



مطالعه عددی تأثیر پس فشار و دمای محیطی بر مشخصه‌های فواره ترکیب سوخت سنگین - نرمال بوتانول

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: ۰۲۱-۶۴۵۳۳۱۲۰

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۲ اسفند ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۲ تیر ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:

فواره سوخت سنگین - نرمال بوتانول

نرم افزار OpenFOAM

پس فشار

دمای محیطی

در مطالعه حاضر، تأثیرات پس فشار و دمای محیطی بر مشخصه‌های غیرواکنشی و غیرتبخیری فواره سوخت ترکیبی سوخت سنگین - نرمال بوتانول در فشار تزریق ۶۰۰ بار، به صورت عددی مطالعه شده است. سه مقدار متفاوت پس فشار ۱، ۱۴ و ۲۸ بار و دو دمای محیطی متفاوت ۲۹۸ کلوین و ۴۹۸ کلوین برای مطالعه حاضر در محفظه احتراق یک موتور دیزل دور متوسط در نظر گرفته شده است. طرحواره چندحالتی اوپلری - لاگرانژی برای شبیه‌سازی اندرکنش حالت مایع سوخت با حالت پیوسته هوا به کار گرفته شده است. در شبیه‌سازی فواره سوخت از نرم‌افزار متن باز OpenFOAM استفاده شده است. به دلیل عدم وجود داده‌ای تجربی برای مشخصه‌های فواره سوخت ترکیبی سوخت سنگین - نرمال بوتانول، تحلیل حساسیت شبکه‌بندی برای C14H30 به عنوان سوخت سنگین در فشار تزریق ۶۰۰ بار به اجرا درآمده است. نتایج طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره با خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب ۳،۳۴ و ۰،۹۰۵، در مقایسه با داده‌های تجربی با انتخاب مناسب‌ترین شبکه‌بندی، صحت‌گذاری شده است. بر پایه نتایج محاسباتی استخراج شده، کاهش طول نفوذ فواره، افزایش زاویه مخروطی فواره و کاهش SMD با افزایش پس فشار از ۱ بار به ۱۴ بار مشهود است. همچنین، افزایش طول نفوذ فواره و کاهش SMD با افزایش دمای محیطی، مشاهده شده است.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

(۱) مقدمه

موتورهای دیزلی سنگین به دلیل قابلیت تولید قدرت بالا و اقتصاد در مصرف سوخت، به عنوان موتورهای درون سوز مورد علاقه در حوزه‌های گوناگون نظیر صنایع دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، آینده قابل پیش‌بینی نشان‌دهنده گسترش رو به رشد موتورهای دیزل در زمینه‌های مختلف صنعتی است. با این حال، در این موتورها سطح بالایی از تولید NO_x ، دوده و ذرات معلق که منجر به آلودگی آب و هوا می‌گردد، دیده می‌شود. این آلاینده‌ها منجر به مشکلات زیادی در حوزه سلامتی انسان، زیست‌بوم دریایی و سایر بخش‌ها می‌گردد. لذا توجه ویژه‌ای از سوی جامعه بین‌المللی و دولت‌ها برای پایش آلاینده‌ی زیست‌محیطی صورت گرفته است.

از سویی دیگر، امروزه به دلیل روند رو به کاهش نفت و گاز به عنوان منابع انرژی تجدیدناپذیر، راه‌حلی نظیر ترکیب سوخت‌های فسیلی با الکل‌هایی همانند اتانول، متانول و بوتانول مورد توجه قرار گرفته‌است [۱]. الکل‌های مذکور قابلیت تولید بر مبنای توده‌زیست را نیز دارند. از این رو با انتخاب این قبیل سوخت‌های ترکیبی، کاهش آلاینده‌ی و کاهش روند رو به رشد استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر ممکن می‌شود [۲-۴]. در بین برخی از تحقیقات در این زمینه می‌توان اشاره کرد به، راکوپولوس^۱ و همکاران [۵] که در مطالعه‌ی تجربی، احتراق و آلاینده‌ی در موتور دیزل سنگین با سوخت اتانول و نرمال‌بوتانول را بررسی کردند. تحقیقات آن‌ها نشان‌دهنده کاهش NO_x و مصرف سوخت با افزون نرمال‌بوتانول به سوخت دیزل است. در مطالعه‌ی دیگر، دوگان^۲ [۶] کاهش دود، CO ، NO_x و افزایش هیدروکربن با استفاده از سوخت ترکیبی دیزل-نرمال‌بوتانول را در یک موتور دیزل کوچک نشان داده است.

با این حال، سوخت اصلی موتورهای دیزل دور متوسط و دور پایین به دلیل قیمت پایین، سوخت سنگین^۳ (HFO) است. از این رو تحقیقات گسترده‌ای بر روی فواره و احتراق سوخت سنگین در فشار تزریق قوی [۷] و فرآیند ریزکردن [۸] فواره این قبیل سوخت‌ها صورت گرفته و شبیه‌سازی‌هایی برای تبخیر، اشتعال و احتراق سوخت سنگین [۹ و ۱۰] ارائه شده است. از سویی دیگر، مشخصه‌های فواره سوخت با تأثیرگذاری بر فرآیند ریزسازی^۴، بر بازدهی و آلاینده‌ی در موتورهای دیزل تأثیرگذار خواهد بود. از این رو در سال‌های اخیر، مطالعه‌ی مشخصات فواره سوخت در شرایط گوناگون مورد توجه محققان در حوزه موتورهای درون سوز بوده است.

یکی از این مشخصات، فشار تزریق است. تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی تأثیرات فشار قویتر تزریق انجام شده است [۷، ۱۱ و ۱۲].

فشار قویتر، منجر به افزایش سطح ریزسازی شده و در نتیجه مخلوط همگن تری را مهیا می‌کند. بنابراین، بازدهی احتراق افزایش یافته و سطح ذرات معلق کاهش می‌یابد.

از سویی دیگر، پس‌فشار^۵ [۱۳]، دمای محیطی محفظه احتراق [۱۴] و نوع الگوی میدان جریان سوخت [۱۵]، بر روی شکل‌گیری و رفتار فواره سوخت موثر است. امروزه برای پدیده‌شناسی شرایط محیطی متفاوت محفظه احتراق، از شرایط کاملاً پایش شده پس‌فشار و دمای محیطی برای ارزیابی رفتار فواره سوخت استفاده می‌شود. در واقع، تغییرات پس‌فشار و دمای محیطی با تأثیرگذاری بر روی اندرکنش آیرودینامیکی مابین هوای محفظه احتراق و ذرات گسسته سوخت، باعث تغییر مشخصه‌های فواره می‌گردد که می‌تواند منجر به بهبود فرآیند احتراق و شکل‌گیری آلاینده‌ی گردد. یانگ^۶ و همکاران [۱۶] در آزمایشی تجربی، تأثیر پس‌فشار در محدوده ۱۰۰ تا ۱۶۰۰ کیلوپاسکال را بر روی مشخصه‌های فواره یک افشانه ساده در جریان هوای هم‌محور مطالعه کرده‌اند. مطالعه آن‌ها نشان‌دهنده کاهش یکنواخت SMD^7 با افزایش پس‌فشار است. سریچای^۸ و همکاران [۱۷] در مطالعه‌ی تجربی، مشخصه‌های فواره بنزین و اتانول را در فشار قوی محفظه و در دو دمای محیطی متفاوت ۵۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس را مطالعه کرده‌اند. در این مطالعه، مشخصه‌های طول نفوذ فواره، شکل‌گیری مخلوط و زاویه مخروطی فواره بررسی شد. چن^۹ و همکاران [۱۸] به صورت تجربی و عددی با استفاده از روش VOF مشخصه‌های جریان در افشانه گردابه‌ای را تحت شرایط پس‌فشار قوی بررسی کرده‌اند. در مطالعه تجربی و عددی دیگری، پارک^{۱۰} و همکاران [۱۹] تأثیر تغییر سوخت و دمای گاز محیطی را بر مشخصه‌های فواره دیزل مورد بررسی قرار داده‌اند. این تحقیق، نشان‌داد که، افزایش دمای گاز محیطی تا نقطه جوش، باعث رشد مقدار SMD می‌شود. در مطالعه تجربی دیگری، رویسمن و همکاران [۱۳] آزمایشی را برای بررسی تأثیر فشار محیطی بر طول نفوذ فواره دیزل اجرا نموده‌اند. تحلیل‌های آن‌ها منجر به معادله انتشار نوک فواره گردید.

تاکنون، تحقیقات گسترده‌ای به صورت تجربی برای بررسی مشخصه‌های تزریق فواره به کارگرفته شده است. با این حال، دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان ابزاری کارآمد و یاری‌دهنده جهت دستیابی به درک بهتر پدیده‌های فواره سوخت به حساب می‌آید. برنامه‌های عددی و نرم‌افزارهای تجاری نظیر KIVA، STAR-CD و AVL FIRE برای مطالعه فواره توسعه داده شده و به

⁵ Backpressure

⁶ Yang

⁷ Sauter mean diameter (SMD)

⁸ Srichai

⁹ Chen

¹⁰ Park

¹ Rakopoulos

² Dogan

³ Heavy Fuel Oil

⁴ Atomization

همان گونه که در شکل ۱ دیده می شود، نخستین ناحیه پس از ورود سوخت از افشانه، ناحیه ریزکردن است. انتقال فواره سوخت مایع از افشانه تا انتهای ناحیه ریزکردن به عنوان، تجزیه مقدماتی^۴ شناخته می شود.

تفکیک^۵ هسته سوخت مایع به حباب ها^۶، رباطها^۷ و قطرات^۸ پدیده پدیده نخستین در ناحیه ریزکردن است. از سویی دیگر، ظرفیتی بالقوه در حبابها به عنوان انباشتگی های مایع پیوسته برای تبدیل شدن به رباطها را دارند. به صورت مشابه، این ظرفیت به صورت طبیعی در رباطها برای تبدیل شدن به قطرات وجود دارد.

تجزیه ثانویه^۹ قطرات و رباطها در ناحیه فواره متراکم^{۱۰} اتفاق می افتد. مشخصه اصلی این ناحیه حضور فراوان رباطها به عنوان صفحات مایع غیرکروی و عدم حضور حبابهای مایع حجیم است [۲۲]. سرانجام نیز رباطها و قطرات در ناحیه ای به عنوان ناحیه فواره رقیق^{۱۱} به قطراتی کوچکتر، تبدیل می گردد. پدیده های مذکور، به دلیل تأثیر آیرودینامیکی اندرکنش قطرات با حالت گازی در محفظه احتراق، رخ می دهد. علاوه بر این می توان به این نکته اشاره نمود که، متغیرهایی نظیر، اندازه افشانه، چسبندگی، چگالی سوخت، پس فشار و غیره، نقش قابل توجهی بر ساختار بدنه فواره و فرآیند تجزیه آن دارند [۲۲].

۲-۲) مدل سازی محاسباتی

شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی تزریق فواره سوخت HFO\ n-butanol با استفاده از نرم افزار متن باز OpenFOAM صورت گرفته است. علاوه بر این در مطالعه حاضر، رویکرد چندحالتی اویلری- لاگرانژی به عنوان شیوه محاسباتی به منظور اندرکنش سوخت به عنوان حالت گسسته با حالت پیوسته هوا اتخاذ گردیده است. رفتار جریان چندحالتی در طرحواره اویلری با پنج معادله دیفرانسیل پاره ای بیان می گردد. این معادلات شامل قانون بقای جرم، انرژی و اجزاء برداری اندازه حرکت است. علاوه بر این، به واسطه هزینه های محاسباتی کمتر و دقت کافی رویکرد آشفته گسی RANS در مقابل LES و DNS، الگوی استاندارد k-ε در الگوی آشفته گسی RANS در مطالعه حاضر برای سیال تراکم پذیر حالت پیوسته در نظر گرفته شده است.

معادلات با روش حجم محدود گسسته سازی شده است. همچنین منطق MIMPLE (ادغام شده PISO-SIMPLE) با دو گام اصلاحی

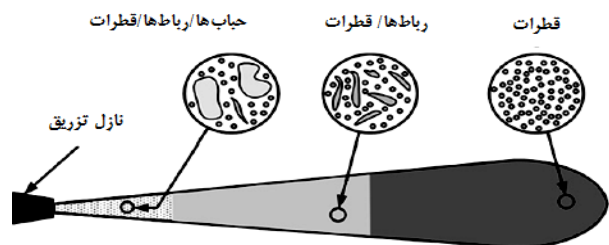
کارگرفته شده اند. علاوه بر این، امروزه توسعه برنامه های متن باز همانند OpenFOAM به عنوان برنامه ای شی گرا براساس زبان ++C به منظور دستیابی به اهداف مذکور، مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مطالعات صورت گرفته با این نرم افزار می توان اشاره داشت به، مطالعاتی برای مدل سازی ریزکردن و تجزیه^۱ [۲۰]، تأثیر سوخت ترکیبی دیزل- بیودیزل بر مشخصه های آلاینده گی موتور دیزل سبک [۲۱] که توسط OpenFOAM صورت گرفته است.

آنچه که از مرور ادبیات فنی مشاهده می شود، تأثیرات حائز اهمیت مشخصه های فواره بر عملکرد و بازدهی موتورهای دیزل است. از سویی دیگر تأثیر پس فشار و دمای محیطی بر مشخصه های فواره سوخت به طور صریحی مشهود است. با این حال، با توجه به تحقیقات ذکر شده، خلاء مطالعه ای در زمینه تأثیرات دمای محیطی و پس فشار بر فواره سوخت های ترکیبی نظیر ترکیب سوخت سنگین- نرمال بوتانول مشهود است. از این رو، بررسی تأثیر تغییرات پس فشار و دمای محیطی بر مشخصه های فواره ترکیب سوخت سنگین- نرمال بوتانول (HFO\ n-butanol) به عنوان سوخت تزریق شده در محفظه احتراق یک موتور دیزل دور متوسط، نوآورانه بودن مطالعه حاضر است. در این تحقیق، مشخصه های غیرواکنشی^۲ و غیرتبخیری^۳ غیرتبخیری^۳ فواره سوخت ترکیبی HFO\ n-butanol در سه پس فشار متفاوت و در دو دمای محیطی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این، SMD، طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره برای ارزیابی رفتار فواره بررسی می گردند.

۲) تشریح فنی مسأله

۲-۱) پدیده شناسی فواره مایع

فواره مایع با سرعت تزریق به داخل محیط گازی محفظه احتراق نفوذ می کند. این محیط گازی ترکیبی از هوا و گازهای داغ و یا گازهای فرآوری شده از چرخش دوباره است. در مقاله حاضر هوای خالص به عنوان محیط گازی در نظر گرفته شده است. طرحواره ای از فواره مایع با نواحی مختلف تجزیه در شکل ۱ مشاهده می شود.



شکل ۱: طرحواره ای از نواحی مختلف تجزیه یک فواره مایع [۲۲]

- 1 Breakup
- 2 Non-reacting
- 3 Non-evaporating

4 Primary breakup

5 Decomposition

6 Blobs

7 Ligaments

8 Droplets

9 Secondary breakup

10 Dense spray

11 Dilute spray

برای حل معادلات جفت سرعت-فشار در نایبراستوکس استفاده شده است. علاوه بر این، حد همگرایی RMS در حل معادلات حاکم 10^{-6} در نظر گرفته شده است. از سویی دیگر، شبیه‌سازی قطرات مایع با رویکرد مسیریابی ذره‌ای لاگرانژی^۱ (LPT) انجام شده است.

برای محاسبه معادلات موردنظر، تأثیرات حالت گسسته سوخت بر گاز به‌واسطه اعمال جمله منبع در معادله بقای حالت گاز در نظر گرفته می‌شود. همچنین، تأثیر حالت گاز بر پراکنش حالت مایع با اعمال مقادیر محلی دما، سرعت و سایر متغیرهای گاز به عنوان شرایط مرزی در سلول شبکه‌ای که قطرات مایع در هر گام زمانی از آن عبور می‌کنند، بدست می‌آید. تغییرات جرم توسط معادله (۱) تحت عنوان معادله بقای جرم، محاسبه می‌گردد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = S_{ev} \quad (1)$$

سهم تبخیر سوخت به عنوان جمله منبع در معادله (۱) دیده می‌شود. همچنین، بقای اندازه حرکت با در نظرگیری تمامی متغیرهای مؤثر از قبیل، همرفتی در اندازه حرکت با استفاده از معادله (۲) بدست می‌آید.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_{i,mo} \quad (2)$$

اندرکنش حالت پیوسته هوا با حالت مایع فواره با جمله منبع معادله (۲) در نظر گرفته می‌شود. معادله بقای انرژی نیز از طریق معادله (۳) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j h - \frac{\rho v}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} + S_{h,e} \quad (3)$$

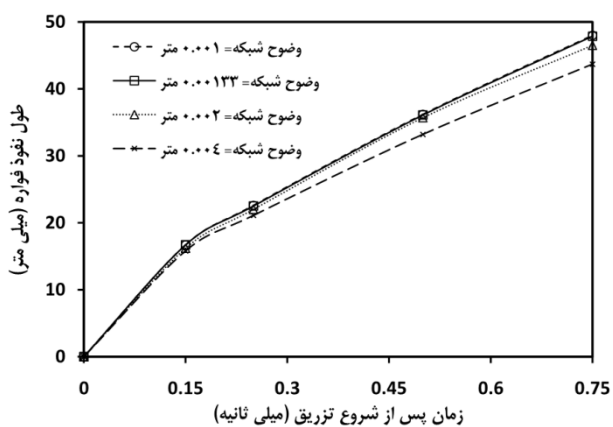
جایی که انتقال حرارت از حالت مایع با استفاده از جمله منبع نشان داده شده است. از سویی دیگر، شکل‌گیری حالت مایع به‌واسطه پراکنده کردن قطرات سوخت، فرضی اساسی برای در نظرگیری LPT است. از این‌رو، در نظرگیری قطرات به عنوان موجودیت‌هایی گسسته، در رویکردهای آماری عملی است. معادله فواره بیان‌کننده بقای احتمال در فضای متغیرهای تصادفی است [۲۳]. معادله بقای احتمال توسط معادله (۴) بدست می‌آید.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla_x \cdot (fu) + \nabla_v \cdot \left(f \frac{\partial u}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(f \frac{\partial r}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial T} \left(f \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(f \frac{\partial y}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial \dot{y}} \left(f \frac{\partial \dot{y}}{\partial t} \right) = f_{co} + f_{br} \quad (4)$$

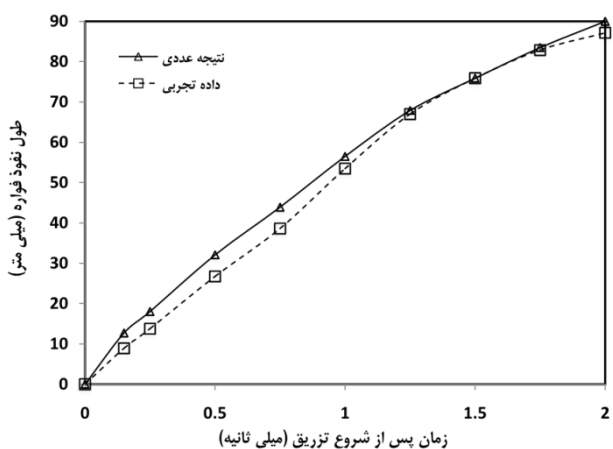
جایی که f با داشتن معادله احتمالی $f(x, u, t, r, T, y, \dot{y}) dx du dt dr dT dy d\dot{y}$ قطرات در واحد حجم در موقعیت مکانی (x) ، زمان (t) ، شعاع در برد r و $r + dr$ با دما و سرعتی به ترتیب مابین T تا $T + dT$ و u تا $u + du$ با متغیرهای اعوجاج قطرات مابین y تا

۲-۳) تحلیل حساسیت وضوح شبکه‌بندی و صحنه‌گذاری

بر اساس مرور ادبیات می‌توان یافت که، نتایجی تجربی از مشخصه‌های غیرواکنشی و غیرتبخیری از حالت مایع فواره HFO\ n-butanol برای صحنه‌گذاری نتایج عددی وجود ندارد. از این‌رو در گام نخست، پالایش شبکه‌بندی، می‌تواند انتخابی مناسب باشد. برای این هدف، در ابتدا مطالعه وضوح شبکه‌بندی و سپس تطابق شبیه‌سازی عددی شبکه‌بندی مناسب انتخاب‌شده با نتایج تجربی برای HFO انجام شده است. از این‌رو در ابتدا تحلیل حساسیت شبکه‌بندی بر روی طول نفوذ برای HFO در فشار تزریق ۶۰۰ بار، مطابق شکل ۲ انجام شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، وضوح شبکه‌بندی ۰,۰۰۱۳۳ متر دارای تطابق قابل‌قبولی با شبکه‌بندی ریزتر است. در ادامه، بر پایه نتایج شبکه‌بندی مناسب از شکل ۲، مقایسه نتایج عددی طول نفوذ و زاویه فواره با داده‌های تجربی به ترتیب در اشکال ۳ و ۴ ارائه شده است.

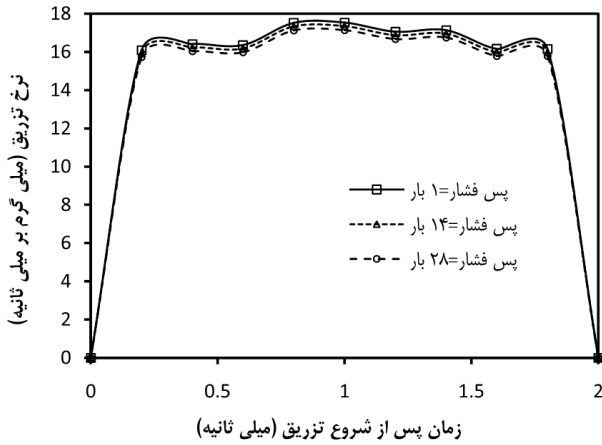


شکل ۲: آزمودن استقلال از شبکه طول نفوذ فواره HFO در ۶۰۰ بار



شکل ۳: مقایسه نتایج عددی و تجربی طول نفوذ فواره HFO در ۶۰۰ بار

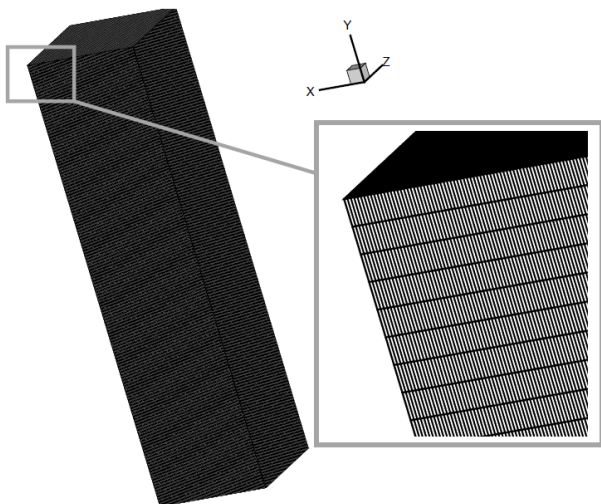
¹ Lagrangian Particle Tracking



شکل ۵: شار جرمی تزریق در پس فشارهای مختلف

جدول ۱: مشخصه‌های تزریق و محفظه احتراق

واحد	مقدار مشخصه	نام مشخصه	مشخصه‌های محفظه احتراق
mm	۴۵۰	طول	مشخصه‌های محفظه احتراق
mm	۱۵۰	قطر	
bar	۲۸-۱۴-۱	پس فشار	مشخصه‌های تزریق
K	۴۹۸-۲۹۸	دمای محیطی	
mm	۰,۲۷	مشخصه‌های تزریق	
bar	۶۰۰		فشار تزریق سوخت
K	۳۷۵	دمای اولیه سوخت	
mg	۳۴	جرم کل تزریق	



شکل ۶: ساختار شبکه محاسباتی

سوخت ترکیبی در مطالعه حاضر، مشتمل بر ۸۰٪ C14H30 به عنوان سوخت سنگین و ۲۰٪ C4H100 به عنوان نرمال بوتانول با ساختار ملکولی شکل ۷ بوده که در نرم افزار متن باز OpenFOAM با مشخصه‌های فیزیکی جدول ۲ اعمال شده است.

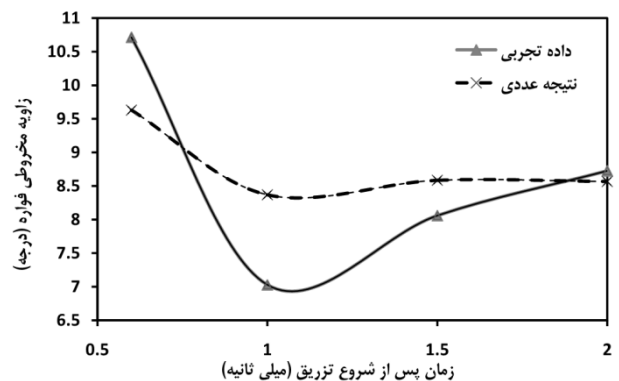
بر پایه شکل‌های ۳ و ۴ تطابق مناسبی مابین نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود. خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره به ترتیب ۳,۳۴ و ۰,۹۰۵ بدست می‌آید.

۲-۴) زیرمدل‌های فواره

ابعاد کوچک و چگالی بالا در مجاورت افشانه منجر به پیچیدگی مطالعه تجزیه مقدماتی در فشارهای تزریق بالا می‌گردد. بنابراین، در برخی از روش‌ها با نادیده گرفتن تجزیه‌های مقدماتی هسته مایع، قطرات تزریق شده در فواره به عنوان شرایط اولیه برای تجزیه‌های ثانویه استفاده می‌شود. چندین شیوه برای شبیه‌سازی تجزیه ثانویه وجود دارد. در شبیه‌سازی حاضر، الگوی تجزیه ثانویه Reitz-Diwakar ارائه شده توسط ریتز و دیواکار به کارگرفته شده است [۲۴]. مضافاً اینکه، در الگوی تجزیه ثانویه مورد استفاده در مطالعه حاضر، ضریب تجزیه استریپینگ^۱ و ضریب تجزیه بگ^۲ به ترتیب ۰,۵ و ۶ مقدار دهی شده است.

۲-۵) محفظه احتراق و مشخصه‌های تزریق

در مطالعه حاضر، سوخت ترکیبی HFO\n-butanol از افشانه‌ای تک‌سوراخ با قطر نازل ۲۷۰ میکرومتر به داخل محفظه حجم ثابت تزریق شده است. شار جرمی تزریق در پس فشارهای مختلف بر اساس مطالعه پیکت و همکاران [۲۵]، همانند شکل ۲ محاسبه شده است. سپس شار جرمی محاسبه شده، به شبیه‌سازی حاضر اعمال شده است. مشخصه‌های تزریق و محفظه احتراق در جدول ۱ ارائه شده است. برپایه جدول ۱، در نظرگیری پس فشارهای مختلف از مقدار فشار اتمسفری تا مقادیر بزرگتر پس فشار دیده می‌شود. علاوه بر این، دو دمای متفاوت محیطی شامل دمای اتاق و دمایی گرم، نیز مطالعه شد. شبکه محاسباتی متناسب با مشخصه‌های ارائه شده برای محفظه احتراق در جدول ۱، در شکل ۶ مشاهده می‌گردد.



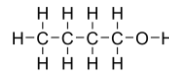
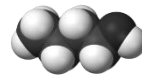
شکل ۴: مقایسه نتایج عددی و تجربی زاویه مخروطی فواره HFO در ۶۰۰ بار [۷]

¹ Stripping breakup coefficient

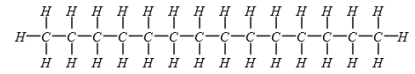
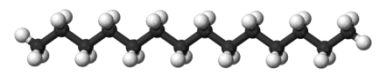
² Bag Breakup Coefficient

این پدیده مشاهده می‌شود. در حالی که در پس فشار ۱ بار، با توزیعی تقریباً یکنواخت، فواره در داخل محفظه شکل گرفته است. در ادامه، تأثیرات پس فشار و دمای محیطی بر طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره به عنوان مشخصه‌های کلان فواره سوخت و SMD به عنوان مشخصه خرد فواره مایع مطالعه شده است.

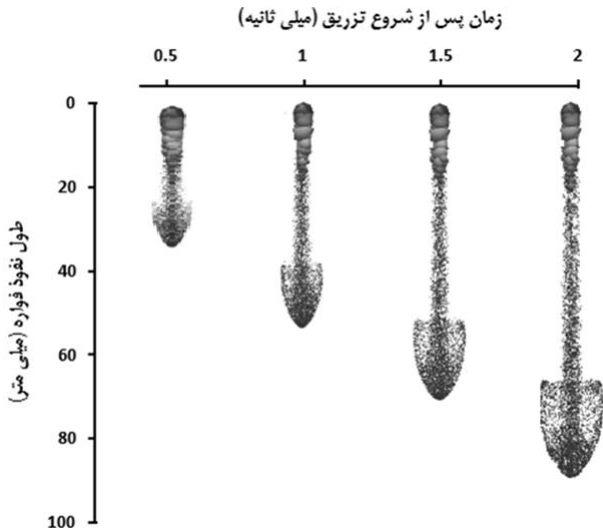
نرمال بوتانول



سوخت سنگین (C14H30)



شکل ۷: ساختار ملکولی سوخت سنگین در مقایسه با نرمال بوتانول و داشتن زنجیره هیدروکربنی متشابه



شکل ۸: ساختار بدنه فواره سوخت مایع در دمای ۲۹۸ کلوین و پس فشار ۱۴ بار

جدول ۲: مشخصه‌های سوخت سنگین و نرمال بوتانول

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

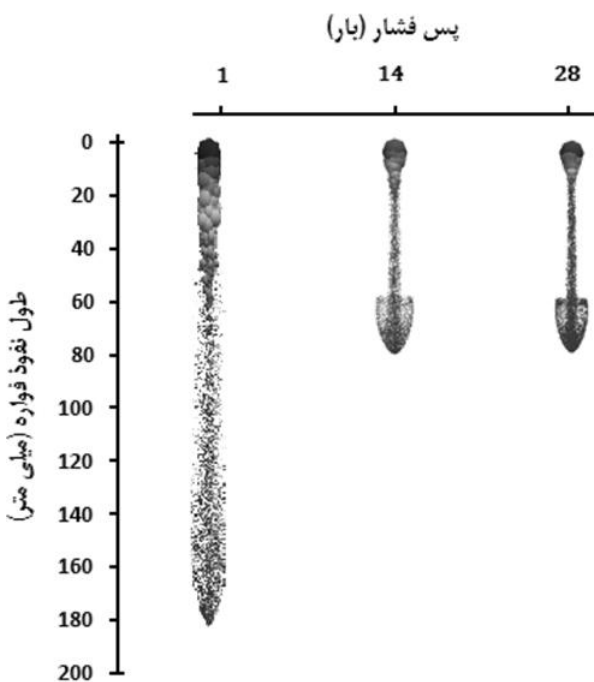
مشخصه‌های فیزیکی ذکر شده در جدول ۲ تأثیری اساسی بر رفتار فواره دارد. کشش سطحی از متلاشی شدن قطره سوخت ممانعت می‌کند. با این حال، چسبندگی، تجزیه را با ایجاد نیرویی درخلاف آشفته‌گی سطح قطره، به تأخیر می‌اندازد. در ادامه، نتایج محاسباتی تأثیر پس فشار و دمای محیطی بر مشخصه‌های فواره سوخت ترکیبی ارائه شده است.

۳) بحث و بررسی نتایج

۳-۱) ساختار بدنه فواره مایع

ساختار بدنه فواره پس از تزریق سوخت از افشانه در طول زمان پیشروی در داخل محفظه احتراق، شکل می‌گیرد. شکل‌گیری زمانی ساختار بدنه فواره سوخت ترکیبی HFO\ n-butanol در دمای ۲۹۸ کلوین و در پس فشار ۱۴ بار در شکل ۸ دیده می‌شود. بر مبنای شکل ۸ می‌توان، هسته سوخت مایع با بیشترین اندازه در خروجی از افشانه و سیر تدریجی تجزیه هسته و سوخت مایع به قطرات ریزتر را در طی تجزیه مقدماتی و ثانویه مشاهده کرد. علاوه بر این، افزایش گستره نوک فواره در طول زمان در داخل محفظه احتراق نیز دیده می‌شود.

پس فشار نقشی کلیدی بر روی ساختار فواره دارد. ساختار بدنه فواره سوخت مایع در زمان ثابت ۱,۵ میلی‌ثانیه و در دمای ۲۹۸ کلوین و در پس فشارهای مختلف برای سوخت ترکیبی HFO\ n-butanol در شکل ۹ ارائه شده است. بر پایه شکل ۹ مشهود است که، در پس فشارهای بزرگتر، لبه‌های جانبی فواره به سمت بالا برگشته است. دلیل این مسئله، ایجاد امواج ضربه‌ای^۱ در هوای محفظه احتراق بلافاصله پس از تزریق است. لذا در پس فشارهای بزرگتر ۱۴ و ۲۸ بار



شکل ۹: ساختار بدنه فواره سوخت مایع در دمای ۲۹۸ کلوین و زمان ۱,۵ میلی‌ثانیه پس از تزریق در پس فشارهای مختلف

¹ Shock Wave

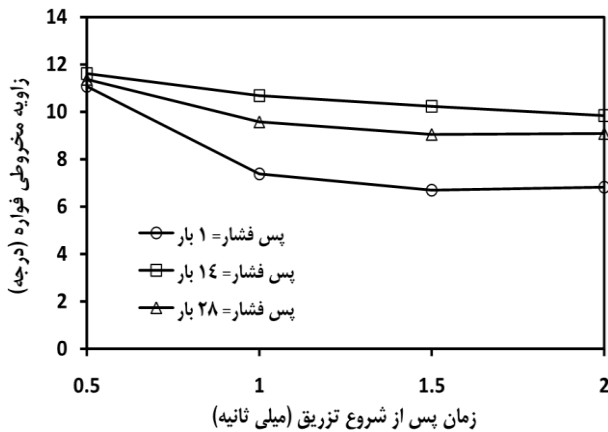
۲-۳) بررسی تأثیرات پس فشار بر مشخصات فواره

مقایسه طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره مایع سوخت ترکیبی HFO\n-butanol در دمای ۲۹۸ کلوین و در پس فشارهای مختلف به ترتیب در اشکال ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. همچنین بایستی بدین نکته توجه داشت که، زاویه مابین دو خطی که از نازل افشانه شروع شده و تا دو نقطه‌ای که به صورت شعاعی، بیشینه فاصله را از هم دارند، معیار اندازه‌گیری زاویه مخروطی فواره است.

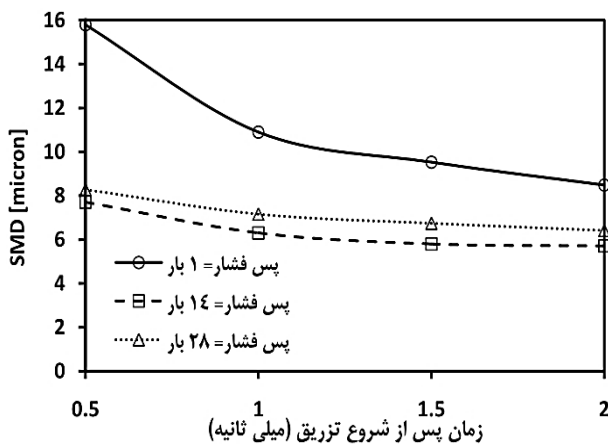
برپایه شکل ۱۰ می‌توان استنتاج نمود که، با افزایش پس فشار، روند زمانی طول نفوذ فواره، به دلیل تقویت مقاومت هوای محیطی، کاهش یافته است. علاوه براین، نرخ رشد طول نفوذ فواره در ابتدای تزریق دارای روندی تقریباً خطی بوده، اما پس از آن به دلیل شتاب کاهنده آیرودینامیکی، با روندی مجانبی توسعه پیدا کرده است. همچنین، کاهش طول نفوذ فواره از پس فشار ۱ بار به ۱۴ بار نسبت به افزایش پس فشار از ۱۴ بار به ۲۸ بار، بسیار مشهودتر است.

از سویی دیگر بر مبنای شکل ۱۱ دیده می‌شود که، در شروع تزریق، پس فشار ۱ بار، دارای زاویه مخروطی بزرگتری بوده و با شیب تندتر در گستره زمانی کاهش یافته است. در حالی که پس فشارهای ۱۴ بار و ۲۸ بار، به دلیل مقاومت قوی پس فشار، مقدار بزرگتری از زاویه مخروطی فواره در شروع تزریق داشته و سپس با نرخ تغییرات پایینی کاهش یافته است. البته ذکر این نکته ضروری است که، افزایش در زاویه مخروطی فواره، منجر به شکل‌گیری سریع‌تر مخلوط سوخت و هوا و تجزیه بهتر می‌گردد.

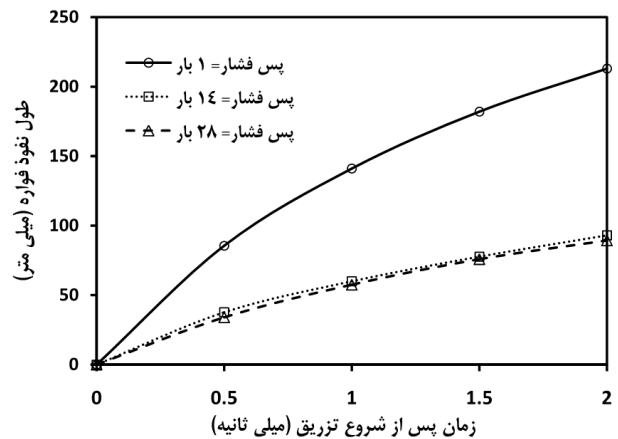
مقایسه SMD فواره سوخت ترکیبی HFO\n-butanol در دمای ۲۹۸ کلوین و در پس فشارهای مختلف در شکل ۱۲ ارائه شده است. مشخصه SMD به صورت متوسط قطر تمامی قطرات در زمانی مشخص تعریف می‌گردد. در لحظه شروع تزریق دارای مقداری به اندازه‌ی سوراخ نازل افشانه بوده و سپس با فرآیند ریز کردن کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، پس فشار ۱ بار دارای بیشترین مقدار SMD بوده و با افزایش پس فشار تا ۱۴ بار، به دلیل بهبود فرآیند ریز کردن، این مقدار کاهش یافته است. اما در پس فشار ۲۸ بار، SMD بیشتری نسبت به ۱۴ بار مشاهده می‌شود. از سویی دیگر، نرخ کاهش SMD در پس فشار ضعیفتر به دلیل کاهش زمان تجزیه، بزرگتر است. در ادامه، تأثیر دمای محیطی بر مشخصه‌های فواره مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۱۱: مقایسه زاویه مخروطی فواره مایع در پس فشارهای مختلف در دمای ۲۹۸ کلوین



شکل ۱۲: مقایسه SMD فواره مایع در پس فشارهای مختلف در دمای ۲۹۸ کلوین



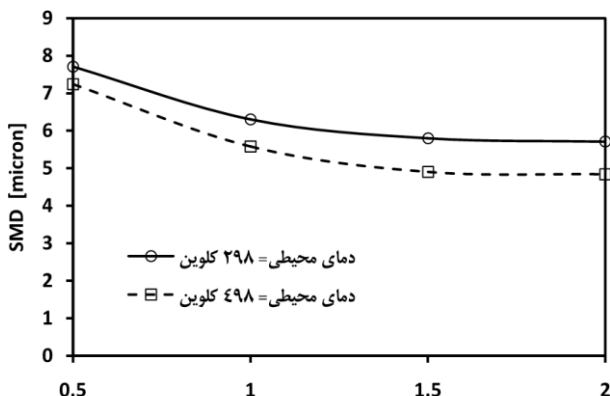
شکل ۱۰: مقایسه طول نفوذ فواره مایع در پس فشارهای مختلف در دمای ۲۹۸ کلوین

بر اساس شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که، طول نفوذ فواره با افزایش دمای محیطی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش، کاهش چگالی محیط گازی محفظه احتراق به عنوان نیروی آئرو دینامیکی مقاوم در برابر نفوذ فواره سوخت در داخل محفظه احتراق، می‌باشد. از طرف دیگر، به دلیل افزایش تأثیر فشردگی^۱ در اثر افزایش دما بر روی فواره سوخت، طول نفوذ فواره در دمای گرمتر افزایش یافته است. علاوه بر این، با افزایش دما نرخ رشد زمانی طول نفوذ، افزایش یافته است. از سویی دیگر بر پایه شکل ۱۴ می‌توان دریافت که، افزایش دمای محیطی باعث کاهش SMD شده و روند کاهشی متشابهی در مقدار SMD در دو دمای مختلف محیطی دیده می‌شود.

مقایسه SMD فواره سوخت ترکیبی HFO\n-butanol در پس فشار ۱۴ بار و در دماهای مختلف محیطی در شکل ۱۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، افزایش دمای محیطی منجر به کاهش SMD شده و نرخ کاهش زمانی این مشخصه را نیز افزایش داده است.

۴ نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تأثیرات دمای محیطی و پس فشار بر مشخصه‌های فواره سوخت ترکیبی HFO\n-butanol، مشتمل بر ۸۰٪ C14H30 به عنوان سوخت سنگین و ۲۰٪ C4H100 نرمال بوتانول به عنوان الکل ترکیبی، با شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی فواره سوخت مایع مطالعه شد. سه پس فشار متفاوت ۱ بار، ۱۴ بار و ۲۸ بار و دو دمای محیطی مختلف ۲۹۸ و ۴۹۸ کلوین مدنظر بوده است. طرحواره غیرواکنشی و غیرتبخیری با استفاده از رویکرد چندحالتی اولیری- لاگرانژی برای شبیه‌سازی اندرکنش حالت مایع سوخت HFO\n-butanol با حالت پیوسته هوا به کارگرفته شده است.

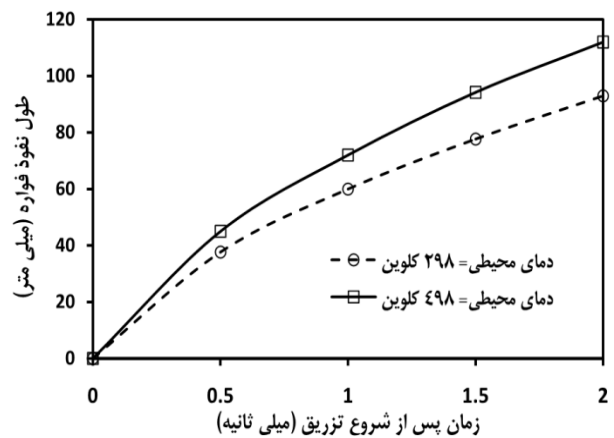


شکل ۱۵: مقایسه SMD فواره مایع در دماهای محیطی مختلف در پس فشار ۱۴ بار

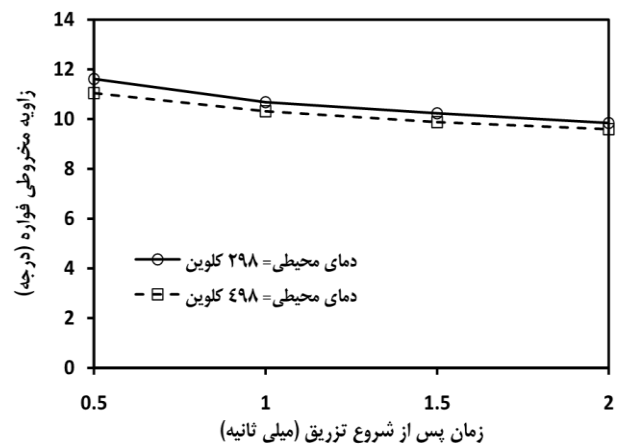
۳-۳ بررسی تأثیرات دمای محیطی بر مشخصات فواره

تأثیرگذاری پس فشار بر روی مشخصه‌های فواره سوخت با تأثیر دمای محیطی بر این مشخصه‌ها، متفاوت است. این در حالیست که پس فشار به صورت یک موج شوکی و نیروی مقاوم آئرو دینامیکی بر روی مشخصه‌های فواره و علی‌الخصوص طول نفوذ فواره، تأثیر می‌گذارد. از طرف دیگر، مشخصه‌های فیزیکی سوخت تزریق شده، متأثر از دمای محیطی است. چگونگی تأثیرگذاری دمای محیطی بدین صورت است که با تغییر مشخصه‌های فیزیکی سوخت، مشخصه‌های فواره در طی فرآیند تزریق تغییر می‌یابد.

مقایسه طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره مایع سوخت ترکیبی HFO\n-butanol در پس فشار ثابت ۱۴ بار و در دماهای محیطی مختلف به ترتیب در اشکال ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.



شکل ۱۳: مقایسه طول نفوذ فواره مایع در دماهای محیطی مختلف در پس فشار ۱۴ بار



شکل ۱۴: مقایسه زاویه مخروطی فواره مایع در دماهای محیطی مختلف در پس فشار ۱۴ بار

¹ Squeezing effect

τ_{ij}	تانسور تنش
v	چسبندگی
r	شعاع قطره
Pr	عدد پرانتل
P	فشار
T	دما

References

- [1] S. Kumar, J. H. Cho, J. Park, I. 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] M. Yao, Q. Zhang, H. Liu, Z. Zheng, P. Zhang, Diesel engine combustion control: Medium or heavy EGR, SAE International, 2010
- [5] 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
- [6] O. Dogan, The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions, Fuel, Vol. 90, No. 7, pp. 2467-2472, 2011
- [7] C. Fink, B. Buchholz, M. Niendorf, H. Harndorf, Injection spray analyses from medium speed engines using marine fuels, ILASS Conference, Italy, 2008
- [8] N. Kyriakides, C. Chryssakis, L. Kaiktsis, Influence of heavy fuel properties on spray atomization for marine diesel engine applications, SAE International, 2009
- [9] D. Struckmeier, D. Tsuru, S. Kawauchi, H. Tajima, Multi-component modeling of evaporation, ignition and combustion processes of heavy residual fuel oil, SAE International, 2009
- [10] C. Chryssakis, K. Pantazis, L. Kaiktsis, Combustion modeling with heavy fuel oil for large marine diesel engine applications, CIMAC Congress, Norway, 2010
- [11] X. Wang, Z. Huang, O. Abiola Kutu, 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

با استفاده از رویکرد مسیریابی ذره‌ای لاگرانژی در نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM. شبیه‌سازی قطرات مایع صورت گرفت. برای شبیه‌سازی در مطالعه حاضر، الگوی تجزیه ثانویه Reitz-Diwakar و الگوی آشفتنگی استاندارد k- ϵ انتخاب گردیده است. برای شناخت رفتار فواره سوخت در شرایط مختلف، ساختار بدنه فواره، طول نفوذ، زاویه مخروطی فواره به عنوان مشخصه‌های کلان و SMD به عنوان مشخصه خرد مورد مطالعه قرار گرفته است. از سوی دیگر، برای شبیه‌سازی C14H30 و C4H100 به عنوان سوخت‌سنگین و نرمال‌بوتانول در نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM، مشخصه‌های کتابخانه‌ای این نرم‌افزار توسعه داده شده است. همچنین تحلیل حساسیت شبکه‌بندی برای HFO اجرا شد. علاوه بر این، نتایج طول نفوذ و زاویه مخروطی فواره با خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) به ترتیب ۳,۳۴ و ۰,۹۰۵، در مقایسه با داده‌های تجربی صحت‌گذاری شده است. از میان مهمترین نتایج استخراج شده از مطالعه حاضر، می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

۱- در پس‌فشارهای قوی، به دلیل توسعه موجی ضربه‌ای در هوای محفظه احتراق، بازگشت لبه جانبی در ساختار بدنه فواره مشاهده می‌شود. همچنین، توسعه نوک فواره در طول توسعه در محفظه مشهود است.

۲- افزایش پس‌فشار، باعث کاهش طول نفوذ فواره، به ویژه از ۱ بار به ۱۴ بار می‌گردد.

۳- افزایش پس‌فشار تا ۱۴ بار باعث افزایش زاویه مخروطی فواره می‌شود. در حالی که تغییرات پس‌فشار از ۱۴ به ۲۸ بار، کاهش زاویه مخروطی فواره را به همراه خواهد داشت.

۴- هموارشدن نرخ کاهش SMD با افزایش پس‌فشار مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش پس‌فشار از ۱ به ۱۴ بار، کاهش SMD و از ۱۴ به ۲۸ بار، افزایش این متغیر دیده می‌شود.

۵- با افزایش دما از ۲۹۸ به ۴۹۸ کلین، افزایش طول نفوذ فواره، کاهش قابل اغماض زاویه مخروطی فواره و کاهش SMD دیده شده است.

فهرست علائم

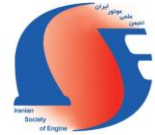
S_{ev}	سهم تبخیر سوخت به عنوان جمله منبع
$S_{i,mo}$	اندرکنش هوا با حالت مایع فواره به عنوان جمله منبع
S_{he}	انتقال حرارت از حالت مایع با استفاده به عنوان جمله منبع
f_{co}	سهم تأثیر تصادم قطرات به عنوان جمله منبع
f_{br}	سهم تأثیر تجزیه قطرات به عنوان جمله منبع
ρ	چگالی
u_i	مولفه سرعت
h	آنتالپی

- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 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
- [23] F.A. Williams, *Combustion theory*, Redwood City, Addison-Wesley, USA, 1985
- [24] R.D. Reitz, R. Diwakar, *Effect of drop breakup on fuel sprays*, SAE International, 1986
- [25] L. Pickett, J. Manin, R. Payri, M. Bardi, *Transient rate of injection effects on spray development*, SAE International, 2013
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] A. Ghasemi, M.H. Djavareshkian, 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
- [16] 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
- [17] P. Srichai, C. Chareonphonphanich, P. Ornman, P.K.N. Chollacoop, M. Tongroon, Spray characteristics of ethanol and gasoline in a high-pressure chamber by schlieren photography technique, *The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Thailand, 2011
- [18] 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



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Numerical study of effect of ambient backpressure and temperature on spray characteristics of heavy fuel oil/n-butanol blend

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: 09 March 2014

Accepted: 23 June 2014

Keywords:

HFO/n-butanol

OpenFOAM open-source software

Backpressure

Ambient temperature

ABSTRACT

In the present study, the influence of the backpressure and the ambient temperature on non-reacting and non-evaporating characteristics of heavy fuel oil (HFO)/n-butanol blend at the injection pressure of 600 (bar) is numerically studied. Three different backpressures of 1, 14 and 28 bar and two different ambient temperatures of 298 K and 498 K have been considered in the combustion chamber of the medium speed engine. For the simulation of the liquid phase of the fuel interaction with the continuous air phase, an Eulerian-Lagrangian multiphase scheme was implemented. The open-source CFD toolbox of OpenFOAM was used for the present study. Due to the lack of experimental data in the context for HFO/n-butanol characteristics, the mesh resolution sensitivity analysis of C14H30 as a HFO at the injection pressure of 600 (bar) was carried out. Consequently, numerical results of the spray penetration length and the spray cone angle were validated by available experimental data with RMS of 3.34 and 0.905, respectively. Based on computational results, an increase in the backpressure from 1 to 14 (bar) decreased the spray penetration length, enhanced the spray cone angle, while reduced the SMD. Furthermore, due to the increase in the ambient temperature, the spray penetration length increased, while the SMD decreased.

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