



بررسی عددی مشخصه‌های غیرواکنشی فواره سوخت سنگین و سوخت جایگزین تحت فشار تزریق زیاد

هاشم نوروزی^۱، پرویز قدیمی^{۲*}، سید مصطفی میرسلیم^۳

^۱دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، h_nowruzi@aut.ac.ir

^۲دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، pghadimi@aut.ac.ir

^۳دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، mirsalim@csr.ir

*نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۲۱-۶۴۵۳۳۱۳۰

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۳ اسفند ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۷ مرداد ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:

فواره سوخت سنگین - نرمال بوتانول

نرم افزار متن باز OpenFOAM

فشار تزریق زیاد

مشخصه‌های غیرواکنشی

چکیده

افزایش فشار تزریق و استفاده از سوخت‌های ترکیبی دو راهکار اصلی با هدف کاهش آلاینده‌های موتورهای دیزل است. از اینرو در مطالعه حاضر، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر فشارهای تزریق زیاد بر رفتار غیرواکنشی فواره مایع سوخت سنگین و سوخت ترکیبی سوخت سنگین - نرمال بوتانول به عنوان سوخت جایگزین مطالعه گردیده است. سه فشار تزریق متفاوت ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ بار در محفظه احتراق حجم ثابت با دمای ۲۹۸ کلوین در موتور دیزل دور متوسط در نظر گرفته شده است. همچنین، برای محاسبه اندرکنش حالت گسسته سوخت مایع با حالت پیوسته هوا از طرحواره چندحالتی اولبری - لاگرانژی و برای شبیه‌سازی تجزیه ثانویه از الگوی ریتز - دیواکار استفاده شده است. علاوه بر این، نتایج عددی مشخصه‌های فواره با داده‌های تجربی صحت‌گذاری شد و از تطابق مناسبی برخوردار است. مشخصه‌های انتخاب شده برای ارزیابی رفتار فواره مایع شامل، طول نفوذ فواره و زاویه مخروطی به عنوان مشخصه‌های کلان و قطر میانگین ذرات به عنوان مشخصه خرد است. بر پایه نتایج محاسباتی استخراج شده، افزایش طول نفوذ فواره، افزایش زاویه مخروطی فواره و کاهش قطر میانگین ذرات، با افزایش فشار تزریق دیده می‌شود. با این حال، افزایش فشار از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ بار تأثیرات چشمگیری در ارتقاء مشخصه‌های فواره در مقایسه با افزایش ۲۰۰۰ بار به ۳۰۰۰ بار دارد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

(۱) مقدمه

فشار تزریق بزرگ سوخت یکی از بهترین روش‌ها برای ارتقاء فرآیند گردکردن^۱ سوخت به حساب می‌آید. افزایش سطح گردکردن به واسطه فشار تزریق بزرگ منجر به تشکیل مخلوط همگن تر هوا و سوخت، کاهش مصرف سوخت و ذرات معلق و افزایش توان موتور می‌گردد. لذا امروزه شناخت فیزیک مرتبط با مشخصه‌های فواره و تجزیه^۲ آن در فشارهای تزریق زیاد با هدف پدیده‌شناسی رفتار فواره سوخت با افزایش فشار تزریق در موتورهای دیزل همراستا با سایر مشخصه‌های مؤثر بر رفتار و نحوه شکل‌گیری فواره سوخت، نظیر پس‌فشار^۳ [۲و۱]، دمای محیطی محفظه احتراق [۳و۴] و نوع الگوی میدان جریان سوخت [۵ و ۶] مورد توجه محققان قرار گرفته است. تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی تأثیرات فشار بزرگ تزریق انجام شده است که در این زمینه می‌توان اشاره داشت به، فینک^۴ و همکاران [۷] که در مطالعه‌ای تجربی مشخصه‌هایی نظیر طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره و قطر ذرات سه سوخت متفاوت دریایی را در سه فشار تزریق بزرگی ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ بار، مطالعه کرده‌اند. مطالعه آن‌ها نشان دهنده افزایش طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره با افزایش فشار تزریق است. در مطالعه‌ای دیگر، وانگ^۵ و همکاران [۸] در بررسی تجربی و تحلیلی، مشخصه‌های فواره سوخت دیزل و بیودیزل را تحت فشار زیاد ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ بار، بررسی کردند. تخمین قطر ذرات فواره در این مطالعه، نشان‌دهنده تولید قطر میانگین ذرات^۶ بزرگتر سوخت بیودیزل به واسطه کشش سطحی و چسبندگی قویتر است. همچنین تحقیقات آن‌ها مبین نقش فشار تزریق بزرگ به عنوان راهی مؤثر برای بهبود مشخصه‌های ضعیف فرآیند گردکردن سوخت بیودیزل است. لی^۷ و پارک^۸ [۹] مشخصه‌های گردکردن در الگوی (KH-RT) برای سوخت دیزل در فشار تزریق بزرگ شامل مقادیر ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ بار را به صورت تجربی و عددی مطالعه نموده‌اند. ایگل^۹ و همکاران [۱۰] به صورت تجربی مشخصه‌های فواره دیزل تحت فشار تزریق بزرگ در محفظه احتراق ثابت کروی را مطالعه کرده‌اند. در این مطالعه، از افشانه چند سوراخ و فشار تزریق ۱۵۰۰ بار استفاده شده است. آن‌ها در این مطالعه، رابطه توانی طول نفوذ نوک فواره در ابتدای توسعه فواره در داخل محفظه احتراق را در فشار تزریق بزرگ، نشان دادند. همچنین در مطالعه‌ای تجربی دیگری، تأثیر زوایای متفاوت پیش‌تزریق سوخت

بر مشخصه‌های احتراقی سوخت ترکیبی دیزل-بیودیزل در فشار تزریق بزرگ به مقدار ۲۰۰۰ بار، توسط ارجنس^{۱۰} و همکاران [۱۱] بررسی شده است. جئونگ^{۱۱} و لی [۱۲] با آزمایشی تجربی تأثیر فشار تزریق زیاد در محدوده ۱۰۰۰ تا ۲۸۰۰ بار بر مشخصه‌های فواره دیزل را مطالعه نموده‌اند. مطالعه آن‌ها نشانگر افزایش طول نفوذ، عرض، زاویه، سرعت فواره و کاهش قطر ذرات با افزایش پیوسته فشار تا ۲۶۰۰ بار بوده است. در حالی که نرخ افزایش مشخصه‌های فوق به یکباره در فشار تزریق ۲۰۰۰ بار کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در مطالعه‌ای عددی فرآیند تجزیه برخورد ناشی از اندرکنش دو فواره سوخت در فشارهای تزریق بزرگ با مقادیر ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ بار توسط قاسمی و همکاران [۱۳] بررسی شده است. در مطالعه‌ای تجربی، نیشیدا^{۱۲} و همکاران [۱۴] تأثیر سه فشار تزریق زیاد ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ بار را بر روی مشخصه‌های فواره سوخت دیزل بررسی نموده‌اند. در این مطالعه، مشخصه‌های قطر میانگین ذرات، طول نفوذ فواره و آشفتگی محیط تزریق را مطالعه شده است. تحقیقات آن‌ها نشان‌دهنده ترکیب بهتر سوخت و هوا و فرآیند گردکردن در فشارهای تزریق بزرگتر با افزایش آشفتگی در محیط تزریق است. یوسفی فرد و همکاران [۱۵] نیز در مطالعه عددی با به کارگیری یک شبیه‌سازی تجزیه ترکیبی، فرآیند تزریق زیاد سوخت بیودیزل را مطالعه کردند. در این مطالعه، طول نفوذ بیشتر سوخت بیودیزل نسبت به سوخت دیزل در فشارهای تزریق ضعیفتر، مشاهده شده است. همچنین، تأثیر فشارهای تزریق بزرگ در محدوده ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ بار بر زاویه مخروطی و طول نفوذ فواره سوخت دیزل و بیو دیزل به صورت تجربی توسط قوری^{۱۳} و همکاران [۱۶] مطالعه شده است. مطالعه آن‌ها نشانگر، افزایش طول نفوذ فواره و کاهش زاویه مخروطی در فشارهای تزریق بالا در سوخت بیودیزل است.

از سویی دیگر، امروزه یکی از موضوعات مورد علاقه محققین، مطالعه بر روی مشخصه‌های فواره سوخت‌های ترکیبی نظیر ترکیب سوخت‌سنگین^{۱۴} (HFO) با الکل‌هایی مانند اتانول، متانول و بوتانول است. دلیل انتخاب سوخت‌های ترکیبی، قابلیت تولید این نوع سوخت‌ها براساس منبع تجدیدپذیر زیست‌توده با هدف کاهش نرخ فزاینده استفاده از سوخت‌های تجدیدناپذیر و آلاینده‌هایی نظیر NO_x است [۱۷-۲۱]. از این‌رو در مطالعه حاضر از سوخت ترکیبی سوخت‌سنگین - نرمال بوتانول به عنوان سوخت جایگزین استفاده شده است.

1 Atomization

2 Breakup

3 Backpressure

4 Fink

5 Wang

6 Sauter mean diameter (SMD)

7 Lee

8 Park

9 Eagle

10 Ergenc

11 Jeong

12 Nishida

13 Ghurri

14 Heavy fuel oil

تجزیه مقدماتی^۷ سوخت شامل تفکیک^۸ هسته سوخت مایع به حبابها^۹، رباطها^{۱۰} و قطرات^{۱۱} در ناحیه گرد کردن شکل می‌گیرد. تجزیه ثانویه^{۱۲} قطرات و رباطها در ناحیه فواره متراکم^{۱۳} با حضور فراوان رباطها به عنوان صفحات مایع غیرکروی و عدم حضور حبابهای حجیم، اتفاق می‌افتد [۲۴]. سرانجام در ناحیه فواره رقیق^{۱۴} رباطها و قطرات به قطراتی کوچکتر، تبدیل می‌گردند.

۲-۱) ترکیب سوخت سنگین - نرمال بوتانول

بر پایه مرور ادبیات ذکر شده در مقدمه مشاهده می‌شود که یکی از سوخت‌های جایگزین به جای سوخت‌های معمول دیزل و سوخت سنگین، الکل‌هایی نظیر اتانول، متانول، بوتانول و یا سوخت‌های ترکیبی پایه فسیلی با الکل‌های مذکور است. همچنین، بوتانول با توجه به مشخصه‌های فیزیکوشیمیایی^{۱۵} ارائه شده در جدول ۱ در ترکیب با سوخت‌های سنگواره‌ای نسبت به سایر رقبای خود، پیشی می‌گیرد.

جدول ۱: مقایسه خواص بوتانول، متانول و اتانول [۱۷ و ۲۱]

مشخصه	مقایسه با اتانول و متانول	مزیت نسبی
علاقه مندی به ترکیب با آب ^{۱۶}	-	تأثیرپذیری کمتر نسبت به تغییرات آب و هوا
نقطه اشتعال	+	ایمنی بیشتر
چگالی انرژی	+	تولید ۲۵٪ انرژی بیشتر نسبت به اتانول و ۴۵٪ بیشتر نسبت به متانول
عدد ستان	+	تشکیل احتراقی یکنواخت تر
زنجیره	+	ساختاری نسبتاً غیرقطبی و تشابه بیشتر با سوخت دیزل
هیدروکربنی	+	چسبندگی دو برابری نسبت به اتانول

امروزه با توسعه رایانه‌ها، استفاده از روش‌های عددی با بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان ابزاری کارآمد و یاری‌دهنده جهت دست‌یابی به درک بهتر و شبیه‌سازی پدیده‌های فواره سوخت شناخته می‌شود. از حدود سال ۲۰۰۹، OpenFOAM به عنوان یکی از کدهای عددی متن‌باز، با قابلیت توسعه بالا برای شبیه‌سازی فواره سوخت، مورد توجه محققین قرار گرفته است. از جمله مطالعات صورت گرفته با این نرم‌افزار متن‌باز در راستای شبیه‌سازی فواره سوخت در موتورهای دیزل، می‌توان به مطالعه شبیه‌سازی فرآیند گرد کردن توسط جسینگ^۱ [۲۲] و مطالعه تأثیر سوخت ترکیبی دیزل-دیزل - بیودیزل بر مشخصه‌های موتور دیزل سبک توسط اسماعیل^۲ و همکاران [۲۳] اشاره نمود.

ارتقاء مشخصه‌های فواره با افزایش فشار تزریق در موتورهای دیزل سنگین با ارجاع به مرور ادبیات فنی صورت گرفته، قابل پیش‌بینی است. با این حال، زمانی که فشار تزریق به مقادیر بسیار بالایی رسد، فواره خروجی از افشانه در حالتی بحرانی قرار گرفته که این شرائط امکان ایجاد محدودیتی در بهبود مشخصه‌های فواره و یا تأثیر معکوس بر مشخصات مذکور را خواهد داشت [۳]. از این رو مطالعه تغییرات در مشخصه‌های فواره با افزایش فشار تزریق تا مقادیر زیاد، امری ضروری به نظر می‌آید. از سویی دیگر، مطالعات فوق، نشانگر خلاء تحقیقات در حوزه مطالعه فواره سوخت‌های ترکیبی با سوخت سنگین در فشارهای تزریق زیاد است.

از این رو، مطالعه عددی مشخصه‌های فواره سوخت سنگین و سوخت ترکیبی سوخت سنگین - نرمال بوتانول (HFO\ n-butanol) به عنوان سوخت مصرفی در فشارهای تزریق زیاد، در مطالعه حاضر بررسی شده است. در این مطالعه، مشخصه‌های غیرواکنشی^۳ و غیرتبخیری^۴ غیرتبخیری^۴ فواره سوخت در سه فشار تزریق بزرگ تا زیاد بررسی می‌گردند. همچنین طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره و مشخصه قطر میانگین ذرات برای ارزیابی رفتار فواره انتخاب شده‌اند.

۲) تشریح فنی مسئله و روش شناسی عددی

یکی از مهمترین پدیده‌های موجود در موتورهای دیزل، تزریق فواره سوخت مایع با سرعت تزریق درون محیط محفظه احتراق است. فواره مایع سوخت دارای سه ناحیه اساسی پس از خروج از افشانه است. این سه ناحیه به ترتیب، ناحیه گرد کردن، ناحیه فواره متراکم^۵ و ناحیه فواره رقیق^۶ است.

⁷ Primary breakup

⁸ Decomposition

⁹ Blobs

¹⁰ Ligaments

¹¹ Droplets

¹² Secondary breakup

¹³ Dense spray

¹⁴ Dilute spray

¹⁵ Physicochemical

¹⁶ Hydroscopicity

¹ Gjesing

² Ismail

³ Non-reacting

⁴ Non-evaporating

⁵ Dense spray

⁶ Dilute spray

از این رو ترکیب سوخت سنگین $C_{14}H_{30}$ با نرمال بوتانول، سوخت جایگزین مناسبی در موتورهای دیزل دور متوسط و دور کم به حساب می‌آید. سوخت ترکیبی در مطالعه حاضر، مشتمل بر ۸۵٪ $C_{14}H_{30}$ به عنوان سوخت سنگین و ۱۵٪ $C_4H_{10}O$ به عنوان نرمال بوتانول با مشخصه‌های فیزیکی جدول ۳ است.

برای شبیه‌سازی مشخصه‌های سوخت سنگین و نرمال بوتانول در نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM، خواص گرمافیزیکی این دو نوع سوخت شامل ضرایب NASA JANNAF محاسبه و در کتابخانه نرم‌افزار افزوده شده است.

۲-۲) فرآیند محاسباتی

عموماً به دلیل پیچیدگی حاصل از ابعاد کوچک و چگالی بزرگتر در نزدیکی افشانه سوخت، قطرات تزریق شده در فواره به عنوان شرائط اولیه برای تجزیه ثانویه، جایگزین تجزیه مقدماتی هسته مایع می‌گردد. در شبیه‌سازی حاضر، الگوی تجزیه ثانویه Reitz-Diwakar [۲۵] به کار گرفته شده است. در این شبیه‌سازی دو الگو متفاوت برای تجزیه فواره سوخت به کار گرفته می‌شود. این دو الگو، بگ بریکاپ^۲ برای سرعت‌های نسبی کند فواره و استریپینگ بریکاپ^۳ بریکاپ^۳ برای سرعت‌های نسبی تند است. زمان تجزیه و قطر قطره‌های فواره سوخت برای هر دو الگو، توسط شبیه‌سازی ریتز و دیواکار به دست می‌آید. در ناحیه تجزیه چتر نجاتی، معیار تجزیه قطرات تنها عدد وبر^۴ است. در این حالت، اگر عدد وبر بیشتر از مقدار ۱۲ گردد، قطره سوخت شکسته شده و اگر کمتر از این عدد باشد، قطره سوخت پیوستگی خود را حفظ می‌کند. لذا تجزیه چتر نجاتی زمانی اتفاق می‌افتد که:

$$We_g = \frac{\rho_g u_{rel}^2 D_d}{\sigma} > 12 \quad (1)$$

از سویی دیگر، تجزیه برهنگی نیز زمانی صورت می‌پذیرد که:

$$\frac{We_g}{\sqrt{Re}} > 0.5 \quad (2)$$

علاوه بر این، برای محاسبه عمر ناپایداری قطرات در این شبیه‌سازی از معادلات (۳) و (۴) استفاده می‌شود.

$$t_1 = \pi \left[\frac{\rho_l D_d^3}{16\sigma} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$t_2 = C_2 \frac{D_d}{2u_{rel}} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (4)$$

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بوتانول به عنوان سوختی تجدیدپذیر بر پایه زیست‌توده با قابلیت امتزاج بالا در ترکیب با سوخت‌های دیزلی و سنگین، به عنوان سوخت مناسبی در مقایسه با اتانول و متانول در نظر گرفته می‌شود. از سویی دیگر، تولید زیست‌سوخت‌ها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. لذا یکی از تنها راهکارهای تأمین نیاز موتورهای دیزل به سوخت، با رویکرد کاهش آلایندگی، حرکت به سمت استفاده از سوخت‌های زیست‌توده و یا ترکیب سوخت‌های دیزلی موجود با سوخت‌هایی نظیر بوتانول است.

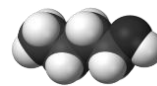
بوتانول الکلی با ساختار ملکولی زنجیره ۴ کربنی است که هم امکان استخراج از طریق فرآیندهای پتروشیمیایی از نفت و هم از طریق منابع تجدیدپذیر زیستی را دارد. این الکل ۴ ساختار ایزومری همانند جدول ۲ دارد. متناسب با موقعیت گروه هیدروکسل، ایزومرهای مختلف تولید می‌گردند. در مطالعه حاضر، از میان ایزومرهای موجود، نرمال بوتانول به دلیل چگالی و نقطه اشتعال و جوش بزرگتر نسبت به سایر ایزومرها انتخاب شده است.

علاوه بر این، همانند شکل ۱، نرمال بوتانول با زنجیره هیدروکربنی خطی مستقیم بسیار متشابه با زنجیره هیدروکربنی سوخت سنگین ($C_{14}H_{30}$) به عنوان سوخت پایه موتورهای دیزل سنگین است. این تشابه نشانگر امتزاج بالای این دو نوع سوخت با یکدیگر است.

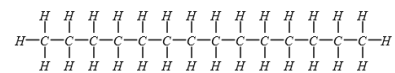
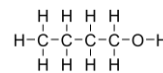
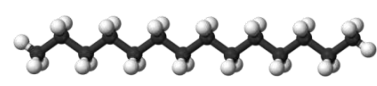
جدول ۲: ساختار ملکولی ایزومرهای بوتانول

نام ایزومر	ساختار ملکولی
نرمال بوتانول	$CH_3CH_2CH_2CH_2OH$
بوتانول ثانویه	$CH_3CH_2CHOHCH_3$
ایزوبوتانول	$(CH_3)_2CH_2CHOH$
تر-بوتانول	$(CH_3)_3COH$

نرمال بوتانول



سوخت سنگین ($C_{14}H_{30}$)



شکل ۱: ساختار ملکولی سوخت سنگین در مقایسه با نرمال بوتانول و داشتن زنجیره هیدروکربنی متشابه

1 Regime

2 Bag breakup

3 Stripping breakup

4 Weber number

همچنین بر اساس جدول ۵ مشخص است که، فشارهای تزریق از فشار ۱۰۰۰ بار تا مقادیر فشار زیاد، یعنی ۲۰۰۰ بار و ۳۰۰۰ بار برای سنجش تأثیر فشارهای تزریق زیاد بر دو نوع سوخت مورد استفاده، در نظر گرفته شده است.

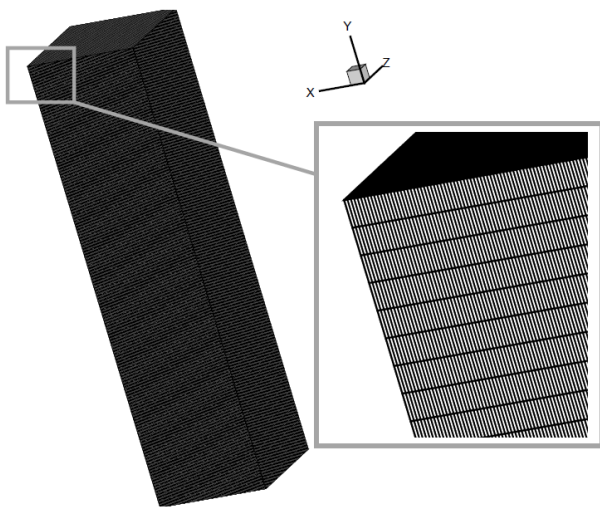
شکل شبکه محاسباتی مطالعه حاضر که به صورت حجم ثابت و متناسب با مشخصه‌های محفظه احتراق ارائه شده در جدول ۴ است، در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. در شکل ۲، راستای تزریق سوخت در خلاف محور y مشاهده می‌گردد.

جدول ۴: مشخصه‌های هندسی محفظه احتراق موتور مورد بررسی

نام مشخصه	مقدار مشخصه	واحد
طول	۴۵۰	mm
قطر	۱۵۰	mm
پس فشار	۱۴	bar
دمای محیطی	۲۹۸	K

جدول ۵: مشخصه‌های سامانه پاشش

نام مشخصه	مقدار مشخصه	واحد
قطر نازل	۰,۲۷	mm
فشار تزریق	۱۰۰۰-۲۰۰۰	bar
سوخت	۳۰۰۰	
دمای اولیه سوخت	۳۷۵	K
جرم کل تزریق	۳۴	mg



شکل ۲: ساختار شبکه محاسباتی

جایی که در مطالعه حاضر، $C_2 = 20$ به عنوان عدد ثابت در نظر گرفته شده است [۲۶]. همچنین در مطالعه حاضر، برای شبیه‌سازی اندرکنش میان سوخت و هوای داخل محفظه احتراق، رویکرد چندحالتی اوپلری- لاگرانژی به عنوان شیوه محاسباتی در نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM استفاده شده است.

رویکرد آشفتگی اتخاذ شده در این مطالعه الگوی استاندارد $k-\epsilon$ در الگوی آشفتگی RANS بوده است. دلیل این انتخاب، هزینه‌های محاسباتی کمتر و دقت کافی رویکرد آشفتگی RANS در مقابل LES است. همچنین برای شبیه‌سازی قطرات مایع، رویکرد مسیریابی ذره‌ای لاگرانژی^۱ (LPT) اتخاذ گردیده است. این رویکرد برای محاسبه موقعیت و نرخ چرخش ذرات غیرکروی نیز به کار گرفته شده است. برای این هدف، معادله فواره، با رویکردی آماری در فضای متغیرهای تصادفی است، حل گردیده است.

از سویی دیگر برای شبیه‌سازی رفتار جریان چندحالتی در طرحواره اوپلری، پنج معادله دیفرانسیل پاره‌ای شامل قانون بقای جرم، انرژی و اجزاء برداری اندازه حرکت بر پایه مطالعه نوروزی و همکاران [۲۷] در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، این دسته از معادلات با روش حجم محدود گسسته‌سازی شده و منطق MIMPLE (ادغام‌شده PISO-SIMPLE) با دو گام اصلاحی برای حل معادلات جفت سرعت- فشار در ناویراستوکس به کار گرفته شده است.

۳) مشخصات هندسه محفظه احتراق و سامانه پاشش

در مطالعه حاضر، سوخت سنگین $C_{14}H_{30}$ و سوخت ترکیبی سوخت سنگین- نرمال بوتانول از افشانه‌ای تک‌سوراخ به داخل محفظه احتراق حجم ثابت تزریق می‌گردد. شار جرمی تزریق در فشارهای تزریق متفاوت بر اساس مطالعه پیکت^۲ و همکاران [۲۸]، محاسبه شده است. سپس شار جرمی محاسبه گردیده به شبیه‌سازی حاضر اعمال شده است. مشخصه‌های هندسی محفظه احتراق موتور مورد بررسی و مشخصه‌های سامانه پاشش سوخت به ترتیب در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. همان گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، دمای اولیه محفظه احتراق، دمای اتاق است.

جدول ۳: مشخصه‌های سوخت سنگین و نرمال بوتانول

نام مشخصه (واحد)	سوخت سنگین	نرمال بوتانول
چسبندگی پویا در ۲۰ درجه (cP)	۱۰,۷	۲,۹۵
چگالی در ۲۰ درجه (Kg / m^3)	۸۹۵	۸۱۰
کشش سطحی (Nm^{-1})	۰,۰۳۱	۰,۰۲۴

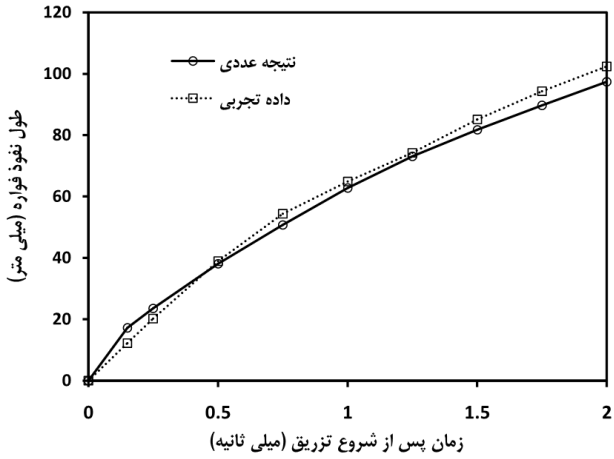
¹ Lagrangian particle tracking

² Pickett

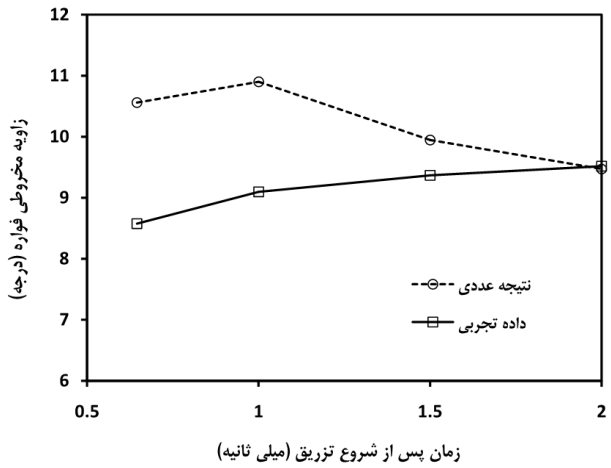
۴) تحلیل حساسیت وضوح شبکه‌بندی و صحنه‌گذاری

به دلیل عدم وجود داده‌های تجربی برای مشخصه‌های غیرواکنشی و غیرتبخیری فواره مایع سوخت ترکیبی سوخت سنگین- نرمال بوتانول برای صحنه‌گذاری نتایج عددی، در ابتدا پالایش شبکه‌بندی، با هدف مطالعه وضوح شبکه‌بندی و تطابق شبیه‌سازی عددی شبکه‌بندی مناسب اجرا شده است. سپس نتایج محاسباتی با مناسب‌ترین شبکه‌بندی، با نتایج تجربی برای سوخت سنگین مقایسه شده است. برای دستیابی به این هدف، در ابتدا تحلیل حساسیت شبکه‌بندی بر روی طول نفوذ برای سوخت سنگین در فشار تزریق ۱۰۰۰ بار، مطابق شکل ۳ انجام شده است. بر مبنای شکل ۳، وضوح شبکه‌بندی ۰,۰۰۱۳۳ متر دارای تطابق قابل‌قبولی با شبکه‌بندی ریزتر است. حال بر اساس شبکه‌بندی مناسب انتخاب شده ۰,۰۰۱۳۳ متر، نتایج عددی طول نفوذ و زاویه فواره با داده‌های تجربی به ترتیب در اشکال ۴ و ۵ مقایسه شده است. بر اساس اشکال ۴ و ۵ تطابق مناسب مابین نتایج عددی و تجربی با خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) به ترتیب ۳,۳۶ و ۱,۳۷۲ برای طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره مشاهده می‌شود.

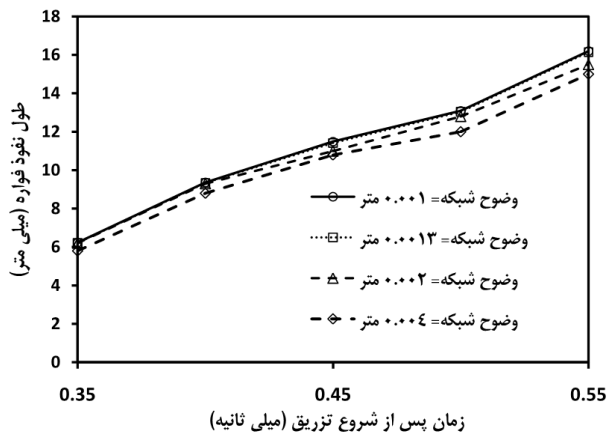
همچنین، برای حصول اطمینان از پاسخ صحیح شبیه‌سازی انتخاب‌شده برای سوخت جایگزین، تحلیل حساسیت شبکه‌بندی دیگری بر روی طول نفوذ فواره سوخت بوتانول در فشار تزریق ۷۲۰ بار بر اساس مطالعه ردمان^۱ و همکاران [۲۹] و مطابق شکل ۶ انجام شده است. متعاقباً، بر اساس شبکه‌بندی مناسب انتخاب شده از شکل ۶ (۰,۰۰۱۳۳ متر)، نتایج عددی طول نفوذ با داده‌های تجربی در شکل ۷ مقایسه شده است.



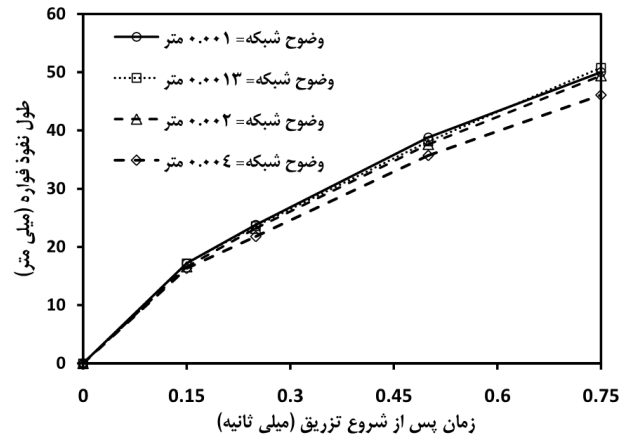
شکل ۴: مقایسه نتایج عددی و تجربی [۷] طول نفوذ فواره سوخت سنگین در ۱۰۰۰ بار



شکل ۵: مقایسه نتایج عددی و تجربی [۷] زاویه مخروطی فواره سوخت سنگین در ۱۰۰۰ بار



شکل ۶: آزمون استقلال از شبکه طول نفوذ فواره بوتانول در ۷۲۰ بار



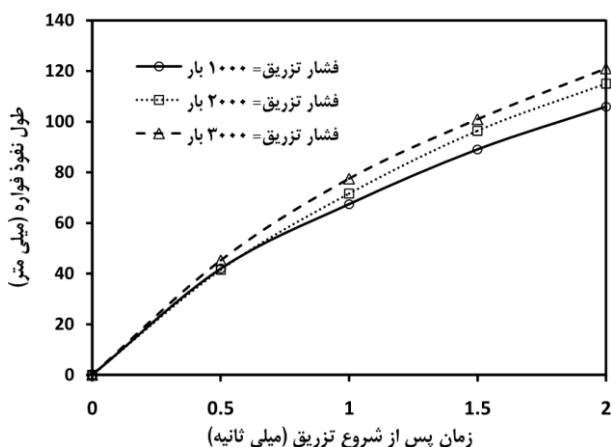
شکل ۳: آزمون استقلال از شبکه طول نفوذ فواره سوخت سنگین در ۱۰۰۰ بار

¹ Reddemman

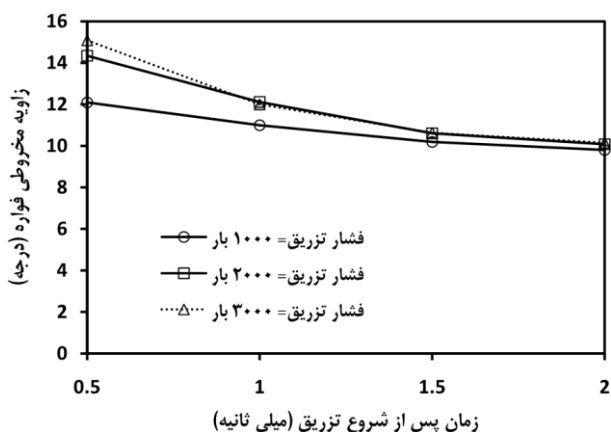
۵-۱) بررسی تأثیرات فشار تزریق بر مشخصات فواره

سوخت‌سنگین و سوخت سنگین - نرمال بوتانول

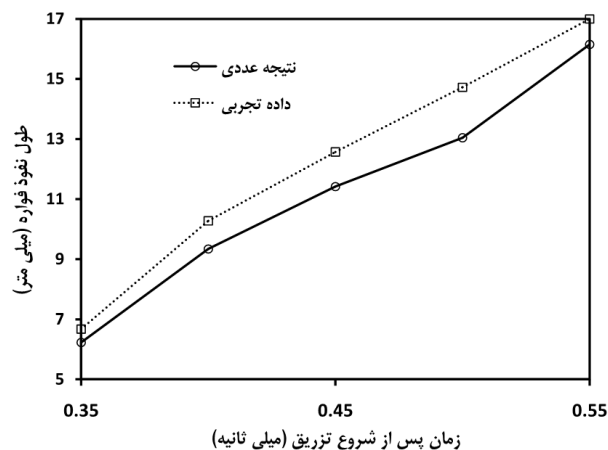
طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره مایع سوخت‌سنگین در فشارهای بزرگ تزریق متفاوت به ترتیب در اشکال ۸ و ۹ ارائه شده است. برپایه شکل ۸ می‌توان استنتاج نمود که، با افزایش فشار تزریق، طول نفوذ فواره در طول زمان، به دلیل افزایش فشار فواره در برابر مقاومت هوای محیطی، افزایش یافته است. همچنین، نرخ رشد طول نفوذ فواره در ابتدای تزریق تا ۰.۵ میلی‌ثانیه برای هر سه فشار تزریق روندی تقریباً خطی دارد و تأثیر فشار تزریق در ابتدای تزریق، تا حدودی قابل اغماض است. در حالی که، پس از این زمان افزایش طول نفوذ روندی مجانبی دارد. از سویی دیگر تأثیر افزایش فشار تزریق از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ بار تأثیرات قابل توجه‌تری نسبت به افزایش فشار تزریق از ۲۰۰۰ به ۳۰۰۰ بار دارد. لذا، این گونه به نظر می‌رسد که، محدودیتی در بهبود مشخصه طول نفوذ فواره مایع سوخت‌سنگین از فشاری بزرگ به بعد، وجود دارد. این نتیجه‌گیری با مطالعه وانگ و همکاران [۸] تطابق دارد.



شکل ۸: مقایسه طول نفوذ فواره مایع در فشارهای تزریق متفاوت برای سوخت‌سنگین



شکل ۹: مقایسه زاویه مخروطی فواره مایع در فشارهای تزریق متفاوت برای سوخت‌سنگین



شکل ۷: مقایسه نتایج عددی و تجربی [۲۹] طول نفوذ فواره بوتانول در ۷۲۰ بار

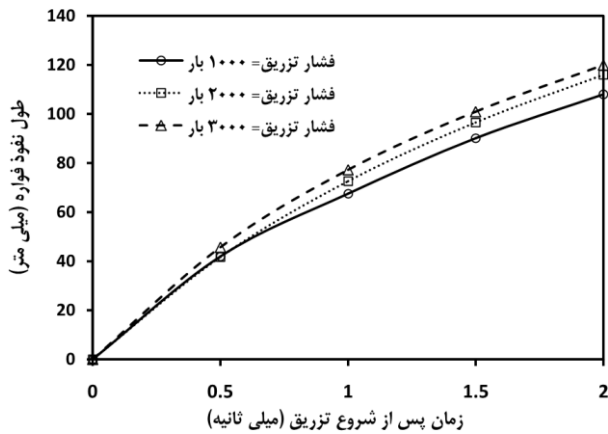
مطابق شکل ۷، تطابق مناسب بین نتایج عددی و تجربی با خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) ۱.۰۹ برای طول نفوذ فواره مشاهده می‌شود. بر اساس تطابق مناسب استخراج شده از صحنه‌گذاری انجام شده برای سوخت سنگین و بوتانول در فشار تزریق بزرگ، پاسخ مناسب برای شبیه‌سازی سوخت‌سنگین-نرمال بوتانول در فشارهای تزریق بزرگ انتظار می‌رود. لذا در ادامه، نتایج محاسباتی تأثیر فشارهای تزریق بزرگ و جایگزینی سوخت ترکیبی به جای سوخت‌سنگین بر مشخصه‌های فواره مایع سوخت، ارائه شده است.

۵) بحث و بررسی نتایج

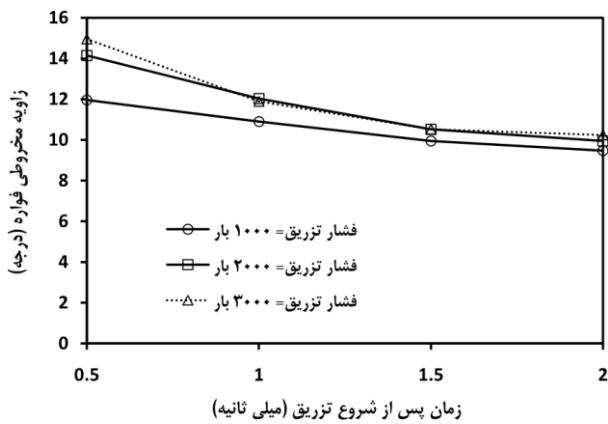
مشخصه‌های اساسی سنجش رفتار فواره در شرایط مختلف به دو دسته کلی مشخصات کلان^۱ و خرد^۲ تقسیم‌بندی می‌شود. از جمله شاخص‌های اصلی کلان در مطالعه رفتار فواره، طول نفوذ فواره مایع پس از زمان شروع تزریق است. مشخصه کلان دیگر، زاویه مخروطی فواره مایع است. برای محاسبه این زاویه، بایستی زاویه مابین دو خطی که از نازل افشانه شروع شده و تا دو نقطه‌ای که به صورت شعاعی، بیشینه فاصله را از هم دارند، در نظر گرفته شود.

از سویی دیگر، اصلی‌ترین مشخصه خرد در ارزیابی رفتار فواره مایع، قطر میانگین ذرات است. مشخصه قطر میانگین ذرات با متوسط‌گیری از قطر تمامی قطرات در زمانی معین محاسبه می‌گردد. در ادامه تأثیر فشار تزریق بر مشخصه‌های خرد و کلان فواره مایع دو سوخت مورد نظر ارائه شده است.

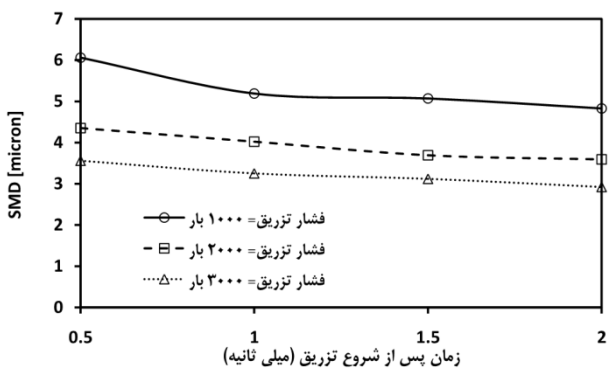
1 Macroscopic
2 Microscopic



شکل ۹: مقایسه طول نفوذ فواره مایع در فشارهای تزریق متفاوت برای سوخت سنگین - نرمال بوتانول



شکل ۱۰: مقایسه زاویه مخروطی فواره مایع در فشارهای تزریق متفاوت برای سوخت سنگین - نرمال بوتانول



شکل ۱۱: مقایسه قطر میانگین ذرات فواره مایع در فشارهای تزریق متفاوت برای سوخت سنگین - نرمال بوتانول

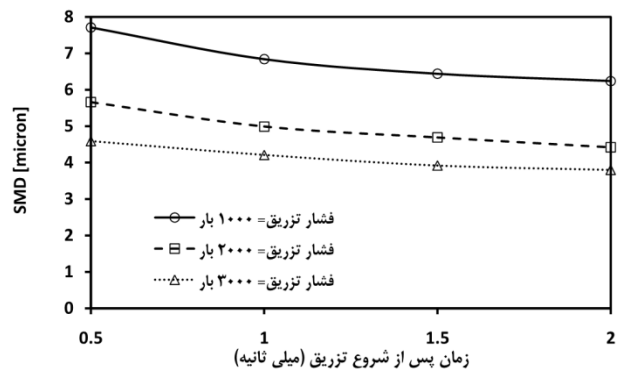
برپایه شکل ۱۱ مشاهده می شود که رفتار فواره مایع سوخت سنگین - نرمال بوتانول در طول زمان برای هر سه فشار تزریق همانند سوخت سنگین است. از سویی دیگر نتایج زاویه مخروطی برای سوخت سنگین - نرمال بوتانول در شکل ۱۲ نیز رفتاری مشابه شکل ۹ برای سوخت سنگین را دارد.

همچنین همان گونه که در شکل ۹ دیده می شود، زاویه مخروطی فواره مایع در طول زمان توسعه فواره در محفظه برای هر سه فشار تزریق، روندی کاهشی با شیبی کند را طی می کند. افزایش زاویه مخروطی با افزایش فشار تزریق نیز مشاهده می شود. در نتیجه، با افزایش زاویه مخروطی فواره ناشی از افزایش فشار تزریق، شکل گیری سریع تر مخلوط سوخت و هوا و تجزیه بهتر در فشار تزریق بزرگتر مهیا می گردد. با این حال، تأثیر افزایش فشار تزریق از ۱۰۰۰ بار به ۲۰۰۰ بار در ارتقاء زاویه مخروطی نسبت به ۲۰۰۰ بار به ۳۰۰۰ بار بسیار چشمگیر است. به صورتی که از زمان ۱ میلی ثانیه به بعد، مقادیر زاویه مخروطی فشارهای تزریق زیاد، یعنی فشارهای تزریق ۲۰۰۰ بار و ۳۰۰۰ بار، دارای تطابق کمی بالایی هستند.

مقایسه شاخص خرد قطر میانگین ذرات فواره سوخت سنگین در فشارهای بالای تزریق متفاوت در شکل ۱۰ مشاهده می شود. در لحظه شروع تزریق، قطر میانگین ذرات دارای مقداری به اندازه سوراخ نازل افشانه است و سپس با فرآیند گرد کردن کاهش می یابد.

برپایه شکل ۱۰ دیده می شود که مقدار قطر میانگین ذرات در طول زمان در هر سه فشار تزریق بزرگ با روندی کاهشی روبرو است. همچنین دیده می شود که با افزایش فشار تزریق تا مقادیر بسیار بزرگ، با بهبود فرآیند گرد کردن، مقدار قطر میانگین ذرات کمتری قابل دستیابی است. اما همان گونه که در دو شاخص کلان نیز مشاهده شد، تأثیر افزایش فشار تزریق از ۱۰۰۰ بار به ۲۰۰۰ بار نسبت به ۲۰۰۰ بار به ۳۰۰۰، چشمگیر است و تأثیر تقریباً دو برابری کاهش قطر میانگین ذرات دیده می شود. این مسأله بیانگر محدودیت در تأثیر ارتقایی فشار تزریق از حدی بزرگتر بر مشخصه های خرد فواره مایع است.

نمودارهای مشخصه های کلان طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره و شاخص خرد قطر میانگین ذرات برای سوخت ترکیبی سوخت سنگین - نرمال بوتانول، در فشارهای تزریق متفاوت به ترتیب در اشکال ۱۱، ۱۲ و ۱۳ مشاهده می شود.



شکل ۱۲: مقایسه قطر میانگین ذرات فواره مایع در فشارهای تزریق متفاوت برای سوخت سنگین

از سویی دیگر، بر اساس جدول ۶ کاهش زاویه مخروطی فواره با جایگزینی سوخت ترکیبی با سوخت پایه در هر سه فشار تزریق مشاهده می‌شود. دلیل این افزایش متشابه با دلیل ذکر شده برای مشخصه طول نفوذ فواره است. همچنین بر اساس جدول ۶، با افزایش فشار تزریق، کاهش نرخ افزایش زاویه مخروطی فواره با استفاده از سوخت حاصل می‌گردد.

بر اساس جدول ۶، تأثیر جایگزینی سوخت ترکیبی بر کاهش مشخصه قطر میانگین ذرات، با کاهشی در حدود ۲۸٪، به روشنی مشخص است. اما دلیل کاهش این مشخصه در شرایط غیراحتراقی، وابستگی مستقیم قطر میانگین ذرات به چسبندگی، چگالی و کشش سطحی سوخت مایع است [۳۱]. بدین صورت که چسبندگی بالا، ناپایداری‌های مورد نیاز برای تجزیه جت سوخت را کاهش می‌دهد. در نتیجه فرآیند گرد کردن را به تأخیر می‌اندازد. افزایش چگالی نیز به صورت معکوس بر فرآیند گرد کردن مؤثر است [۳۱]. این در حالی است که کشش سطحی، عامل مخالف شکل‌گیری قطرات از سوخت مایع است [۳۰]. در سوخت جایگزین (سوخت سنگین-نرمال بوتانول) نیز سه مشخصه فیزیکی چسبندگی، چگالی و کشش سطحی در مقایسه با سوخت سنگین کاهش می‌یابد. لذا قطر میانگین ذرات کوچکتر که نشانه فرآیند گرد کردن بهتر است، در سوخت جایگزین مشاهده می‌شود. این نتیجه‌گیری با مطالعه تجربی و عددی وانگ و همکاران [۸] در شرایط غیراحتراقی و مطالعه تجربی نشیدا و همکاران [۱۴] تطابق دارد. از سویی دیگر تشابه تقریباً یکسان در مقدار تأثیرگذاری استفاده از سوخت جایگزین با سوخت سنگین در هر سه فشار تزریق زیاد بر مشخصه قطر میانگین ذرات مشاهده می‌شود.

بر اساس اشکال ۸ تا ۱۳، افزایش طول نفوذ فواره و زاویه مخروطی به عنوان دو مولفه اساسی شکل‌گیری بهتر مخلوط سوخت و هوا با افزایش فشار تزریق از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ بار و همچنین از ۲۰۰۰ به ۳۰۰۰ بار مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش فشار تزریق، کاهش مشخصه قطر میانگین ذرات به عنوان مولفه شکل‌گیری فرآیند گرد کردن بهتر، اتفاق می‌افتد. لذا فشار تزریق بزرگتر، مخلوط سوخت و هوا و فرآیند گرد کردن مناسب‌تری را مهیا می‌سازد [۸].

جدول ۶: تأثیر سوخت سنگین-نرمال بوتانول بر میانگین زمانی مشخصه‌های فواره در مقایسه با سوخت سنگین خالص

مشخصه‌های فواره	فشار تزریق (بار)		
	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
طول نفوذ فواره	↑ ۱،۰۳۹٪	↑ ۰،۷۲۹٪	↓ ۰،۲۳۲٪
زاویه مخروطی فواره	↑ ۱،۹۴۰٪	↑ ۱،۰۶۰٪	↑ ۰،۵۷۵٪
قطر میانگین ذرات	↓ ۲۸،۷۴٪	↓ ۲۶،۲۶٪	↓ ۲۸،۵۶٪

با این حال، بهبود بسیار کمی در تأثیر افزایش فشار از ۲۰۰۰ بار به ۳۰۰۰ بار بر مشخصه‌های فواره سوخت سنگین-نرمال بوتانول، نسبت به این افزایش فشار در سوخت سنگین دیده می‌شود. اما بر مبنای مقایسه شکل ۱۲ و ۱۳ می‌توان دریافت که، با وجود رفتار متشابه کاهش قطر میانگین ذرات با افزایش فشار تزریق، کاهش این مشخصه با تغییر سوخت از سوخت سنگین به سوخت سنگین-نرمال بوتانول مشاهده می‌شود. در ادامه در قالب جدولی کمی، تأثیر جایگزینی سوخت ترکیبی با سوخت سنگین بر مشخصه‌های خرد و کلان فواره مایع بررسی شده است.

۲-۵) بررسی تأثیرات جایگزینی سوخت سنگین-نرمال بوتانول با سوخت سنگین بر مشخصات فواره

همان‌گونه که در بخش پیشین دیده شد، سوخت ترکیبی در مقایسه با سوخت سنگین دارای رفتار متشابهی در مشخصه‌های خرد و کلان فواره مایع است. با این حال در ادامه و در قالب جدول ۶ مقایسه کمی میانگین‌گیری زمانی شاخصه‌های طول نفوذ فواره، زاویه مخروطی و قطر میانگین ذرات با جایگزینی سوخت سنگین-نرمال بوتانول به جای سوخت سنگین خالص، ارائه شده است.

همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، افزودن نرمال بوتانول به سوخت سنگین بر روی طول نفوذ فواره در فشارهای تزریق ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ بار تأثیری افزایشی دارد. در حالی که در فشار تزریق ۳۰۰۰ بار به یکباره کاهش طول نفوذ فواره با افزودن نرمال بوتانول دیده می‌شود. بر اساس مطالعه لفور^۱ [۳۰]، چسبندگی، چگالی و کشش سطحی، خصوصیات فیزیکی‌ای از سوخت مایع می‌باشند که بر روی فرآیند گرد کردن در موتور دیزل نقش دارند به صورتیکه با کاهش چسبندگی و کشش سطحی، طول نفوذ فواره افزایش می‌یابد [۸]. لذا، از آنجائیکه چسبندگی و کشش سطحی سوخت جایگزین (ترکیب سوخت سنگین-نرمال بوتانول) از سوخت سنگین کم‌تر است، طول نفوذ بیشتری دارد. اما بایستی بدین نکته اشاره شود که دلیل تغییر بسیار کم مشخصه طول نفوذ فواره با استفاده از سوخت جایگزین به جای سوخت دیزل، مشخصه فیزیکی چگالی سوخت جایگزین است. بدین صورت که، چگالی سوخت جایگزین کمتر از چگالی سوخت سنگین است و از آنجائیکه، هرچه چگالی بیشتر باشد، طول نفوذ افزایش می‌یابد [۸ و ۳۰] و چگالی سوخت جایگزین، تأثیری منفی بر مشخصه طول نفوذ فواره دارد. اما، به دلیل نزدیکی مقادیر چگالی نرمال بوتانول و سوخت سنگین، تأثیر چگالی بر طول نفوذ فواره در مقایسه با دو مشخصه فیزیکی دیگر (چسبندگی، کشش سطحی) کمتر است. همچنین بر اساس جدول ۶، کاهش تأثیرگذاری سوخت جایگزین بر افزایش مشخصه طول نفوذ فواره با افزایش فشار تزریق مشاهده می‌شود.

¹ Lefebvre

همچنین، الگوی Reitz-Diwakar نیز الگوی موردنظر برای تجزیه ثانویه انتخاب شده است. از سویی دیگر، با انتخاب شبیه‌سازی استاندارد k- ϵ در رویکرد RANS، شبیه‌سازی آشفتگی در سیال تراکم‌پذیر صورت گرفته است.

نتایج عددی حاصل از شبکه‌بندی انتخاب شده از مطالعه حساسیت شبکه‌بندی با داده‌های تجربی مقایسه گردیده و از تطابق مناسبی برخوردار است. به نحوی که جذر میانگین مربعات (RMSE) برای مشخصه‌های طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره در فشار تزریق ۱۰۰۰ بار و دمای ۲۹۸ کلون، به ترتیب ۳،۳۶ و ۱،۳۷۲ محاسبه شده است. نتایج استخراج شده از مطالعه حاضر نشان‌دهنده آن است که، افزایش فشار تزریق منجر به افزایش طول نفوذ فواره برای هر دو نوع سوخت‌سنگین و سوخت ترکیبی می‌شود. با این حال تأثیرات افزایش فشار تزریق از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ بار نسبت به ۲۰۰۰ به ۳۰۰۰ بار چشمگیر است. علاوه بر این، افزایش فشار تزریق باعث افزایش زاویه مخروطی فواره مایع می‌گردد. با این حال، تأثیر افزایش فشار از ۲۰۰۰ به ۳۰۰۰ بار، قابل اغماض است. کاهش مشخصه خرد قطر میانگین ذرات با افزایش فشار تزریق در هر دو سوخت استفاده شده، یکی دیگر از نتایج استنتاج شده از مطالعه حاضر است. علاوه بر این نتایج محاسباتی نشان‌دهنده آن است که، جایگزینی سوخت‌سنگین - نرمال بوتانول با سوخت‌سنگین نیز باعث کاهش ناچیز زاویه مخروطی و کاهش قابل توجهی در قطر میانگین ذرات می‌گردد.

فهرست علائم

ρ_g	چگالی محیط گازی
u_{rel}	سرعت نسبی مابین قطرات سوخت و محیطی گازی
D_d	قطر قطرات سوخت
σ	کشش سطحی
ρ_l	چگالی حالت مایع

References

- [1] G.X Yang, J.S Chn, Experimental study of the effect of high back-pressure on the atomization of a plain jet injector under coaxial air flow, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 903-910, 1990
- [2] I.V. Roisman, L. Araneo, C. Tropea, Effect of ambient pressure on penetration of a diesel spray, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 33, No. 8, pp. 904-920, 2007
- [3] S.H. Park, H.J. Kim, C.S. Lee, Comparison of experimental and predicted atomization characteristics of high-pressure diesel spray under various fuel and ambient temperature, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 7, pp. 1491-1499, 2010

از سویی دیگر، به صورت نتیجه‌گیری کلی از جدول ۶، افزایش طول نفوذ فواره و زاویه مخروطی و کاهش قطر میانگین ذرات با استفاده از سوخت‌جایگزین (۱۵٪ حجمی نرمال بوتانول در سوخت سنگین) به جای سوخت‌سنگین حاصل می‌گردد. لذا، می‌توان انتظار داشت که سوخت‌جایگزین در فشار تزریق ۳۰۰۰ بار، مناسب‌ترین مخلوط سوخت و هوا و فرآیند گرد کردن را به همراه داشته باشد. از طرفی دیگر، انتظار می‌رود با افزایش درصد نرمال بوتانول اضافه شده به سوخت‌سنگین، طول نفوذ فواره و زاویه مخروطی بزرگتر شده و قطر میانگین ذرات کاهش یابد. دلیل این پیش‌بینی، کاهش قابل توجه مشخصه‌های فیزیکی چسبندگی و کشش سطحی در سوخت جایگزین با افزایش درصد نرمال بوتانول در ترکیب سوخت جایگزین است. با این حال، برای شناخت بهتر این مسئله، تأثیرگذاری درصدهای متفاوت نرمال بوتانول در سوخت‌سنگین بر روی مشخصه‌های فواره سوخت در فشار تزریق زیاد در مطالعات آینده باید بررسی شود.

۶ نتیجه‌گیری

فشارهای تزریق بزرگ و استفاده از سوخت‌های ترکیبی بر پایه زیست‌توده دو راهکار اساسی برای بهبود راندمان موتور و کاهش آلایندگی به حساب می‌آید. از این رو در مطالعه حاضر، با استفاده از شبیه‌سازی عددی بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیرات فشارهای زیاد بر مشخصه‌های غیرواکنشی خرد و کلان فواره مایع سوخت‌سنگین و سوخت ترکیبی سوخت‌سنگین - نرمال بوتانول بررسی گردیده است. برای تحقق این امر، سه فشار تزریق ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ بار در دمای ۲۹۸ کلون در نظر گرفته شده است. همچنین، مشخصه‌های طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره به عنوان مشخصه‌های کلان و قطر میانگین ذرات به عنوان مشخصه خرد برای ارزیابی رفتار فواره مایع سوخت موردنظر، مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این، برای شبیه‌سازی سوخت ترکیبی موردنظر از ۸۵٪ $C_{14}H_{30}$ به عنوان سوخت‌سنگین و ۱۵٪ نرمال بوتانول با ساختار شیمیایی $C_4H_{10}O$ به عنوان الکل ترکیبی استفاده شده است. دلیل انتخاب نرمال بوتانول به عنوان الکل موردنظر برای ترکیب با سوخت‌سنگین، برتری مشخصات فیزیکی شیمیایی این ساختار الکی در مقایسه با اتانول و متانول و تطابق ساختار ملکولی این الکل با سوخت‌سنگین برای دستیابی به بهترین امتزاج است.

نرم‌افزار مورد استفاده در این مطالعه، نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM بوده است. در این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی قطرات گسسته مایع از رویکرد مسیریابی ذره‌ای لاگرانژی و برای محاسبه اندرکنش حالت گسسته سوخت مایع با حالت پیوسته هوا، طر حواره چندحالتی اوپلری - لاگرانژی به کار گرفته شده است.

- [16] A.L. Ghurri, J.D. Kim, H.G Kim, J.Y. Jung, K.K. Song, The effect of injection pressure and fuel viscosity on the spray characteristics of biodiesel blends injected into an atmospheric chamber, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 9, 2012
- [17] S. Kumar, J.H. Cho, J. Park, I.L. Moon, Advances in diesel-alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, pp. 46-72, 2013
- [18] D.C. Rakopoulos, C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis, A.M. Dimaratos, D.C. Kyritsis, Effects of butanol-diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine, *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 10, pp. 1989-1997, 2010
- [19] M. Karabektas, M. Hosoz, Performance and emission characteristics of a diesel engine using iso-butanol-diesel fuel blends, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 6, pp. 1554-1559, 2009
- [20] M. Yao, Q. Zhang, H. Liu, Z. Zheng, P. Zhang, Diesel engine combustion control: medium or heavy EGR, *SAE International*, 2010
- [21] D.C. Rakopoulos, C.D. Rakopoulos, R.G. Papagiannakis, D.C. Kyritsis, Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine, *Fuel*, Vol. 90, No. 5, pp. 1855-1867, 2011
- [22] R. Gjesing, J. Hattel, U. Fritsching, Coupled atomization and spray modeling in the spray forming process using OpenFOAM, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 3, No. 4, pp. 471-486, 2009
- [23] H.M. Ismail, H.K. Ng, S. Gan, T. Lucchini, Computational study of biodiesel-diesel fuel blends on emission characteristics for a light-duty diesel engine using OpenFOAM, *Applied Energy*, Vol. 111, pp. 827-841, 2013
- [24] X. Jiang, G.A. Siamas, K. Jagus, T.G. Karayiannis, Physical modelling and advanced simulations of gas-liquid two-phase jet flows in atomization and sprays, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36, No. 2, pp. 131-167, 2010
- [25] R.D. Reitz, R. Diwakar, Effect of drop breakup on fuel sprays, *SAE International*, 1986
- [26] S. Hossainpour, A.R. Binesh, Investigation of fuel spray atomization in a DI heavy-duty diesel engine and comparison of various spray breakup models, *Fuel*, Vol. 88, pp. 799-805, 2009
- [27] H. Nowruzzi, P. Ghadimi, M. Yousefifard, A numerical study of spray characteristics in medium speed engine fueled by different hfo/n-butanol blends, *International Journal of Chemical Engineering*, Vol. 2014, pp. 1-13, 2014
- [28] L. Pickett, J. Manin, R. Payri, M. Bardi, Transient Rate of Injection Effects on Spray Development, *SAE International*, 2013
- [4] S.H. Park, H.J. Kim, C.S. Lee, Comparison of experimental and predicted atomization characteristics of high-pressure diesel spray under various fuel and ambient temperature, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 7, pp. 1491-1499, 2010
- [5] A. Ghasemi, M.H. Djavarehshkian, Investigation of the effects of natural gas equivalence ratio and piston bowl flow field on combustion and pollutant formation of a DI dual fuel engine, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 10, No. 14, pp. 1369-1379, 2010
- [6] X. Chen, Y. Liu, V. Yang, Effect of backpressure on internal flow dynamic and spray characteristics of liquid swirl injector, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, USA, 2011
- [7] C. Fink, B. Buchholz, M. Niendorf, H. Harndorf, Injection spray analyses from medium speed engines using marine fuels, ILASS, Italy, 2008
- [8] X. Wang, Z. Huang, O.A. Kuti, W. Zhang, K. Nishida, Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, No. 4, pp. 659-666, 2010
- [9] C.S. Lee, S.W. Park, An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays, *Fuel*, Vol. 81, No. 18, pp. 2417-2423, 2002
- [10] W.E. Eagle, S.B. Morris, M.S. Wooldridge, Transient behavior of diesel sprays during high-pressure injection from a multi-hole injector, ILASS, USA, 2013
- [11] A.T. Ergenc, D.O. Koca, M. Abacioglu, Combustion characteristics of a high pressure fuel injected single cylinder compression-ignition engine, fuelled with diesel-ester blends under various fuel injection advance angles, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 2, No. 2, pp. 227-235, 2012
- [12] D.Y. Jeong, J.T. Lee, Analysis of the suitable injection pressure for diesel injection with high pressure, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 87-93, 2005
- [13] A. Ghasemi, R.M. Barron, R. Balachandar, Spray-to-spray collision breakup of ultra high injection pressure diesel fuel, 20th Annual Conference of the CFD Society of Canada, Canada, 2012
- [14] K. Nishida, W. Zhang, T. Manabe, Effects of micro-hole and ultra-high injection pressure on mixture properties of D.I. diesel spray, *SAE International*, 2007
- [15] M. Yousefifard, P. Ghadimi, M. Mirsalim, Numerical simulation of biodiesel spray under ultra-high injection pressure using OpenFOAM, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, 2014, DOI: 10.1007/s40430-014-0199-y

[30] H. Lefebvre, Atomization and sprays, Hemisphere Publishing Corporation, 1989

[31] C.M. Ejim, B.A. Fleck, A. Amirfazli, Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: surface tension and viscosity effects, Fuel, Vol. 86, pp.1534-1544, 2007

[29] M.A. Reddemann, F. Mathieu, D. Martin, R. Kneer, Experimental investigation of spray propagation and mixture formation of tailor-made fuels under engine-relevant conditions, 11th Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, USA, 2009



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Numerical investigation of non-reacting spray characteristics of heavy fuel and alternative fuel under high injection pressure

H. Nowruzi¹, P. Ghadimi^{2*}, S.M. Mirsalim³

¹Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, h.nowruzi@aut.ac.ir

²Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, pghadimi@aut.ac.ir

³Amirkabir University of Technology and Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, mirsalim@csr.ir

*Corresponding Author, Phone Number: +98-21-64543120

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 February 2014

Accepted: 18 August 2014

Keywords:

HFO\n-butanol

High injection pressure

Non-reacting characteristics

OpenFOAM open-source

software

ABSTRACT

Increasing the injection pressure and using blend fuels are two strategies for reducing the emission of diesel engines. Accordingly, in the present study, by using the CFD analysis, the influence of high injection pressures on the non-reacting behavior of the liquid HFO and HFO\n-butanol blend spray as an alternative fuel is studied. Three different injection pressures of 1000, 2000 and 3000 (bar) in a constant volume chamber of the medium speed diesel engine at the temperature of 298 K have been considered. Furthermore, an Eulerian-Lagrangian multiphase scheme has been used for simulating the interaction of the discrete liquid phase of the fuel with continuous air phase, while the Reitz-Diwakar scheme has been utilized for modeling the secondary breakup. Furthermore, numerical results of spray characteristics are validated with experimental data and a favorable agreement has been achieved. Based on obtained results, increasing the injection pressure would cause an increase in the spray penetration length and the spray cone angle and a decrease in the Sauter mean diameter (SMD). However, increasing the injection pressure from 1000 to 2000 (bar) has more significant effect on improving spray characteristics than an increase from 2000 to 3000 (bar).

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