شبیه‌سازی‌ها مؤثر واقع شوند.

مراجع و منابع

- [1] A. Rohit, S. Satpathy, J. Choi, J. Hoard, G. Surnilla, and M. Hakeem, "Literature Survey of Water Injection Benefits on Boosted Spark Ignited Engines," *SAE Technical Paper Series*. 2017.
- [2] J. Kim, H. Park, C. Bae, M. Choi, and Y. Kwak, "Effects of water direct injection on the torque enhancement and fuel consumption reduction of a gasoline engine under high-load conditions," *Int. J. Engine Res.*, vol. 17, no. 7, pp. 795-808, Sep. 2016.
- [3] F. Hoppe, M. Thewes, J. Seibel, A. Balazs, and J. Scharf, "Evaluation of the Potential of Water Injection for Gasoline Engines," *SAE Int. J. Engines*, vol. 10, no. 5, 2017.
- [4] F. Dos Santos and L. Le Moyne, "Spray Atomization Models in Engine Applications, from Correlations to Direct Numerical Simulations," *Oil Gas Sci. Technol. - Rev. d'IFP Energies Nouv.*, vol. 66, no. 5, pp. 801-822, Sep. 2011.
- [5] P. K. Senecal *et al.*, "Multi-Dimensional Modeling of Direct-Injection Diesel Spray Liquid Length and Flame Lift-off Length using CFD and Parallel Detailed Chemistry," 2003.
- [6] S. K. Das and O. T. Lim, "Spray Simulation of n-heptane in a Constant Volume Combustion Chamber Over a Wide Range of Ambient Gas Density and Fuel Temperature," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1813-1820, May 2017.
- [7] Yajia, M. Xu, and W. Zeng, "An Experimental and Numerical Investigation on



Accurate simulation of low pressure fuel and water spray in internal combustion engines; numerical and experimental study

H. Nazari Kian¹, A. Ghasemian^{2*}, H. Fajri³, M. Nazari Chekoveri⁴

¹ MSc Student, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, hadi.nazari.kian@gmail.com

² Faculty of Automotive Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, qasemian@iust.ac.ir

³ Irankhodro Powertrain Company (IPCo), Tehran, Iran, h_fajri@ipco.com

⁴ Master degree of mechanical engineering, Amirkabir University of technology, Tehran, Iran, mahdinazari2701@gmail.com

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 September 2020

Accepted: 14 November 2020

Keywords:

internal combustion engine

spray simulation

fuel injection

water injection

break-up model

ABSTRACT

One of the solutions to reduce pollutants and increase engine power is to use water spray in internal combustion engines. In this type of engine, fuel and water sprays play an important role in engine performance. In this regard, the purpose of this study is to accurately simulate fuel and water sprays and provide optimal coefficients to achieve the best simulation results. For this purpose, the key features of the spray were first determined for both fuel and water through an experimental work involving high-speed camera photography for the spray in a glass chamber and then using image processing. Next, the three-dimensional simulation of both fuel and water sprays in CONVERGE CFD software was performed completely with the help of suitable physical models to determine the behavior of the spray. Sensitivity analysis and simulation results indicate that the most important effect on the spray behavior in simulation is related to the break-up model. Results also show that water spray has a very solid structure so did not show significant change on its behavior by change of injection parameters or model constants. Finally, after accurately identifying the factors affecting the simulation and their effectiveness along with the help of the experimental results, the best coefficients of existing models for accurate simulation of low-pressure fuel and water spray used in IC engines were introduced.

