



بررسی اثرات تغییر نرخ هیدروژن بر متغیرهای احتراقی، آلاینده‌گی و اقتصاد سوخت در موتوری تزریق مستقیم

کیانوش شجاع^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، Kianoosh.shojae@semnan.ac.ir
^{*} نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۵ آبان ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۳ مرداد ۱۳۹۶

کلیدواژه‌ها:

سوخت مکمل هیدروژنی

موتور تزریق مستقیم

دور موتور

زمان تزریق

متغیر آشفستگی

چرخش هوا

چکیده

امروزه هیدروژن به عنوان سوختی پاک نسبت به سوخت‌های معمول برای استفاده در سامانه‌های احتراقی مختلف مورد توجه مراکز تحقیقاتی قرار گرفته است. دلیل این موضوع ایجاد آلاینده‌های بسیار کمتر از سایر سوخت‌های متداول است. با این حال، نیاز است تا اثرات استفاده از سوخت هیدروژن در شرایط عملیاتی بررسی شوند. شرایطی مانند دور موتورهای مختلف برای رسیدن به یک حالت تعادل کلی با در نظر گرفتن اکثر آلاینده‌ها و متغیرهای احتراقی، می‌تواند جزء این محدوده باشند. در پژوهش حاضر تمرکز اثر کسر جرمی هیدروژن تزریقی در محدوده وسیعی از دور موتورها (۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ دور) بررسی شده است. تحلیل‌ها با در نظر گرفتن اکثر آلاینده‌های منتشر شده (دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن، دوده، هیدروکربن) در کنار متغیرهای احتراقی و اقتصاد سوخت (مصرف سوخت ویژه ترمزی) انجام شده‌اند. بررسی‌ها برای دستیابی به حالت تعادل کلی در موتور بار سنگین ISM 370 اند. برای ایجاد هندسه‌های لازم، شبیه‌سازی قسمت‌های مختلف موتور و تحلیل عددی از نرم‌افزار AVL FIRE استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند چرخش هوا در استوانه قبل از پاشش سوخت دیزل مناسب است و افزایش هیدروژن تزریقی سبب افزایش آشفستگی هوا می‌شود. با بررسی نرخ‌های مختلف هیدروژن (%۰٫۸۶، %۱٫۰۲۷، %۱٫۲۸ و %۱٫۷) در نسبت‌های تعادلی مشخص، ۱٫۰۲۷ درصد جرمی هیدروژن از هوای ورودی برای ایجاد تعادلی بین اکثر آلاینده‌های تولیدی و متغیرهای احتراقی مناسب شناخته شد. همچنین انتخاب زمان تزریق ۲ درجه قبل از نقطه مکث بالا، مزیت بهره‌گیری از کسر جرمی ۱٫۰۲۷ درصد هیدروژن را دو چندان می‌کند.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



۱- مقدمه

امروزه با توجه به مصرف روزافزون سوخت‌های سنگواره‌ای و افزایش آلایندگی‌های زیست محیطی در جو زمین تقاضا برای تولید و استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر افزایش یافته است. به همین دلیل، از نظر آلایندگی و احتراقی در قرن ۲۱، سوخت هیدروژنی بسیار امیدوارکننده است. این سوخت تجدیدپذیر دارای حد اشتعال‌پذیری گسترده، انرژی اشتعال کم و نرخ احتراق تند است [۱-۲].

سوخت هیدروژنی در موتورهای درون‌سوز در حالت مایع و یا گازی قابل استفاده است. هیدروژن مایع می‌تواند با سوخت دیزلی عادی ترکیب و از طریق افشانه وارد محفظه احتراق کرد. در حالت گازی این سوخت به صورت یک ترکیب اضافه بر هوای ورودی از طریق دریچه هوا وارد استوانه می‌شود.

موتورهای دیزل به دلیل داشتن بازده گرمایی مناسب، آلایندگی‌های متعادل‌تر و مصرف سوخت کمتر نسبت به موتورهای احتراق جرقه‌ای، جایگاه ویژه‌ای در صنعت و مراکز تحقیقاتی دارند [۳-۴]. بنابراین در بیشتر کارهای سنگین، موتورهای اشتعال تراکمی نسبت به موتورهای اشتعال جرقه‌ای ترجیح داده می‌شوند. همین موضوع دلیل اصلی افزایش تولید و استفاده بیشتر از موتورهای احتراق تراکمی است [۵].

زمان، دما، فشار و راهبرد تزریق تأثیر بسیاری بر مقدار آلایندگی‌های خروجی و متغیرهای احتراقی دارد. به این صورت که اگر زمان تزریق سوخت حتی به اندازه یک درجه میل‌لنگ تغییر کند، اکثر متغیرهای خودرو مانند انتشار دی اکسید کربن، مونوکسید کربن و متغیرهای عملکردی مانند توان داخلی، مصرف سوخت ویژه ترمزی، بازدهی گرمایی و... تغییر خواهند کرد. تحقیقات نشان داده است که، جلو اندازی زمان تزریق سبب افزایش دمای محفظه احتراق می‌شود و همین موضوع سبب انتشار بیشتر اکسیدهای ازت و کاهش دوده به سبب افزایش فرآیند اکسید شدن دوده می‌شود [۶-۸].

علاوه بر سوخت‌های ترکیبی مایع، موتورهای دوگانه دیزل و گاز طبیعی نیز عملکرد مناسبی دارند. مطالعات نشان داده است که در موتورهای دوگانه، افزایش مقدار سوخت گازی، فشار داخل استوانه را بشدت افزایش می‌دهد [۹]. بنابراین ممکن است استفاده از سوخت هیدروژنی در حالت گازی به صورت مکملی برای سوخت دیزل مفید باشد و این موضوع نیز نیاز به بررسی بیشتر دارد.

در پژوهش‌های مشابه [۱۰-۱۱]، اثر افزودن هیدروژن از طریق دریچه هوا بررسی شده است. با این حال این بررسی‌ها عموماً در سرعت‌های محدودی صورت گرفته‌اند و تعداد محدودی از آلایندگی‌ها و متغیرهای قدرت بررسی شده‌اند. بنابراین به نظر می‌رسد بررسی اثرات هیدروژن اضافی در موتور درون‌سوز دیزل ISM 370 نیازی ضروری است. شایان ذکر است که، تحلیل موتور با شرایط عملیاتی مختلف مانند دور موتور، در کنار بررسی متغیرهای مختلف مانند دما و زمان تزریق ضروری و مؤثر است.

مطالعات نشان داده است تنظیم مناسب زمان تزریق و یا راهبرد تزریق موتور سبب کاهش بسیاری از آلایندگی‌ها می‌شود و در بهبود متغیرهای قدرت و بازدهی موتور نیز بسیار مؤثر است [۱۲-۱۴].

در این پژوهش اثر تغییر مقدار کسر جرمی هیدروژن در هوای ورودی در نسبت‌های تعادلی منحصر به آن بررسی شده است. مواردی مانند آلایندگی‌های زیست محیطی همچون دی‌اکسید کربن و مونوکسید کربن، متغیرهای احتراقی مانند توان داخلی و بازده گرمایی و در آخر متغیر اقتصاد سوخت یعنی مصرف سوخت ویژه ترمزی در دور موتورهای بین ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ د.د. بررسی شده‌اند.

جدول ۱: مشخصات موتور در نظر گرفته برای شبیه‌سازی [۱۰]

Cummins ISM 370	نوع موتور
۶	تعداد استوانه
۱۲۵ میلی‌متر	قطر محفظه احتراق (استوانه)
۱۴۷ میلی‌متر	طول پیمایش سنبه
۱۰٫۸ لیتر	حجم موتور
۱۶:۱	نسبت تراکم (در حالت پایه)
۳۳۰ کلوین	دمای پاشش سوخت
۳۵٫۶۳۴ میلی گرم	بیشینه تزریق سوخت در چرخه
۲٫۹۷۵ میلی ثانیه	طول دوره پاشش سوخت
۱٫۵ درجه قبل از نقطه مکث بالا	زمان تزریق

شایان ذکر است که سوخت گازی هیدروژن از طریق دریچه هوا وارد می‌شود و سوخت دیزل به وسیله افشانه به محفظه احتراق تزریق می‌شود. بعلاوه بعد از انتخاب کسر جرمی مناسب از میان درصدهای مختلف هیدروژن انتخاب شده، زمان‌های تزریق مختلف بررسی خواهند شد (این بررسی نیز با بررسی بیشتر متغیرهای زیست محیطی و احتراقی صورت می‌گیرد). برای شبیه‌سازی موتور ISM 370، از مجموعه نرم‌افزارهای AVL FIRE استفاده می‌شود.

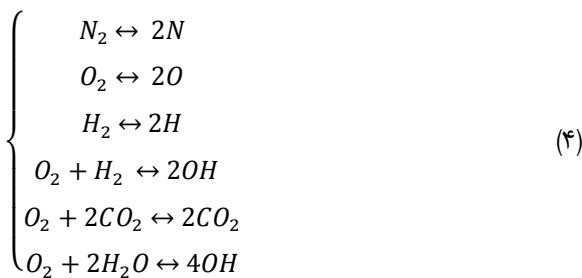
۲- شبیه‌سازی

مشخصات موتور در نظر گرفته در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. برای شبیه‌سازی هندسه محفظه احتراق شامل کاسه سنبه از نرم‌افزار AVL ESE استفاده شده است. در شبیه‌سازی محفظه احتراق از دانه‌بندی متحرک استفاده می‌شود، چرا که با حرکت سنبه با سمت بالا و پایین در طول حرکت خودرو و تغییر زوایای میل‌لنگ سامانه مورد مطالعه دائماً در حال تغییر است. شکل ۱ قطعی از استوانه موتور ISM370 در موقعیت نقطه مکث بالا به همراه شرایط مرزی در نظر گرفته برای قسمت‌های مختلف کاسه سنبه پایه را نشان می‌دهد. در جدول ۲ شرایط دمایی در نظر گرفته برای راستی آزمایشی شبیه‌سازی و معادل سازی موتور با حالت واقعی ارائه شده است.

برای تعریف دوده، الگوی لوند فلملت^۶ انتخاب شد. این الگو منابع تولید کسر حجمی دوده را به شکل انتگرال تابع چگالی ترکیبی و به صورت تابعی از نرخ اتلاف، فشار و دمای ایجاد شده در سطح اکسیدکننده در نظر می‌گیرد. منابع تولیدی کسر حجمی دوده با مشارکت چهار روش مختلف ایجاد می‌شود [۱۵]:

- ۱- رشد سطحی^۳
- ۲- اکسیدشدن^۴
- ۳- ایجاد ذرات^۵
- ۴- تکه تکه شدن^۶

در دمای گاز سوخته بر اساس الگوی مورگان/منتجس^۷ می‌توان سازوکارهای ارائه شده در واکنش ۴ را در نظر گرفت [۱۵]:



به عبارت دیگر نسبت تعادل به معنای نرخ ترکیب سوخت و هوای درست^۸ به حالت واقعی است. زمانی که نسبت تعادل کمتر از ۱ باشد به این معناست که جریان هوای بسیار کمی وجود دارد و اگر بیشتر از ۱ باشد به این معناست که مقداری سوخت وجود دارد که هنوز مصرف نشده است [۱۵].

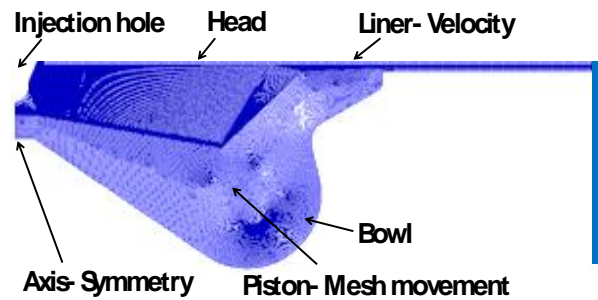
در موتورهای دیزل، هیدروژن از روش‌های مختلفی می‌تواند وارد محفظه احتراق شود. در این پژوهش سوخت هیدروژنی در نسبت‌های مختلف تعادلی^۹ وارد محفظه احتراق می‌شود. چهار نسبت تعادل برای محاسبه مقدار هیدروژن تزریقی از طریق دریچه هوا (۰.۴۱، ۰.۵، ۰.۶۲۵ و ۰.۸۳۳) انتخاب شد. هوای ورودی به صورت ۲۳.۲٪ اکسیژن و ۷۶.۸٪ نیتروژن در نظر گرفته شده است. برای تعیین کسر جرمی هیدروژن تزریقی معادله ۵ ارائه شده است [۱۶]:

$$X_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{air}} \quad (5)$$

که عبارت است از:

$$\dot{m}_{air} = \dot{m}_D \lambda \cdot AFR_{D,st} + \dot{m}_{gas} \lambda \cdot AFR_{st,gas} \quad (6)$$

متغیر $AFR_{D,st}$ نسبت هوا به سوخت برای سوخت دیزل، $AFR_{st,gas}$ نسبت هوا به سوخت برای سوخت‌های گازی و λ نرخ هوای اضافه است.



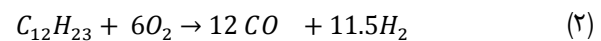
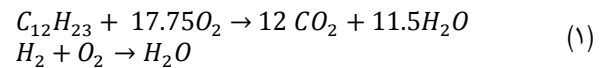
شکل ۱: شرایط مرزی در نظر گرفته برای استوانه موتور در موقعیت نقطه مکث بالا

جدول ۲: شرایط دمایی در نظر گرفته برای موتور [۱۰]

متغیر	دمای میانگین
سنجه	۵۴۵ کلوین
دیواره استوانه	۴۱۵ کلوین
بستار	۵۱۵ کلوین

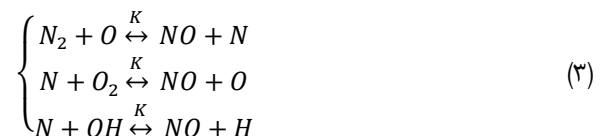
۱-۲- الگوهای انتخاب شده

در این پژوهش الگوی احتراقی ECFM-3Z برای شبیه‌سازی احتراق در استوانه انتخاب شد. این الگو برای اشتعال خودبه‌خودی و اشتعال پیش آمیخته بسیار مناسب است. بر مبنای الگوی ECFM واکنش‌های ۱ و ۲ برای سوخت‌های H_2 و $C_{12}H_{23}$ پیشنهاد داده شده است [۱۵]:



برای موتورهای بنزینی الگوی ECFM-3Z می‌تواند انتخاب شود. با اعمال این الگو ویژگی‌های احتراقی مانند جداسازی سازوکار واکنشی اکسیدشدن دی‌اکسید کربن و مونوکسید کربن اضافه می‌شود. بنابراین الگوی ECFM-3Z برای تمام موتورهای استاندارد قابل استفاده است [۱۵].

در موتورهای دیزل معمولاً تنها انتشار اکسیدهای ازت (به دلیل دمای داغ ایجاد شده در حدود ۱۶۰۰ کلوین) در نظر گرفته می‌شود. سازوکار نشان داده شده در معادله ۳، برای تولید اکسید ازت گرمایی (زلدویچ)^۱ ارائه شده است [۱۰]:



⁶ fragmentation

⁷ Meintjes/Morgan

⁸ Stoichiometry

⁹ Equivalence ratio

¹ Extended Zeldovich

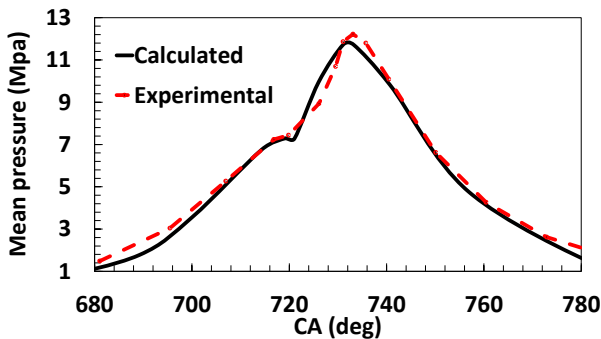
² Lund Flamelet model

³ surface growth

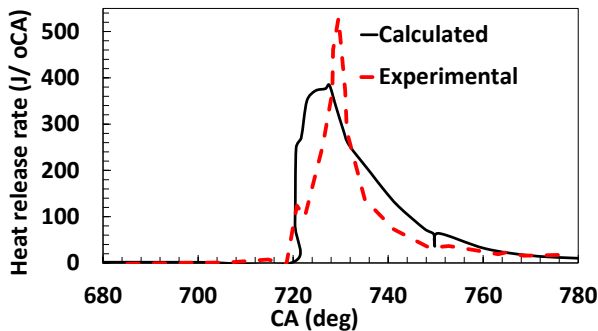
⁴ oxidation

⁵ particle inception

علاوه بر فشار میانگین، مقدار نرخ گرمای آزاد شده محاسبه شده با داده‌های تجربی مقایسه شد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نمودارهای داده‌های تجربی و محاسبه شده دارای توافق کلی با یکدیگر هستند. با این حال برای این متغیر خطایی بزرگتر از ۵ درصد وجود دارد. این خطا به دلیل برخی فرض‌ها مانند در نظر نگرفتن تشعشع و گرمای نهان است که در تمام پژوهش‌های مشابه برای نرخ حرارت آزاد شده با تمام نرم افزارهای حل عددی وجود دارد و در این مورد بیشتر انطباق کلی مطرح است. این خطا توسط پژوهش‌گران تأیید شده است [۱۹-۱۶]. برای اطمینان بیشتر از دقت مناسب شبیه‌سازی، فشار میانگین و نرخ حرارت آزاد شده موتور سوخت دهی شده با دیزل خالص با داده‌های تجربی این سوخت [۱۰] مقایسه شد و خطایی مشابه با حالت کارکرد موتور دوگانه سوز (ارائه شده در نمودارهای ۳ و ۴) به همراه داشت.



شکل ۳: مقایسه مقدار فشار میانگین محاسبه شده با داده‌های تجربی



شکل ۴: مقایسه مقدار نرخ حرارت آزاد شده محاسبه شده با داده‌های تجربی

۳-۲- شرایط ورودی

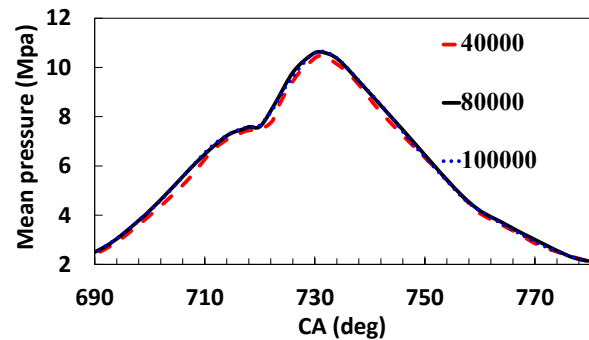
در شبیه‌سازی چرخه بسته، شرایط اولیه در ورودی چرخه بسیار مهم است (دما، فشار، گردش هوا در زمان بسته شدن دریچه هوا و آشفستگی). برای موتور دوگانه هیدروژن-دیزل شرایط ورودی در نظر گرفته در جدول ۳ ارائه شده است [۱۰].

با استفاده از معادله ۵، مقدار کسر جرمی اکسیژن و نیتروژن نیز در دریچه هوا به روش مشابه قابل محاسبه خواهد بود. مقدار کسر جرمی هیدروژن تزریقی برای نسبت‌های تعادل ۰٫۴۱، ۰٫۵، ۰٫۶۲۵ و ۰٫۸۳۳ به ترتیب ۰٫۸۶٪، ۱٫۰۲۷٪، ۱٫۲۸٪ و ۱٫۷٪ محاسبه شده است. در این پژوهش شبیه‌سازی در یک چرخه بسته، از زاویه ۵۷۰ درجه (زمان بسته شدن دریچه هوا) تا زاویه ۸۱۰ درجه میل‌لنگ (زمان باز شدن دریچه دود) صورت می‌گیرد.

۲-۲- تحلیل حساسیت نتایج به تعداد مش‌ها

برای اطمینان از عدم وجود وابستگی بین نتایج و تعداد دانه‌بندی، تحلیل حساسیت انجام شد و مشخص شد که با افزایش تعداد دانه‌بندی بیشتر از ۸۰۰۰۰ دانه، میانگین فشار داخل استوانه برای این الگوی شبیه‌سازی شده تغییری نمی‌کند (خطا کمتر از ۱ درصد).

شکل ۱ نشان دهنده نمودار فشار میانگین بدست آمده برای تعداد دانه‌بندی‌های بیشتر از ۴۰۰۰۰ در حالت پایه است.



شکل ۲: میانگین فشار داخل استوانه برای تعداد دانه‌بندی بیشتر از ۴۰۰۰۰

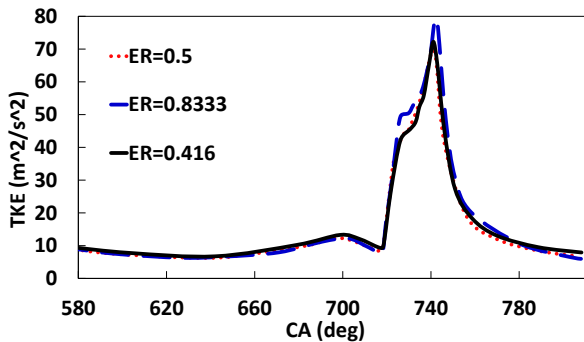
۳- نتایج و بحث

۳-۱- راستی آزمایی

در این پژوهش برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی، فشار میانگین داخل استوانه و نرخ حرارت آزاد شده در زاویه‌های مختلف میل‌لنگ، با داده‌های تجربی مقایسه شده است.

برای مقایسه مقدار سوخت دیزل پاشیده در هر چرخه ۳۵٫۶۳۴ میلی‌گرم، مقدار سوخت هیدروژن وارد شده به محفظه احتراق ۶٪ حجمی از هوای ورودی، زاویه پاشش سوخت ۱۶۰ درجه، فشار و دمای ورودی مطابق با جدول ۳ و شرایط دمایی مطابق با جدول ۲ لحاظ شده است. با دقت در شکل ۳ مشاهده می‌شود که داده‌های محاسبه شده فشار برای ۶٪ سوخت هیدروژن در هوای ورودی به صورت مکملی برای سوخت دیزل، با نتایج تجربی ارائه شده توسط یانگ و همکاران [۱۰] دارای توافق مناسبی است و خطای میانگین کمتر از ۵ درصد است.

(شایان ذکر است که مورد ذکر شده در تمام سرعت‌ها و نسبت‌های تعادل در نظر گرفته، صادق است). از دیگر متغیرهایی که تأثیر بسیار شدیدی بر نوع اختلاط سوخت دارد، آشفته‌گی جریان هوای ورودی است. شکل ۶ مقدار متغیر آشفته‌گی^۵ را در زوایای میل‌لنگ مختلف نشان می‌دهد. با دقت در شکل ۵ و ۶ مشخص است که جریان هوای تندتر ایجاد شده سبب شده است که مقدار آشفته‌گی در داخل استوانه قبل از پاشش سوخت بیشتر شود و همین امر سبب احتراق بهتر بعد از پاشش سوخت خواهد شد.



شکل ۶: میانگین متغیر آشفته‌گی TKE در زوایای میل‌لنگ مختلف در سه نسبت تعادل متفاوت

۳-۳- اثر تزریق هیدروژن بر هوای ورودی
 شکل ۷ و ۸ به ترتیب مقدار توان داخلی و بازدهی گرمایی در نسبت‌های تعادلی مختلف هیدروژن را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ هیدروژن تزریقی (و مشخصاً افزایش نسبت تعادل) مقدار توان داخلی در دور موتورهای مختلف افزایش می‌یابد. با این حال در دور موتور ۴۰۰۰ د.د.د. این افزایش چه در توان داخلی و چه در بازدهی گرمایی برای نرخ تزریق ۱٫۲۸٪ هیدروژن و در دور موتور ۳۰۰۰ د.د.د. برای نرخ تزریق ۱٫۷٪ هیدروژن کاملاً غیر عادی بود چرا که در شرایط موتور ISM 370 افزایش ناگهانی داشت. به همین دلیل برای این دور موتورها لازم بود تا کمی از مقدار هیدروژن کاسته شود (۳ درصد از کسر جرمی هیدروژن تزریقی) تا از احتراق زود هنگام جلوگیری شود.

برای اطمینان از عدم اشتعال زود هنگام در این دور موتورها نمودارهای فشار میانگین داخل استوانه قبل و بعد از تزریق سوخت بررسی شد. مشخص شد که در این دور موتور، شرایط دمایی و فشاری با این کاهش در هیدروژن (بعد از کاهش درصد جرمی هیدروژن تزریقی) به گونه‌ای رقم می‌خورد که از احتراق زود هنگام هیدروژن در مرحله تراکم جلوگیری می‌شود. بنابراین در مطالعاتی مانند مراجع [۱۰ و ۱۶] عدم بررسی دور موتور و ثابت فرض کردن یک دور موتور برای بررسی‌ها کامل نیست. به دلیل اشتعال زود هنگام هیدروژن در تمام نمودارهای

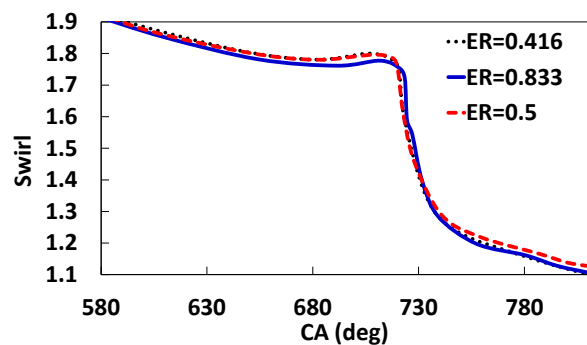
جدول ۳: شرایط دمایی و فشاری در ورودی چرخه

متغیر	مقدار
فشار ورودی	۲۰۰ کیلو پاسکال
دمای ورودی	۳۵۰ درجه کلوین

مقدار متغیر چرخش^۱ هوا برای کسر جرم‌های مختلف هیدروژن قبل و بعد از تزریق سوخت در زوایای میل‌لنگ مختلف و سرعت ۱۵۰۰ د.د.د. ارائه شده است. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش دور موتور مقدار متغیر چرخش هوا قبل از تزریق سوخت کاهش می‌یابد. (به دلیل محدوده گسترده دور موتورهای موجود، بررسی‌های انجام شده برای چرخش و آشفته‌گی تنها در دور موتور ۱۵۰۰ د.د.د. ارائه شده است). عدد گردباده^۲ در معادله ۷ معرفی شده است. مشاهده می‌شود متغیر چرخش به صورت تقسیم گشتاور زاویه‌ای^۳ به لختی^۴ تعریف می‌شود [۲۱].

$$\begin{cases} Swirl = \frac{G_{\theta}}{G_x r_0} \\ G_{\theta} = \int_0^{\infty} 2\pi\rho U U_{\theta} r^2 dr \\ G_x = \int_0^{\infty} 2\pi\rho U r^2 dr + \int_0^{\infty} 2\pi P r dr \end{cases} \quad (7)$$

که G_{θ} گشتاور زاویه‌ای، G_x گشتاور لختی، ρ چگالی سیال، U_{θ} نرخ جریان شعاعی در شعاع r ، U نرخ جریان محوری در شعاع r_0 و r شعاع خارجی چرخش دهنده است [۲۱].



شکل ۵: مقدار چرخش هوا در زوایای میل‌لنگ مختلف در ۳ نسبت تعادل متفاوت

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت تعادل و به دنبال آن نرخ تزریق هیدروژن، مقدار گردش هوا کمی کاهش می‌یابد.

⁴ Inertia

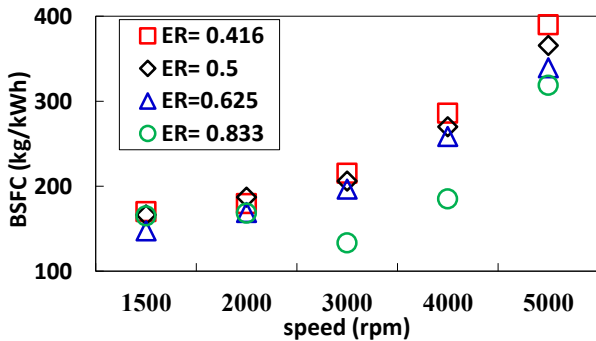
⁵ Turbulence kinetic energy

¹ Swirl

² Swirl number

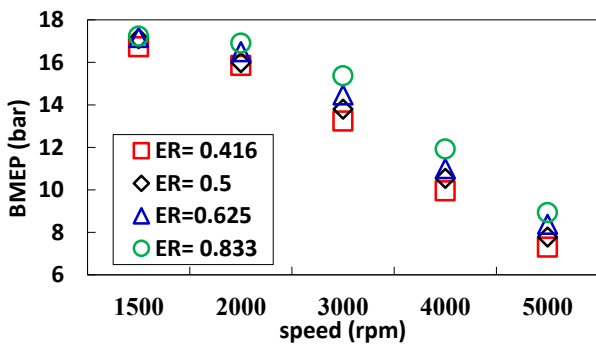
³ Angular momentum

ارائه شده در این پژوهش مقدار هیدروژن تزریقی در دور موتورهای ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ د.د.د. و برای نسبت‌های تعادلی ۰٫۸۳۳ و ۰٫۶۲۵ با کاهش ۴ درصدی کسر جرمی هیدروژن همراه است.



شکل ۹: اثر افزایش هیدروژن تزریقی بر مصرف سوخت ویژه ترمزی در دور موتورهای مختلف

با توجه به شکل ۹ مشخص است که در دور موتورهای بعد از ۳۰۰۰ د.د.د. مقدار متغیر مصرف سوخت ویژه ترمزی در مقدار تزریق ۱٫۷٪ هیدروژن نسبت به دیگر درصدهای تزریقی هیدروژن کمتر است. شکل ۱۰ فشار مؤثر میانگین ترمزی را در دور موتورهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که پیش‌بینی می‌شد (به دلیل اینکه با افزایش مقدار هیدروژن تزریقی نیاز به مصرف سوخت دیزل برای ایجاد هر ۱ کیلو وات در ساعت توان کاهش می‌یابد) با افزایش مقدار هیدروژن تزریقی فشار مؤثر میانگین ترمزی افزایش می‌یابد.

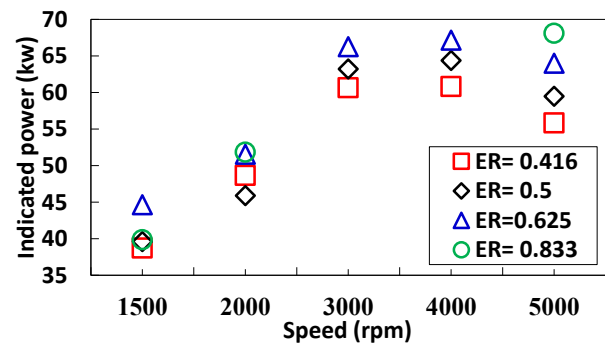


شکل ۱۰: اثر افزایش هیدروژن تزریقی بر فشار مؤثر میانگین ترمزی در دور موتورهای مختلف

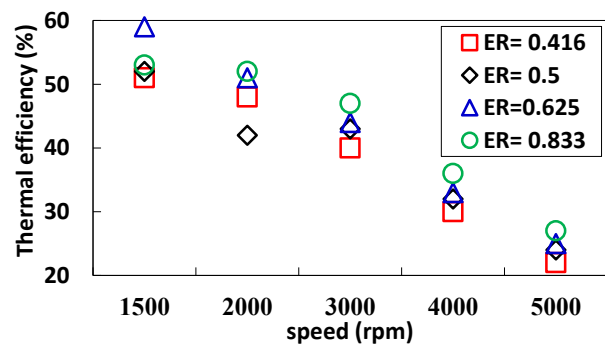
۳-۵- اثر تزریق هیدروژن از طریق دریچه هوا بر متغیرهای زیست محیطی

در پژوهش حاضر، مقدار انتشار آلاینده‌های دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن، دوده، اکسیدهای ازت و هیدروکربن در نرخ‌های مختلف هیدروژن تزریقی بررسی شد و در کنار متغیرهای احتراقی، بهترین نرخ تزریق برای موتور ISM 370 پیشنهاد داده خواهد شد.

شکل ۷: اثر افزایش هیدروژن تزریقی بر توان داخلی موتور در دور موتورهای مختلف



شکل ۸: اثر افزایش هیدروژن تزریقی بر بازدهی گرمایی در دور موتورهای مختلف



۳-۴- اثر تزریق هیدروژن بر متغیر اقتصاد سوخت و فشار مؤثر میانگین ترمزی

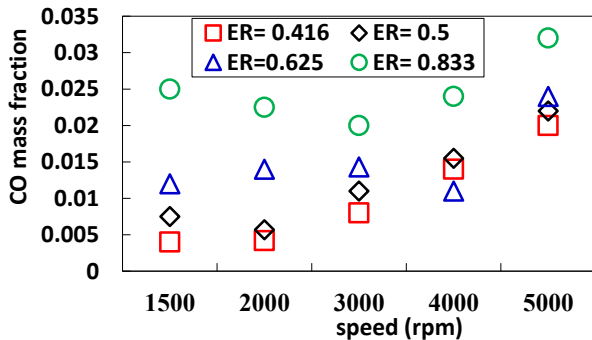
توجه به موارد ذکر شده به نظر می‌رسد مقدار تزریق سوخت هیدروژن به اندازه ۱٫۰۲۷٪ (با در نظر گیری کاهش ۳ درصدی کسر جرمی هیدروژن در دور موتور ۳۰۰۰ د.د.د.) تعادل مناسبی در مقدار بازدهی و توان داخلی ایجاد می‌کند. با این حال همانطور که در شکل ۸ مشخص است تزریق ۱٫۲۸٪ هیدروژن در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د.، بازدهی مناسبی ندارد. در دور موتور ۱۵۰۰ د.د.د. مقدار تزریق هیدروژن به اندازه ۱٫۲۸٪ سبب افزایش بازدهی گرمایی نسبت به دیگر نرخ‌های هیدروژن ورودی شده و در دیگر دور موتورها مقدار تزریق ۱٫۷٪ سوخت هیدروژن مناسب‌تر شناخته شد. بنابراین در مجموع می‌توان گفت که افزایش هیدروژن تزریقی سبب افزایش بازدهی گرمایی می‌شود.

۳-۴- اثر تزریق هیدروژن بر متغیر اقتصاد سوخت و فشار مؤثر میانگین ترمزی

مصرف سوخت ویژه ترمزی نشان دهنده مقدار مصرف سوخت جهت بدست آمدن ۱ کیلو وات توان در هر ساعت است و به عنوان متغیر

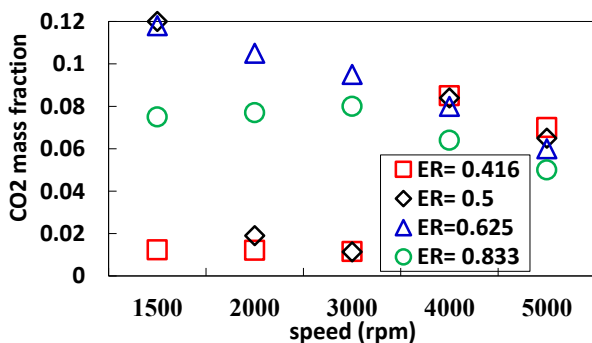
¹ Break specific fuel consumption (BSFC)

شکل ۱۳ مقدار انتشار مونوکسیدکربن و شکل ۱۴ و ۱۵ نیز به ترتیب مقدار دی‌اکسیدکربن و هیدروکربن تولیدی در نقطه‌ی باز شدن دریچه‌ی دود را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، مقدار تزریق ۰.۸۵۷ درصد هیدروژن (در نسبت تعادل ۰.۴۱۶)، مقدار مونوکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن و مقدار هیدروکربن کمتری نسبت به دیگر نرخ‌های هیدروژن تزریقی تولید می‌کند.



شکل ۱۳: اثر افزایش هیدروژن تزریقی بر مقدار انتشار آلاینده‌ی کربن مونو کسید در دور موتورهای مختلف

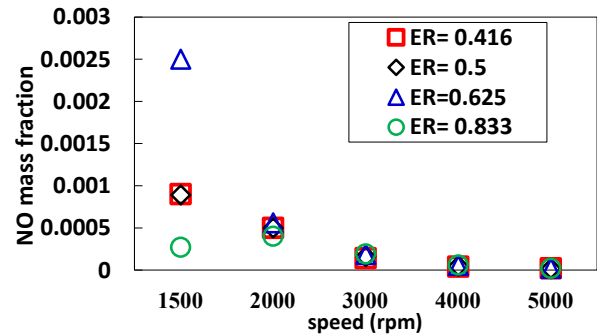
همانطور که در این پژوهش و مطالعات مشابه مشخص شده است، مقدار آلاینده‌های تولیدی بشدت تحت تأثیر دور موتورهای مختلف قرار می‌گیرد [۲۰]. در نمودارهای ۱۱ تا ۱۵ مشخص است که آلاینده‌های کربن دی‌اکسید، کربن مونوکسید، هیدروکربن و دوده با افزایش دور موتور افزایش می‌یابد ولی مقدار انتشار اکسیدهای ازت کاهش یافته است (به جز موارد استثنا که در آن سوخت هیدروژن زودتر از حد انتشار مشتعل می‌شود و سبب افزایش اکثر متغیرها می‌شود). با افزایش دور موتور در هر دقیقه مقدار دما و فشار ایجاد شده در هر چرخه کاهش می‌یابد. این کاهش در دما دلیل اصلی کاهش مقدار انتشار آلاینده‌ی اکسیدهای ازت است.



شکل ۱۴: اثر افزایش هیدروژن تزریقی بر مقدار انتشار آلاینده‌ی دی‌اکسیدکربن در دور موتورهای مختلف

همانطور که در شکل ۱۳ و ۱۴ مشخص است، مقدار تولید دی‌اکسیدکربن با افزایش دور موتور کاهش یافته و مقدار مونوکسیدکربن افزایش می‌یابد. دلیل اصلی کاهش مقدار

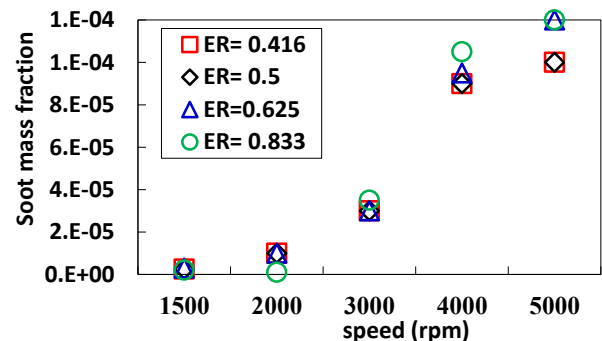
در شکل ۱۱ مقدار انتشار اکسیدهای ازت در نقطه باز شدن دریچه‌ی دود ارائه شده است.



شکل ۱۱: اثر افزایش هیدروژن تزریقی بر مقدار انتشار آلاینده‌ی اکسیدهای ازت در دور موتورهای مختلف

با توجه به شکل ۱۱ مشخص است که، مقدار تزریق ۰.۸۵۷٪ یعنی (ER = 0.416) و ۱.۰۲۷٪ (ER = 0.5) هیدروژن از نقطه‌نظر داشتن مقدار انتشار اکسیدهای ازت متعادل نسبت به دیگر نرخ‌های هیدروژن تزریقی مناسب‌تر اند و برای شرایط در نظر گرفته در این پژوهش پیشنهاد می‌شوند. این نرخ‌های تزریق علاوه بر داشتن انتشار اکسیدهای ازت متعادل (در نسبت‌های تعادل و وابسته)، مقدار فشار خیلی شدیدی تولید نمی‌کنند و به موتور آسیب نمی‌رسانند. با این وجود این نرخ‌های تزریق با توجه به شکل ۹ در حدود ۳ درصد سوخت بیشتر برای ایجاد یک توان مشخص مصرف می‌کنند.

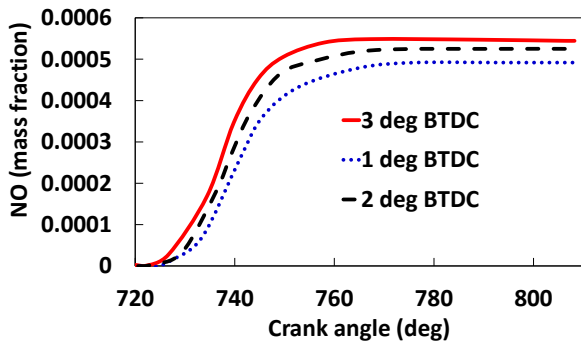
شکل ۱۲ مقدار انتشار دوده در نسبت‌های مختلف تعادلی را نشان می‌دهد. مشخص است که در دور موتورهای ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ د.د.د. مقدار انتشار دوده با افزایش نسبت تعادل (به عبارت دیگر افزایش مقدار هیدروژن تزریقی از دریچه‌ی هوا) افزایش می‌یابد. با این وجود نسبت‌های تعادلی ۰.۴۱۶ (۰.۸۶٪ هیدروژن تزریقی) و ۰.۵ (۱.۰۲۸٪ هیدروژن تزریقی) از نقطه نظر ایجاد مقدار دوده متعادل پیشنهاد می‌شوند. دلیل اصلی افزایش دوده نسبت‌های تعادلی^۱ بزرگتر است، نسبت تعادلی بیشتر ظرفیت بزرگی برای تولید دوده ایجاد می‌کند [۱۵].



شکل ۱۲: اثر افزایش هیدروژن تزریقی بر مقدار انتشار آلاینده‌ی دوده در دور موتورهای مختلف

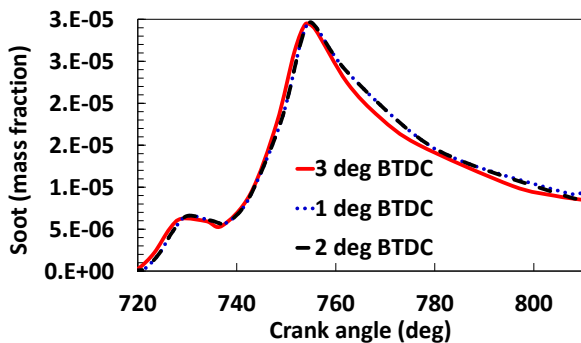
¹ Equivalence ratio

ازت افزایش دمای محفظه احتراق به سبب اشتعال زودتر است (افزایش دما در محدوده وسیعی از زوایای میل لنگ مختلف) چرا که مقدار تولید اکسیدهای ازت در موتورهای درون سوز بسیار به دما وابسته است. شکل ۱۶ برای دور موتور ۲۰۰۰ دور در دقیقه ارائه شده است. با این حال در دور موتورهای دیگر بین ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ د.د.د. نیز این بررسی انجام شد و مشخص شد که زمان پاشش ۲ درجه قبل از رسیدن سنبه به نقطه مکث بالا در تمام دور موتورهای ذکر شده می تواند اکسیدهای ازت متعادلی را تولید کند.



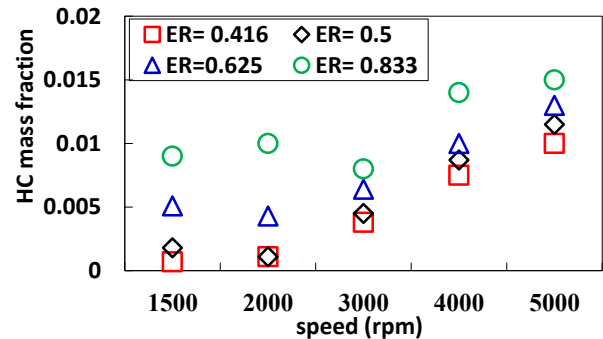
شکل ۱۶: اثر زمان تزریق بر اکسیدهای ازت خروجی در ۲۰۰۰ د.د.د.

شکل ۱۷ مقدار انتشار دوده در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د. را نشان می دهد. همانطور که قابل مشاهده است، باز هم زمان پاشش ۲ درجه قبل از نقطه مکث بالا مناسب است چرا که مقدار دوده متعادلی را در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د. (دیگر دور موتورها) ایجاد می کند. همانطور که در شکل ۱۷ مشخص شده است با جلو اندازی زمان تزریق مقدار دوده کاهش می یابد. این کاهش در مقدار تولید دوده به سبب افزایش دمای محفظه احتراق بوده چرا که فرآیند اکسیدشدن دوده را تسهیل می کند. با این وجود همیشه میان مقدار انتشار اکسیدهای ازت و دوده تقابلی وجود دارد و زمان تزریق ۲ درجه میل لنگ قبل از رسیدن سنبه به نقطه مکث بالا می تواند میان انتشار اکسیدهای ازت و دوده در دور موتورهای ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ د.د.د. (بررسی ها در دور موتورهای ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ دور در دقیقه انجام شده است و تنها برای دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د. به سبب تکرار یک نتیجه یکسان ارائه شده است) تعادل مناسبی را ایجاد کند.



شکل ۱۷: اثر زمان تزریق بر انتشار دوده خروجی در ۲۰۰۰ د.د.د.

دی اکسیدکربن در کنار افزایش کربن مونوکسید نیز کاهش دما است چرا که کاهش دمای ایجاد شده به سبب افزایش دور موتور باعث کاهش نرخ واکنش مونوکسیدکربن با اکسیژن شده (و واکنش اکسیژن با سوخت) و مقدار دی اکسیدکربن تولیدی کاهش یافته است.



شکل ۱۵: اثر افزایش هیدروژن تزریقی بر مقدار انتشار آلاینده هیدروکربن در دور موتورهای مختلف

با توجه به تمام موارد ذکر شده، مقدار تزریق ۱،۰۲۸٪ سوخت هیدروژن (درصد جرمی) در نسبت تعادل ۰،۵ در دور موتورهای مختلف با در نظر گیری اکثر آلاینده ها، متغیر اقتصاد سوخت و متغیرهای بازدهی گرمایی و توان داخلی مناسب تشخیص داده شد (با وجود اینکه در برخی متغیرها مانند BSFC نسبت به دیگر مقادیرهای تزریق هیدروژن عملکرد مناسبی ندارد اما در مجموع می تواند تعادل مناسبی میان متغیرهای احتراقی و زیست محیطی ایجاد کند).

۳-۶- اثر زمان پاشش بر متغیرهای زیست محیطی، اقتصادی و عملکردی موتور دیزل بارسنگین در حضور ۱،۰۲۷ درصد جرمی هیدروژن از هوای ورودی

استفاده از یک زمان پاشش مناسب برای مقدار تزریق ۱،۰۲۷٪ جرمی سوخت هیدروژن از هوای ورودی (از طریق دریچه هوا) می تواند مزیت های تزریق این مقدار سوخت را به صورت مکملی برای موتور دیزل سوز افزایش دهد.

به علاوه زمان های پاشش مختلف سوخت دیزل از طریق افشانه در حالت تزریق مناسب هیدروژن از طریق دریچه هوا نیاز به بررسی بیشتری دارند. در پژوهش های مشابه، بررسی زمان های پاشش مختلف در حالت بهره گیری از سوخت دوگانه هیدروژن-دیزل انجام نشده است [۱۰ و ۱۶].

در این مقاله، بررسی های زمان تزریق برای دور موتورهای مختلف انجام شده است با این حال به دلیل تعدد نمودارها و داده های بدست آمده تنها برای دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د. بررسی های عددی انجام شده توسط نرم افزار، ارائه شده است.

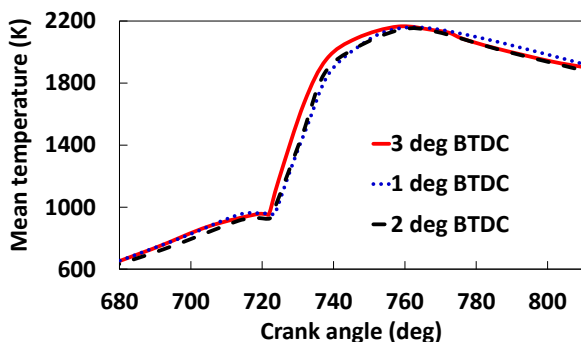
شکل ۱۶ مقدار انتشار اکسیدهای ازت در زمان های پاشش مختلف را نشان می دهد. همانطور که مشخص است، با پیش اندازی زمان تزریق مقدار اکسیدهای ازت افزایش می یابد. دلیل افزایش مقدار اکسیدهای

تا ۷۶۰ درجه افزایش محسوسی می‌یابد. همین ایجاد منطقه گسترده دمای گرمتر (شکل ۱۵) سبب تولید بیشتر اکسیدهای ازت می‌شود. ایجاد منطقه گسترده دمای گرمتر سبب اکسیدشدن مناسب‌تر دوده می‌شود و شرایط موتور را به گونه‌ای پیش خواهد برد که اکسیژن بیشتری مصرف شود و آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن نسوخته کاهش محسوسی یابد.

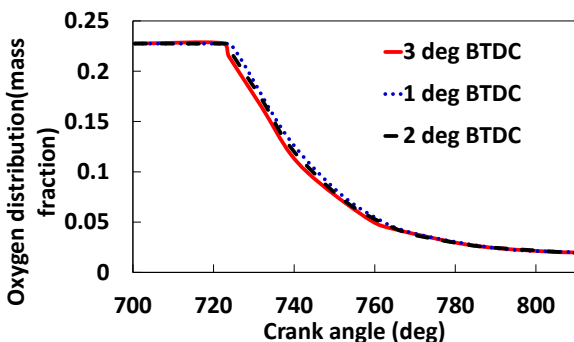
با مشاهده شکل ۱۸ مشخص است که مقدار دی‌اکسیدکربن برای زاویه پاشش ۳ درجه قبل از نقطه مکث بالا در زوایای میل‌لنگ بین ۷۲۰ تا ۷۸۰ درجه بیشتر است. این افزایش به سبب واکنش بیشتر مونوکسیدکربن با اکسیژن است.

شکل ۲۱ توزیع اکسیژن و شکل ۲۲ توزیع هیدروژن در زوایای میل‌لنگ مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار آن می‌رفت مقدار اکسیژن در محدوده‌ای از زوایای میل‌لنگ در زمان پاشش ۳ درجه قبل از نقطه مکث بالا کاهش محسوسی نسبت به دیگر زمان‌های پاشش خواهد یافت که این موضوع به دلیل ایجاد همان منطقه دما گرم به سبب جلو اندازی زمان پاشش است.

همانطور که در شکل ۲۲ مشخص است، جلو اندازی زمان پاشش سبب اشتعال زودتر هیدروژن تزریقی از طریق دریچه هوا می‌شود که این موضوع هم سبب مصرف بیشتر اکسیژن خواهد شد.



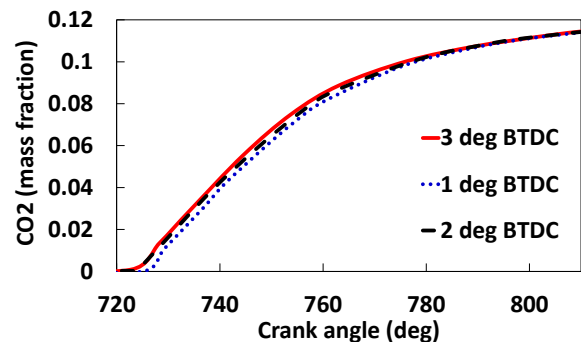
شکل ۲۰: اثر زمان تزریق بر دمای میانگین داخل استوانه در زوایای میل‌لنگ مختلف (در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د.)



شکل ۲۱: اثر تغییر زمان تزریق بر توزیع اکسیژن در زوایای میل‌لنگ مختلف (در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د.)

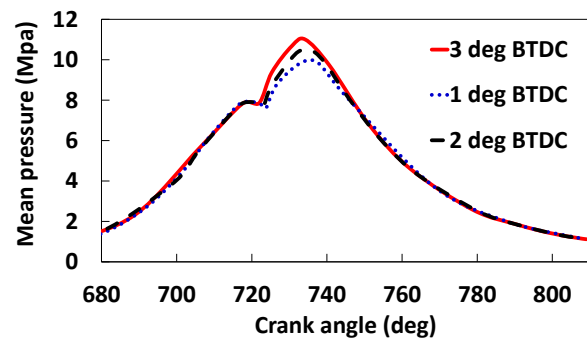
شکل ۱۸ مقدار دی‌اکسیدکربن تولیدی را در زوایای لنگ مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، در زمان باز شدن دریچه دود مقدار انتشار آلاینده دی‌اکسیدکربن در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د. با تغییر زمان تزریق تغییر نمی‌کند. این موضوع برای دور موتورهای بین ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ د.د.د. صادق است.

بررسی‌های بیشتر نشان داد که آلاینده‌های مونوکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته نیز وضعیتی به مانند دی‌اکسیدکربن دارد و در دور موتورهای بین ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ د.د.د. این آلاینده‌ها در زمان باز شدن دریچه دود با تغییر زمان پاشش تغییر چندانی نمی‌کند (با بیشینه خطایی کمتر از ۳ درصد).



شکل ۱۸: اثر تغییر زمان تزریق بر مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن خروجی از آگروز (در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د.)

شکل ۱۹ مقدار فشار میانگین داخل استوانه در زوایای میل‌لنگ مختلف تحت تأثیر سه زمان پاشش مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، زمان پاشش ۲ درجه قبل از نقطه مکث بالا فشار متعادلی را تولید می‌کند چرا که افزایش فشار بیش از حد می‌تواند تأثیرات منفی برای بدنه استوانه به همراه داشته باشد و بالعکس ایجاد فشار کمتر سبب کاهش توان تولیدی خودرو خواهد شد.



شکل ۱۹: اثر تغییر زمان تزریق بر فشار میانگین داخل استوانه در زوایای میل‌لنگ مختلف (در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د.)

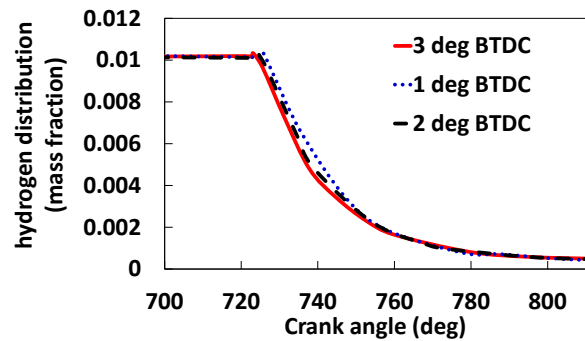
شکل ۲۰ اثر تغییر زمان تزریق را بر مقدار دمای میانگین داخل استوانه نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، با به جلو اندازی زمان تزریق مقدار دمای میانگین داخل استوانه در زوایای میل‌لنگ بین ۷۲۰

نرخ تزریق هیدروژن ۰.۸۶٪، ۱.۰۲۷٪، ۱.۰۲۸٪ و ۱.۰۷٪ (کسر جرمی) مقدار متغیرهای مختلف بررسی شد و نتایج به شرح زیر حاصل شد:

- در دور موتورهای مختلف، با افزایش مقدار کسر جرمی هیدروژن تزریقی در یک نسبت تعادل مقدار میانگین فشار داخل استوانه، دما و مقدار تولید اکسیدهای ازت افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد یافت.
- از میان چهار کسر جرمی هیدروژن تزریقی ذکر شده در نسبت‌های تعادل منحصر به هر یک از آن‌ها، مقدار تزریق ۱.۰۲۷٪ کسر جرمی هیدروژن در نرخ هوای اضافه ۱.۶ مناسب‌ترین مقدار آن برای ایجاد یک تعادل کلی میان متغیرهای زیست محیطی و احتراقی در دور موتورهای بین ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ د.د.د. شناخته شد.
- بررسی‌های انجام شده در دور موتورهای مختلف نشان داد که در تحلیل و آزمون‌هایی که بر روی موتورهای بارسنگین صورت می‌گیرد انتخاب یک دور موتور نمی‌تواند کامل باشد.
- از میان سه زمان پاشش ۳، ۲، و ۱ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مکث بالا زمان پاشش ۲ درجه از حیث داشتن آلاینده‌گی و متغیرهای احتراقی متعادل مناسب شناخته شد (در دور موتورهای ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ د.د.د. بررسی‌ها انجام شد ولی به سبب تکرار و مشابه بودن داده‌ها تنها در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د. داده‌های بدست آمده ارائه شده است).

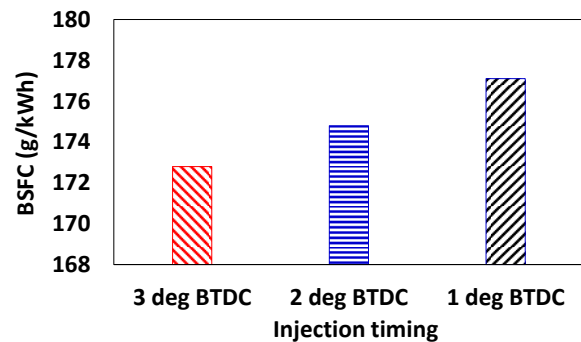
مراجع

- [1] M. Dadashzadeh and A. Ahmad, F. Khan, Dispersion modelling and analysis of hydrogen fuel gas released in an enclosed area: A CFD-based approach, *Fuel*, Vol. 184, pp. 192-20, 2016.
- [2] S. Szwaja, K.G. Rogalinski, Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 4413-4421, 2009.
- [3] P. Geng, Q. Tan, C. Zhang, L. Wei, X. He, E. Cao, K. Jiang, Comparative properties and utilization of unpreheated degummed/esterified mixed crude palm oil-diesel blends in an agricultural engine, *Renewable Energy*, Vol. 101, pp. 82-89, 2017.
- [4] K.L. Tay, W. Yang, B. Mohan, D. Zhou, W. Yu, F. Zhao, Development of a reduced kerosene -diesel reaction mechanism with embedded soot chemistry for diesel engines, *Fuel*, Vol. 81, pp. 926-934, 2016.
- [5] M. Talibi, P. Hellier, R. Balachandran, N. Ladommatos, Effect of hydrogen-diesel fuel co-combustion on exhaust emissions with verification using an in-cylinder gas sampling technique, *International* Vol. 39, pp. 15088-15102, 2014.
- [6] S. Aljamali, S. Abdullah, W.M.F.W. Mahmood, Y. Ali, Effect of fuel injection timings on performance and emissions of stratified combustion CNGDI engine, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 109, pp. 619-629, 2016.
- [7] S.H. Parka, S.H. Yoon, Injection strategy for simultaneous reduction of NOx and soot emissions using two-stage injection in DME fueled engine,



شکل ۲۲: اثر تغییر زمان تزریق بر توزیع هیدروژن در زوایای میل‌لنگ مختلف (در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د.)

شکل ۲۳ اثر تغییر زمان تزریق را بر مصرف سوخت ویژه ترمزی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با جلو اندازی زمان تزریق این متغیر کاهش خواهد یافت. کاهش این متغیر نشان دهنده کاهش مصرف سوخت برای ایجاد یک توان یکسان است.



شکل ۲۳: اثر تغییر زمان تزریق بر مصرف سوخت ویژه ترمزی (در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د.)

بررسی‌ها نشان داد که تغییر زمان تزریق در حالت در نظر گرفته شده (دور موتورهای مختلف بین ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ د.د.د.، ۱.۰۲۷ درصد جرمی هیدروژن از هوای ورودی و در نظر گیری سه زمان تزریق ۳، ۲ و ۱ درجه قبل از نقطه مکث بالا) تأثیری بر مقدار بازدهی گرمایی ندارد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ۴ نسبت هوای اضافه مختلف (۱.۲، ۱.۶، ۲ و ۲.۴) با کسر جرمی هیدروژن تزریقی مشخص در نظر گرفته شد و اثرات تغییر نرخ تزریق هیدروژن بر متغیرهای زیست محیطی، احتراقی و اقتصاد سوخت بررسی شد.

در ابتدا مقدار چرخش و آشفته‌گی هوا برای نرخ‌های تزریق مختلف بررسی شد و مشخص شد که اعمال مقداری از هیدروژن سبب افزایش آشفته‌گی هوا قبل از پاشش سوخت می‌شود. آشفته‌گی بیشتر سبب بهبود اختلاط سوخت با هوا بعد از پاشش سوخت دیزل خواهد شد. برای چهار

diesel dual fuel IC Engine -A Review, International Journal of Engineering Research, Vol. 5, pp. 792-794, 2016.

[15] AVL FIRE 2011.1 manual

[16] H.A. Alrazen, A.R. Abu Talib, K.A. Ahmad, A two-component CFD studies of the effects of H₂, CNG, and diesel blend on combustion characteristics and emissions of a diesel engine, International journal of hydrogen energy, Vol. 41, pp. 10483-10495, 2016.

[17] A. Hasan Kakaee, P. Rahnam, A. Paykani. Influence of fuel composition on combustion and emissions characteristics of natural gas/diesel RCCI engine, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 55, 58-65, 2015.

[18] S. Jafarmadar, A. Zehni, Combustion Modeling for Modern Direct Injection Diesel Engines, Iran. J. Chem. Chem. Eng, Vol. 33, No. 3, 2012.

[19] J. Li, W.M. Yang, D.Z. Zhou, Modeling study on the effect of piston bowl geometries in a gasoline/biodiesel fueled RCCI engine at high speed, Energy Conversion and Management, Vol. 112, pp. 359-368, 2016.

[20] M.O. Hamdan, M.Y.E. Selim, S.A.B. Al-Omari, Emad Elnajjar, Hydrogen supplement co-combustion with diesel in compression ignition engine, Renewable Energy, Vol. 86, pp. 54-60, 2015.

[21] M.S.A. Ishak and M.N.M. Jaafar, Journal Mechanical, The effect of swirl number on discharge coefficient for various orifice sizes in a burner system, Vol. 7, pp. 99-108, 2004.

Applied Energy, Vol. 143, pp. 262-270, 2015.

[8] Y. Suzuki and T. Tsujimura, The Combustion Improvements of Hydrogen / Diesel Dual Fuel Engine, SAE, 2015.

[9] Y. Karagoz1, T. Sandal, U.O. Koylu, A.S. Dalkılı, S. Wongwises, Advances in mechanical engineering, Effect of the use of natural gas-diesel fuel mixture on performance, emissions, and combustion characteristics of a compression ignition engine, Vol. 8, pp. 1-3, 2016.

[10] Z. Yang, C. Chu, L. Wang, Y. Huang, Effects of H₂ addition on combustion and exhaust emissions in a diesel engine, Fuel, Vol. 139, pp. 190-197, 2015.

[11] S. Liu, H. Li, C. Liew, T. Gatts, S. Wayne, B. Shade, N. Clark, An experimental investigation of NO₂ emission characteristics of a heavy-duty H₂-diesel dual fuel engine, International journal of hydrogen energy, Vol. 36, pp. 12015-12024, 2011.

[12] M. Keshavarz, G. Javadirad, S. A. Jazayeri, Injection Optimization for Heavy Duty Diesel Engine in Order to Find High Efficiency and Low NO_x Engine Concept by Means of Quasi Dimensional Multi-Zone Spray Modeling, the Journal of Engine Research, No. 22, pp. xx, 2011. (In Persian, فارسی)

[13] Y. Huang, G. Hong, R. Huang, Effect of injection timing on mixture formation and combustion in an ethanol direct injection plus gasoline port injection (EDI+GPI) engine, Energy, Vol. 111, pp. 92-103, 2016.

[14] Y.D. Kumar, M. Yohan, Feasibility of hydrogen-



Investigating the effects of changing hydrogen rate on combustion, emission and fuel economy parameters in a DI engine

K. Shojae*¹¹ Department of chemical engineering, Semnan University, Semnan, Iran, kianoosh.shojae@semnan.ac.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 November 2016

Accepted: 14 August 2017

Keywords:

Hydrogen supplemental fuel

DI engine

Engine speed

Injection timing

TKE

Swirl

ABSTRACT

Nowadays hydrogen fuel as a clean energy due to making much less emissions besides proper combustion effects in comparison to other usual fuels has been highly considered by research centers for using at various combustion systems. Nevertheless, effects of using hydrogen fuel under various operating conditions such as different engine speeds for meet the general balanced situation with taking into account most emissions and power parameters of engine need to further investigations. Unlike similar studies, in the present work, emphasis was on investigation of effects of injected hydrogen mass fraction at a wide range of engine speeds (from 1500 to 5000 rpm) and analyses have been performed with consider to most of emissions (CO₂, CO, soot, HC, etc.) besides combustion and fuel economy parameters to yield a general balanced state at ISM370 HD engine. For constructing required geometries, simulation of different parts of the engine and numerical analyze, AVL Fire software has been used. Results of conducted studies show that air swirl in the cylinder is suitable before fuel injection and injecting more hydrogen fuel leads to increasing air turbulence. With study on the various rates of injected hydrogen (0.86%, 1.027%, 1.28% and 1.7%) in equivalence ratios specified, mass fraction of 1.027% hydrogen entered from intake port for meet to a balanced state between most of emissions, combustion parameters, etc. was known proper. Furthermore, it was determined that 2 deg. BTDC injection timing makes doubles advantages of using 1.027% hydrogen mass fraction.

