



بررسی اثر چینه‌بندی دمایی اتاق احتراق بر عملکرد احتراق موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن

محسن پورفلاح^{۱*}، علی اکبر رنجبر^۲، سید مصطفی میرسلیم^۳، سید علی جزایری^۴

^۱دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، m.pourfalah@gmail.com

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

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

^۴دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، jazayeri@kntu.ac.ir

*نویسنده مسؤل، شماره تماس: ۰۹۱۱۱۲۵۲۳۰۰

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۸ مرداد ۱۳۹۳

پذیرش: ۱۵ آذر ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:

موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن

چینه‌بندی دمایی

بازه عملکردی

چکیده

موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن (HCCI) یک روش مناسب برای دستیابی به بازده بیشتر و کاهش آلایندة NOx و ذرات معلق در مقایسه با موتورهای احتراق داخلی مرسوم است. اما دستیابی به احتراقی عملی در شرایط بار کامل و بار جزئی و پایش زمان شروع احتراق مهمترین چالش‌های پیش‌روی محققان در توسعه موتورهای HCCI است. در این مقاله، چینه‌بندی دمایی با استفاده از دمای متغیر مخلوط ورودی، مقدار گازهای بازگردانی شده و همچنین دمای متغیر نقطه ملتهب بررسی شد. ترکیبی از آزمون تجربی بر موتوری تک استوانه و شبیه‌سازی سه بعدی احتراق در این تحقیق استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد، افزایش دمای مخلوط ورودی و دمای نقطه ملتهب موجب پیش‌رسی احتراق، کاهش تأخیر در اشتعال و نرخ سریعتر آزادسازی گرما خواهد شد. همچنین برای افزایش توان قابل دستیابی و بازده احتراق می‌توان نسبت گازهای بازخورانی شده را افزایش داد. به‌طور کلی، چینه‌بندی دمایی با بهبود شرایط پایش مراحل احتراق و همچنین کاهش نرخ افزایش فشار، موجب گسترش محدوده توان زیاد در بازه عملکردی موتور می‌شود.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن (HCCI) روشی جدید احتراقی است که در آن مخلوط هوا و سوخت به صورت پیش آمیخته وارد محفظه می‌گردد و احتراق، با سازوکارهای شیمیایی آغاز می‌شود. این نوع احتراق، جایگزینی مناسب و مطمئن برای روشهای سنتی احتراق SI و CI است و از مزایای هر دو روش بهره می‌گیرد. به این صورت که پیش‌آمیخته بودن مخلوط را از احتراق SI و اشتعال و احتراق تحت تراکم را از روش احتراق CI بهره گرفته است و به همین دلیل یک روش ترکیبی است، که دارای بازده بزرگتر، تولید کم اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق و همچنین مصرف سوخت کم است [۱]. موتورهای HCCI به‌عنوان اشتعال خودبه‌خودی پایش شده (CAI) تاریخچه‌ای حدود ۱۰۰ ساله دارد [۲]. نخستین نمونه آن به اختراع موتوری دوزمانه با سطح ملتهب توسط کارل ویس^۲ در سال ۱۸۹۷ برمی‌گردد [۳]. در دهه ۱۹۷۰ سمونوف و گوساک^۳ نخستین موتور CAI را ساختند که پایش احتراق آن با استفاده از گونه‌های فعال تولید شده از احتراق ناقص مخلوط سوخت و هوا در پیش محفظه بود [۴]. بررسی احتراق CAI بر روی موتورهای دو زمانه در اواخر دهه ۷۰ توسط اونیشی و نوگوچی^۴ [۵-۶] و سپس در سال ۱۹۸۳ بر روی موتوری چهار زمانه توسط نجت و فاستر^۵ به‌عنوان شناخته شده‌ترین کارهای انجام گرفته در زمینه اشتعال خودبه‌خودی مهار شده اند [۷]. اما در اواخر دهه ۸۰، ترینگ^۶ واژه اشتعال تراکمی مخلوط همگن (HCCI) را معرفی کرد [۸].

علیرغم مزیت‌های احتراق HCCI که پیشتر بدان اشاره گردید، نحوه پایش زمان‌بندی اشتعال و بازه عملکردی محدود از مهمترین چالش‌هایی است که باید در توسعه این مفهوم احتراقی بر آن چیره شد. از آن‌هنگام که احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن معرفی گردید، تحقیقات تجربی و عددی بسیار زیادی برای غلبه بر محدودیت‌ها و معایب اشاره شده، انجام پذیرفت. عامل اصلی عدم توانایی افزایش توان موتور به‌ویژه در محدوده غنی مخلوط، نرخ ناگهانی افزایش فشار و در نتیجه شرایط احتراقی مشابه با کوبش در احتراق مخلوط کاملاً همگن است. بنابراین ایجاد ناهمگنی اجباری در توزیع دما، ترکیب مخلوط و توزیع مخلوط در کنار روش‌های سنتی پایش احتراق نظیر دما و فشار ورودی متغیر و بازخورانی گازهای برگشتی قابلیت افزایش بازه کارکردی موتورها با مفهوم HCCI را خواهد داشت. بررسی‌های عددی زیادی بر روی احتراق HCCI با فرض نسبت هوا به سوخت و دمای همگن در داخل محفظه انجام

شده است. نتایج این کارهای عددی با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند و زمان شروع اشتعال در نتایج عددی هم‌خوانی خوبی با نتایج تجربی دارد؛ اما نمودار فشار حاصل از کارهای عددی به‌ویژه در الگوهای ترمودینامیکی تک‌ناحیه‌ای با فرض مخلوط کاملاً همگن یک افزایش ناگهانی فشار در مقایسه با نتایج تجربی را نشان می‌دهد اما در الگوهای سه‌بعدی بررسی شده این دانه‌بندی کمتر وجود دارد [۹]. سوبرگ^۷ و همکاران [۱۰]، با لایه‌بندی دمایی داخل استوانه نتیجه گرفتند که ناهمگنی طبیعی دمایی در شرایط واقعی موجب یک احتراق آرام، بدون افزایش سریع نرخ فشار خواهد شد. آن‌ها همچنین اعلام نمودند که با یک لایه‌بندی مناسب دمایی، حتی یک مخلوط استوکیومتری نیز می‌تواند با نرخ افزایش فشار کم محترق شود. آمانو^۸ و همکاران [۱۱]، در یک کار عددی با تقسیم محفظه احتراق به ۲۵ ناحیه دمایی نتیجه گرفتند که با توزیع مناسب دما و نسبت هوا به سوخت در داخل محفظه می‌توان احتراق را تعدیل نمود و در نتیجه نرخ افزایش فشار را کاهش و از کوبش جلوگیری کرد.

از آنجایی که خوداشتعالی اساساً تحت تأثیر دمای مخلوط داخل استوانه قرار دارد، اطلاع از توزیع دمایی مخلوط برای پایش خوداشتعالی بسیار مهم است. روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری دمای مخلوط توسعه یافته است و به‌طور گسترده استفاده می‌شود [۱۲-۱۳]. از طرفی روش‌های مختلفی برای پایش نرخ احتراق و اجتناب از سوختن سریع مخلوط و شروع کوبش در بارهای زیاد پیشنهاد شده است. این روش‌ها بر روی رابطه بین دمای مخلوط داخل استوانه و خوداشتعالی متمرکز شده‌اند و با ایجاد توزیع دمایی مناسب در داخل مخلوط، موجب افزایش کیفیت احتراق می‌شوند [۱۴]. شاهنگیان و جزاری [۱۵] در یک کار عددی تأثیر دمای ورودی و نسبت گازهای بازخورانی شده را بر احتراق HCCI با سوخت دی‌متیل‌اتر بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که افزایش دمای مخلوط ورودی موجب پیش افتادن واکنش‌های خنکتر و در نتیجه پیش افتادن زمان خوداشتعالی می‌شود. همچنین افزایش نسبت گازهای بازخورانی شده موجب گسترش بازه عملکردی در مرز بین کوبش و خاموشی می‌شود. کاکوهو^۹ و همکاران [۱۴]، چینه‌بندی دمایی را با استفاده از دو ورودی مخلوط به‌طور مستقل، در دماهای مختلف انجام دادند. زمانی که توزیع دما در داخل استوانه شکل می‌گیرد، احتراق از نواحی گرم شروع و به نواحی خنکتر گسترش می‌یابد که موجب احتراق آرامتر می‌شود و هرچه شیب دمایی در داخل محفظه با ثابت نگه داشتن دمای متوسط، افزایش یابد؛ زمان احتراق طولانی‌تر شده و احتراق پایدارتر می‌شود. ایکموتو^{۱۰} و همکاران [۱۷] با پایش نرخ گازهای بازخورانی شده گرم و سرد در یک سامانه خروجی دو

1 Controlled auto ignition

2 C. Weiss

3 Semonov and Gussak

4 Onishi and Noguchi

5 Najt and Foster

6 Thring

7 Sjoberg

8 Amano

9 Kakuho

10 Ikemoto

تغییر انجام شده بر روی سامانه‌های موتور برای شرایط احتراقی HCCI شامل:

۱- سامانه گرمایش هوای ورودی: با نصب یک گرمکن برقی با گرمایش متغیر و همچنین دو حسگر دمایی قبل و بعد از این گرمکن، دمای متغیر مخلوط ورودی قابل دستیابی گردید. در شکل ۱ سامانه گرمکن هوای ورودی و حسگرهای مورد استفاده نشان داده است.

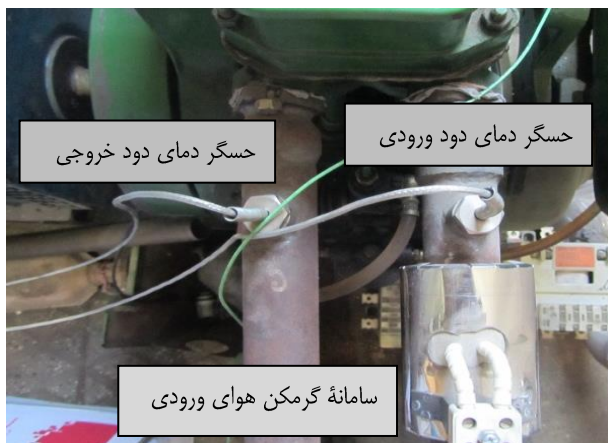
۲- سامانه بازخورانی گازهای خروجی: همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده، یک سامانه بازخورانی گازهای برگشتی طراحی و بر روی راهگاه خروجی نصب گردید و با زینه بندی این سامانه، پایش تغییرات کسر جرمی گاز برگشتی انجام شد.

۳- شمع نقطه ملتهب: با نصب یک شمع نقطه ملتهب بر روی بستار و در اطراف دریچه خروجی، امکان ایجاد چینه‌بندی دمایی در داخل محفظه فراهم گردید. محل نصب شمع نقطه ملتهب در شکل ۳ مشخص است.

۴- وسایل اندازه‌گیری: حسگرهای مختلفی برای اندازه‌گیری و نمایش فشار داخل اتاق احتراق، فشار راهگاه خروجی، دمای راهگاه ورودی و خروجی، سرعت موتور و جریان جرمی هوای ورودی و همچنین گاز طبیعی بر روی موتور قرار داده شده است. شکل ۴ تصویر کلی از اجزای تجهیزات آزمون و محل قرار گیری حسگرها را بصورت شماتیک نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات موتور

نوع موتور	دیزلی هوا خنک
قطر استوانه	۱۰۲ (mm)
طول مسیر	۱۱۰ (mm)
حجم موتور	۰.۹۴۸ (lit)
نسبت تراکم	۱۸:۱
دور موتور	۱۵۰۰ (rpm)
بیشینه توان در حالت دیزل	۱۰ (hp)



شکل ۱: سامانه گرمایش هوای ورودی

مرحله‌ای و اختلاط آن با هوا و سوخت تازه ورودی، ایجاد چینه‌بندی دمایی نمود. کراسلت^۱ و همکاران [۱۸-۱۹] لایه‌بندی حرارتی و ترکیب سوخت را با استفاده از ورودی‌های مستقل با دماهای مختلف مخلوط ورودی و ترکیب‌های واکنشی متفاوت در دو راهگاه جداگانه و در یک بستار چهار دریچه‌ای انجام دادند. جونگ^۲ و همکاران [۲۰] و جوالسون^۳ و همکاران [۲۱] روش‌های مختلفی برای چینه‌بندی دمایی از جمله: گرمایش مخلوط ورودی، نحوه بازخورانی گازهای خروجی، انتقال حرارت از دیواره استوانه، بستار و سنبه و تراکم مخلوط ورودی را در یک کار عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که شروع خوداشتعالی و طول مدت احتراق به شدت به میدان دمایی داخل استوانه حساس است. سانکاران^۴ و همکاران [۲۲] با سه توزیع دمایی متفاوت برای مخلوط ورودی، الگوی برای لایه‌بندی دمایی ارائه کرده‌اند. توزیع دمایی همگن، هسته گرم و هسته سرد در یک مخلوط رقیق و همگن هیدروژن-هوا، سه الگوی بررسی شده، در این مطالعه است. در این مطالعه تجربی برای بهبود قدرت خروجی و گسترش محدوده کارکرد موتوری HCCI در بارهای سنگین، فشار تقویت با استفاده از پرخورانی افزایش و برای جلوگیری از افزایش ناگهانی نرخ افزایش فشار و دوری از ناحیه کوبش، از چینه‌بندی دمایی استفاده شد.

از این مطالعات به روشنی مشخص است که احتراق واقعی HCCI در شرایط توزیع دمایی غیرهمگن اتفاق می‌افتد و احتراق در این شرایط غیرهمگن نسبت به مخلوط همگن آهسته‌تر است. بنابراین تلاش برای ایجاد ناهمگنی عمدی در توزیع دمایی مخلوط داخل محفظه می‌تواند روش مناسبی در پایش احتراق باشد. در این مقاله سعی شده تا با استفاده از چینه‌بندی دمایی مناسب بوسیله گرمایش مخلوط ورودی، بازخورانی گازهای خروجی و قرار دادن نقطه ملتهب^۵ در داخل استوانه بازه عملکردی را گسترش داد. برای بررسی تأثیر متغیرها بر عملکرد احتراق از یک الگوی احتراقی دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. همچنین در آزمون تجربی، با دمای مخلوط ورودی و مقدار گازهای بازخورانی شده ثابت تأثیر تغییر دمای نقطه ملتهب بر عملکرد احتراق بررسی می‌شود.

۲- تجهیزات و شرایط آزمون

بخش تجربی کار، بر روی موتوری پایه دیزلی که برای شرایط HCCI تغییر داده شد، انجام گرفته است. مشخصات اصلی موتور در جدول ۱ نشان داده شده است.

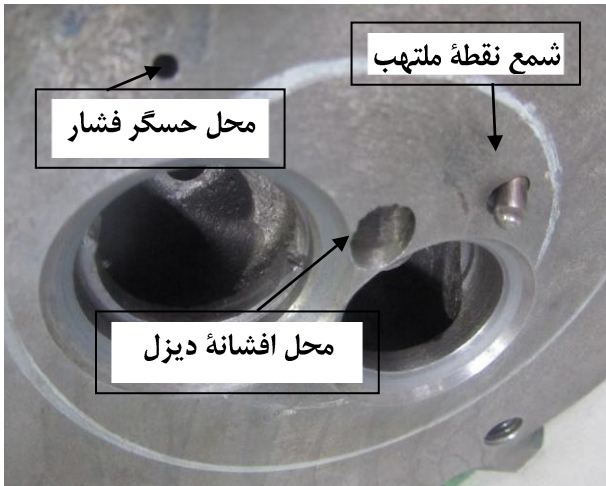
¹ Krasselt

² Jeong

³ Joelsson

⁴ Sankaran

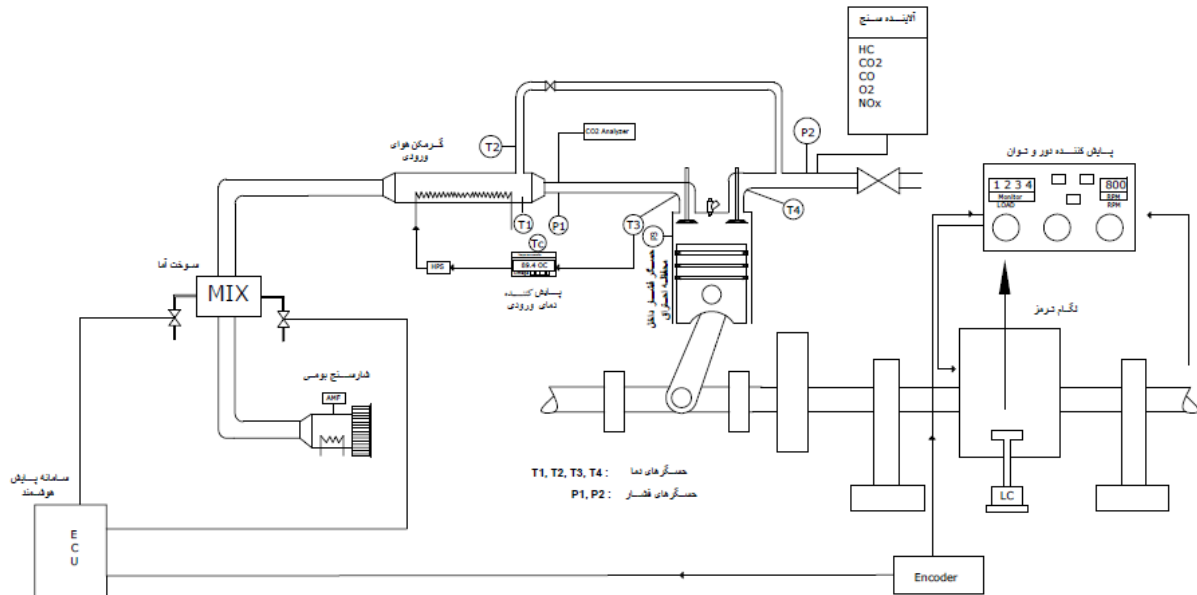
⁵ Glow plug



شکل ۳: محل نصب شمع نقطه ملتهب بر روی بستار



شکل ۲: سامانه بازگردانی دود خروجی



شکل ۴: تجهیزات آزمون و محل قرارگیری حسگرها

می‌دهد. اندازه‌گیری مقدار آلاینده‌های خروجی با استفاده از دستگاه AVL DICOM 4000 که قابلیت اندازه‌گیری پنج گاز CO_2 ، CO ، HC ، O_2 و NO را دارد، انجام می‌شود. در جدول ۲ دقت اندازه‌گیری آلاینده‌ها نشان داده شده است.

$$EGR = \frac{CO_{2,up}}{CO_{2,down}} \times 100 \quad (1)$$

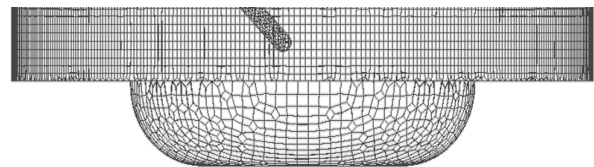
جدول ۲: دقت اندازه‌گیری دستگاه آلاینده سنج

CO	± 0.06 % Vol.
CO ₂	± 0.5 % Vol.
HC	± 12 ppm Vol.
O ₂	± 0.1 % Vol.
NO	± 50 ppm Vol.

از آنجایی که در تمامی مراحل آزمون دور موتور در ۱۵۰۰ دور در دقیقه ثابت بوده، برای ایجاد توان مصرفی و اندازه‌گیری مقدار آن از یک مولد قدرت الکتریکی جریان مستقیم به‌عنوان لگام ترمز استفاده شده است. اندازه‌گیری فشار داخل محفظه به‌وسیله حسگر پیزوالکتریک با نام Kistler-6052C با حساسیت خطایی ۰٫۵٪± انجام می‌شود. برای امکان نمایش مقادیر فشار از تقویت کننده با نام Kistler-5064 و برای تعیین نقطه مکث بالا از حسگر موقعیت زاویه لنگ بر روی چرخنده‌ای علامت گذاری در انتهای خروجی میل لنگ، استفاده می‌گردد. نسبت گازهای بازخورانی شده براساس حجم CO_2 اندازه‌گیری شده در بالادست و پایین‌دست خط گازهای بازخورانی شده، یعنی مقدار گاز در مسیر دود خروجی به مقدار آن در دود وارد شده به مسیر مخلوط ورودی محاسبه می‌شود. رابطه (۱) نحوه محاسبه مقدار گازهای بازخورانی شده را در این کار نشان

۳- شبیه‌سازی احتراق

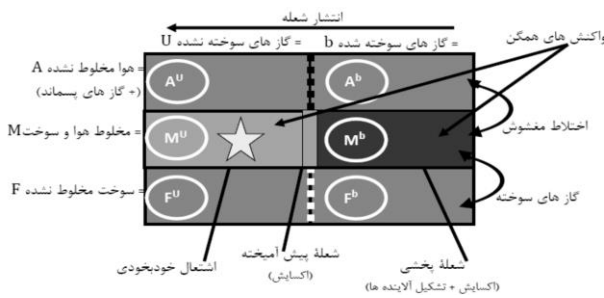
شبیه‌سازی احتراق در برنامه محاسباتی AVL-FIRE صورت می‌گیرد. برای اطمینان از صحت شرایط اولیه در شبیه‌سازی و همچنین استخراج نتایج عملکردی، نرخ آزادسازی حرارتی استخراج و به برنامه محاسباتی یک بعدی GT-POWER داده می‌شود. پس از اجرای برنامه توسط این نرم‌افزار، خروجی‌های مورد نیاز شامل دما، فشار ورودی و نسبت هم‌ارزی از آن استخراج شده و مجدداً با ورودی‌های جدید، نرم‌افزار FIRE به اجرا گذاشته شده و مشابه حالت قبل، پس از پایان فرایند شبیه‌سازی نرخ آزادسازی حرارتی به نرم‌افزار GT-POWER داده می‌شود. در شکل ۵ هندسه سه‌بعدی ساخته شده در نرم‌افزار FIRE نشان داده شده است. شبیه‌سازی احتراقی در این نرم‌افزار برای یک چرخه بسته یعنی از زمان بسته شدن دریچه ورودی تا زمان باز شدن دریچه خروجی انجام گرفته است. از آنجاییکه شبیه‌سازی سه‌بعدی تنها شامل چرخه تراکم و انبساط موتور است، دستیابی به شاخص‌های عملکردی موتور نظیر توان، بازده، مصرف سوخت و فشار مؤثر متوسط ترمزی در آن امکان پذیر نیست. لذا با وارد کردن مقدار آزادسازی گرمایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی احتراقی به الگوی یک‌بعدی GT-POWER، این داده‌های عملکردی استخراج می‌شوند. برای بررسی حساسیت شبکه به چگالی دانه‌بندی، نتایج دو شبکه محاسباتی با تعداد مختلف دانه مقایسه شده است. در شبکه درشت تعداد سلولهای محاسباتی در نقطه مکث بالا ۲۴۲۰۰ و در شبکه ریز تعداد سلولهای محاسباتی ۳۵۲۰۰ است. براساس شکل ۶ ریز کردن سلولها تأثیر چندانی بر نتایج نخواهد داشت و شبکه محاسباتی به اندازه دانه حساسیت چندانی ندارد و لذا برای کاهش زمان اجرای برنامه از شبکه درشت استفاده می‌شود.



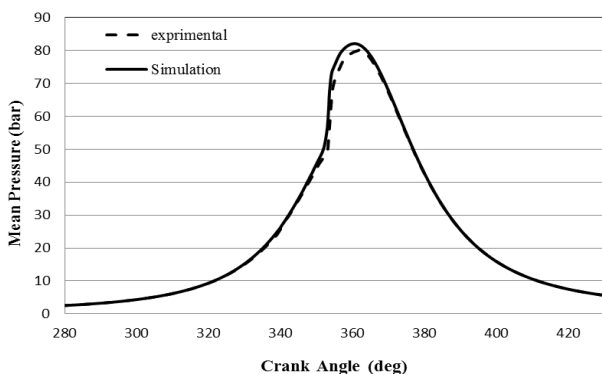
شکل ۵: هندسه شبکه‌بندی شده محفظه احتراق

۳-۱- الگوی احتراقی

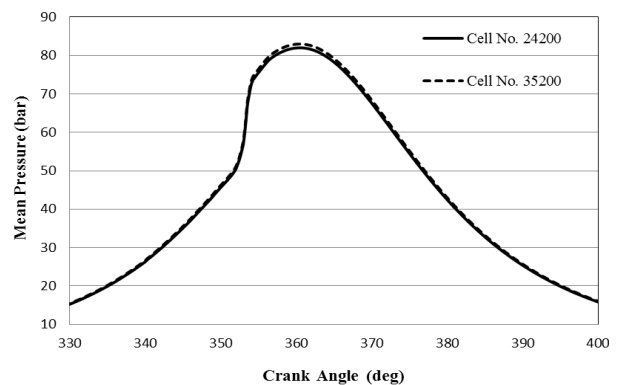
برای شبیه‌سازی احتراق از الگوی احتراقی ECFM-3Z ارائه شده در برنامه محاسباتی FIRE استفاده شده است. این الگوی احتراقی متعلق به خانواده الگوی احتراقی شعله منسجم (CFM) است که برای احتراق آشفته مخلوط‌های پیش آمیخته غیر همگن، غیر پیش آمیخته یا نفوذی و همچنین اشتعال خودبخودی توسعه یافته است. پیش واکنش‌های اشتعال خودبخودی در مخلوط پیش آمیخته سوخت و هوا محاسبه خواهند شد و مدت زمان تأخیر در اشتعال به‌وسیله فشار و دمای محلی، نسبت تعادل سوخت به هوا و همچنین مقدار گازهای باقیمانده تعیین می‌شود. پس از اشتعال خودبخودی محلی، احتراق پیش آمیخته در سوخت، هوا و گازهای سوخته شده و به دنبال آن احتراق نفوذی در یک ناحیه شامل سوخت و اکسید کننده اتفاق می‌افتد. در شکل ۷ نواحی احتراقی، گونه‌های اختلاطی و احتراقی و روند واکنشی گونه‌ها نشان داده شده است [۲۳]. برای صحت‌گذاری نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آزمون تجربی، در بخش نتایج آزمون تجربی، سه حالت مختلف که با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتخاب شده‌اند آزمون و نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌شوند. برای صحت‌گذاری نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نمودار فشار داخل محفظه حاصل از آزمون تجربی در شرایط پایه یعنی نسبت هوای اضافه ۳/۲، نسبت گازهای باخورانی شده ۳٪، دمای ۴۲۶ کلوین برای مخلوط ورودی و بدون استفاده از شمع نقطه ملتهب، با نتایج شبیه‌سازی در شکل ۸ مقایسه شده است.



شکل ۷: ناحیه‌بندی گونه‌ها در الگوی احتراقی

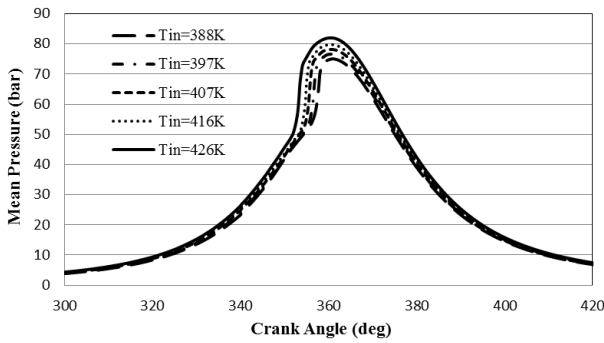


شکل ۸: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی تغییرات متوسط فشار داخل محفظه بر اساس زاویه میل لنگ

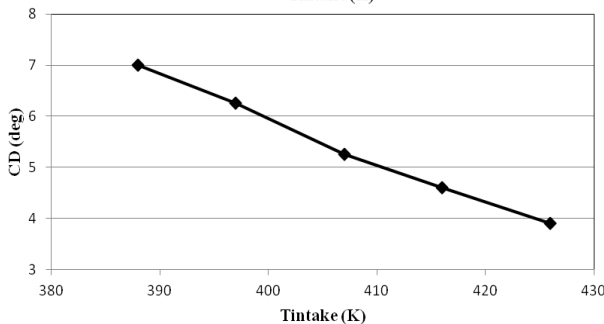
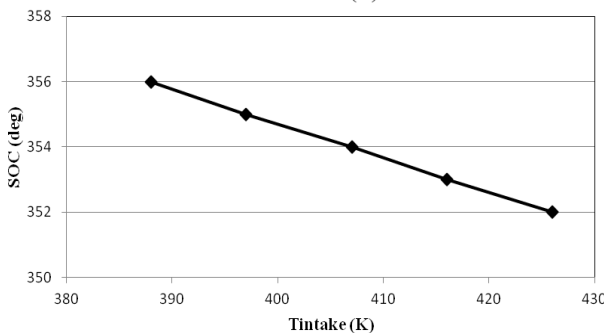
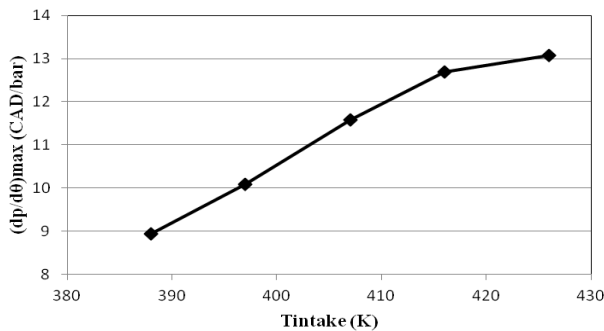


شکل ۶: تغییرات فشار داخل استوانه برای دو شبکه محاسباتی

۱۰٪ تا ۹۰٪ حداکثر مقدار آزادسازی گرمای تجمعی^۲ است. همچنین زمان شروع احتراق (SOC)، موقعیتی از زاویه گردش میل لنگ است که مقدار آزادسازی گرمای تجمعی به ۱۰٪ حداکثر مقدار خود می‌رسد [۲۵]. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای ورودی طول مدت احتراق بدلیل پیش افتادن زمان شروع آزادسازی گرما، کاهش می‌یابد.



شکل ۹: تغییرات متوسط فشار داخل محفظه براساس زاویه میل لنگ



شکل ۱۰: تغییرات نرخ افزایش فشار، زمان شروع احتراق و طول مدت احتراق برحسب تغییرات دمای ورودی

نتایج حاصل از آزمون تجربی و نتایج شبیه‌سازی در پیش‌بینی زمان شروع احتراق و روند افزایش و کاهش دما هم‌خوانی خوبی دارد اما مقدار بیشینه فشار داخل محفظه و همچنین حداکثر نرخ افزایش فشار در نتایج آزمون تجربی نسبت به نتایج شبیه‌سازی کمتر است.

۴- بحث بر روی نتایج شبیه‌سازی

گاز طبیعی در مقایسه با سوخت‌های بنزینی دارای عدد اکتان و دمای خوداشتعالی بیشتری است. دمای زیاد خود اشتعالی، ناشی از مقاومت مولکول‌های متان در برابر واکنش با رادیکال‌های آزاد در شروع احتراق است. بنابراین در احتراق HCCI گاز طبیعی دمای مخلوط در انتهای تراکم نقش مهمی در شروع احتراق خواهد داشت. با توجه به اینکه متان بخش اصلی گاز طبیعی را تشکیل داده است، این سوخت دارای اشتعال یک مرحله‌ای است. گاز طبیعی در مقایسه با سایر سوخت‌ها، نرخ آزادسازی گرمای واکنش‌های خنک‌تر بسیار ناچیزی دارد و در نتیجه شروع احتراق همراه با یک آزادسازی گرمای سریع و زیاد خواهد بود. لذا برای جلوگیری از کوبش شدید، مخلوط ورودی باید با هوا و یا گازهای بازخورانی شده بسیار رقیق گردد. از آنجایی که هدف از انجام این مقاله، پایش مراحل احتراق HCCI گاز طبیعی با استفاده از چینه‌بندی دمایی در محفظه احتراق است، تأثیر دمای مخلوط ورودی، میزان بازخورانی گازهای برگشتی و دمای نقطه ملتهب بر عملکرد احتراق مخلوطی رقیق بررسی می‌شود.

۴-۱- تأثیر گرمایش مخلوط ورودی

افزایش دمای ورودی که در نهایت منجر به افزایش دمای داخل محفظه در لحظه بسته شدن دریچه ورودی می‌شود، زمان شروع اشتعال را پیش خواهند انداخت. از طرف دیگر کاهش بیش از اندازه دمای مخلوط ورودی منجر به خاموشی شعله می‌گردد. در شکل ۹ تغییرات فشار داخل محفظه در دماهای مختلف ورودی نشان داده شده است. با افزایش دمای ورودی و به‌دنبال آن پیش افتادن زمان شروع اشتعال، بیشینه فشار داخل محفظه افزایش می‌یابد و با افزایش نرخ تغییرات فشار با افزایش دمای ورودی، تمایل به کوبش افزوده می‌شود. شکل ۱۰ تغییرات نرخ تغییرات فشار، زمان شروع اشتعال و طول مدت احتراق را با تغییر دمای ورودی نشان می‌دهد. بررسی نتایج در کاری مشابه که توسط ضابطیان و مظفری [۲۴] انجام شده است بر درستی نتایج به‌دست آمده صحه می‌گذارد. در این کار تأکید شده است که گرمایش مخلوط ورودی یکی از مهمترین عوامل پایش زمان شروع اشتعال در احتراق موتورهای HCCI است و تأثیر بسزایی در عملکرد آنها خواهد داشت. طول مدت احتراق (CD^۱) مدت زمان مورد نیاز (برحسب زاویه گردش میل لنگ) برای آزاد سازی گرما از

^۲ Gross accumulated heat release

^۱ Combustion duration

۴-۲- تأثیر بازخورانی دود خروجی

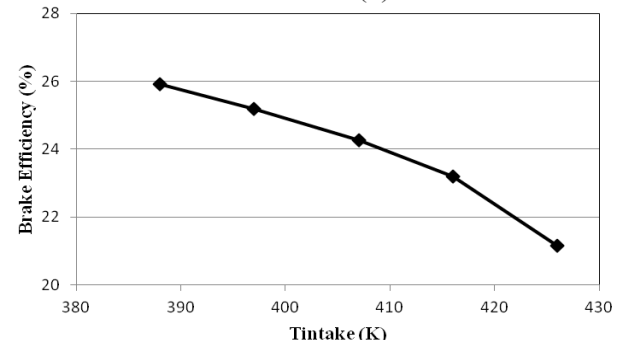
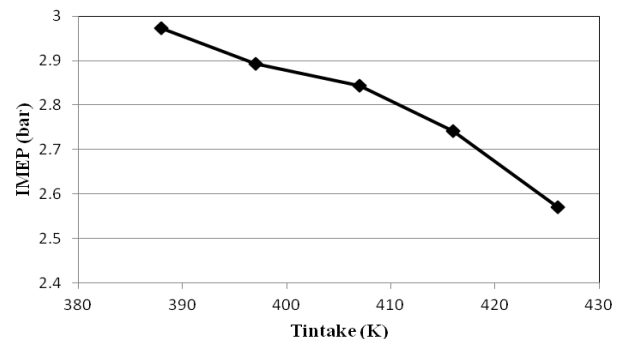
مسیر بازخورانی دود خروجی همان طوری که در شکل‌های ۲ و ۴ نشان داده شده است، راهگاه خروجی را به راهگاه ورودی متصل می‌کند. مقدار جریان گازهای بازخورانی شده به موقعیت شیر EGR، فشار راهگاه خروجی، فشار راهگاه ورودی، سرعت موتور و زمان‌بندی دریچه بستگی دارد. در سرعت‌های کم موتور فشار راهگاه خروجی کاهش می‌یابد و حتی در موقعیت تمام باز شیر EGR، افزایش مقدار گازهای بازخورانی شده با محدودیت مواجه می‌شود. در کار حاضر تمامی اجراها در سرعت ثابت ۱۵۰۰ دور در دقیقه انجام گرفته و به همین دلیل برای حداکثر مقدار بازخورانی دود خروجی محدودیتی وجود نخواهد داشت. دود خروجی بدلیل وجود آرومایتک، CO₂ و H₂O دارای ظرفیت گرمایی بیشتری از هوا و نسبت گرمای ویژه کمتر از هواسا؛ در نتیجه دمای پس از تراکم مخلوط داخل محفظه با وجود نسبتی از دود خروجی، کمتر از مخلوط با هوای خالص خواهد بود. کاهش دمای پس از تراکم مخلوط داخل محفظه، موجب به تأخیر افتادن زمان شروع احتراق می‌شود. همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با افزایش نسبت بازخورانی گازهای خروجی، احتراق با تأخیر بیشتری شروع شده و طول مدت احتراق افزایش می‌یابد. افزایش طول مدت احتراق تأثیر بسزایی در احتراق آرام و بدون صدای موتور خواهد داشت. به‌طور کلی بازخورانی دود خروجی از پنج جنبه بر عملکرد احتراق HCCI تأثیر می‌گذارد که شامل: گرمایش مخلوط ورودی، رقیق سازی مخلوط ورودی، تغییر ظرفیت گرمایی و چینه‌بندی مخلوط داخل محفظه است. گرمایش مخلوط ورودی به‌طور مجزا موجب پیش افتادن زمان خوداشتعالی، افزایش نرخ آزادسازی حرارت و کوتاه شدن طول مدت احتراق خواهد شد. رقیق‌سازی تأثیری بر روی مرحله خوداشتعالی ندارد اما طول مدت احتراق را می‌افزاید و نرخ آزادسازی حرارت را کاهش می‌دهد. تغییر ظرفیت گرمایی همان طور که پیشتر اشاره شد، موجب به تأخیر افتادن زمان شروع اشتعال و تاخیزی افزایش طول مدت احتراق می‌شود [۲۶، ۲۷]. بیشینه فشار داخل محفظه، حداکثر نرخ افزایش فشار و همچنین شدت کوبش در احتراق HCCI تحت تأثیر نسبت گازهای بازخورانی شده و نسبت هوای اضافه قرار دارد. همان طور که گفته شد، بیشینه فشار داخل محفظه و نرخ افزایش فشار در موتورهایی با احتراق HCCI نسبت به موتورهای مرسوم بیشتر است و یکی از عوامل محدودکننده در کاربردی‌سازی این نوع موتورها به حساب می‌آید. با افزایش مقدار نسبت گازهای بازخورانی شده می‌توان مقدار بیشینه فشار و حداکثر نرخ افزایش فشار را پایش نمود. همان طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، افزایش نسبت گازهای بازخورانی شده در نسبت هوای اضافه ثابت، موجب کاهش هر دو شاخص می‌شود.

در شکل ۱۱ تأثیر دمای ورودی بر فشار مؤثر متوسط ترمزی (IMEP) و بازده حرارتی نشان داده شده است. افزایش دمای ورودی موجب پیش اندازی احتراق و افزایش کار تراکم و در نتیجه کاهش کار انبساط و بازده حجمی شده و به‌دنبال آن IMEP و بازده حرارتی در اثر افزایش دمای ورودی، کاهش می‌یابد.

در جدول ۳ مقدار تغییرات کسر جرمی CO و THC با تغییر دمای ورودی ارائه شده است. مخلوط ورودی در احتراق HCCI بدلیل نرخ بیش از اندازه آزادسازی حرارت، بسیار رقیق است. به همین دلیل، دمای احتراق کاهش یافته و به دنبال آن تولید آلاینده NOx نیز بسیار کم خواهد شد. اما کاهش بیش از اندازه دمای احتراق مانع اکسیداسیون کامل سوخت می‌شود. منبع اصلی تولید آلاینده CO همین اکسیداسیون ناقص است. بنابراین همان طوری که در جدول ۲ مشخص است، افزایش دمای مخلوط ورودی موجب کاهش این آلاینده خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای ورودی موجب کاهش THC خواهد شد.

جدول ۳: مقدار کسر جرمی CO و THC برای تغییرات دمای مخلوط ورودی

کسر جرمی (%)	دمای مخلوط ورودی (K)				
	۴۲۶	۴۱۶	۴۰۷	۳۹۷	۳۸۸
CO	۳۴۲	۳۵۲	۳۷۱	۳۷۸	۳۸۳
THC	۸۳٫۶	۹۵٫۵	۱۰۵	۱۱۵	۱۱۸

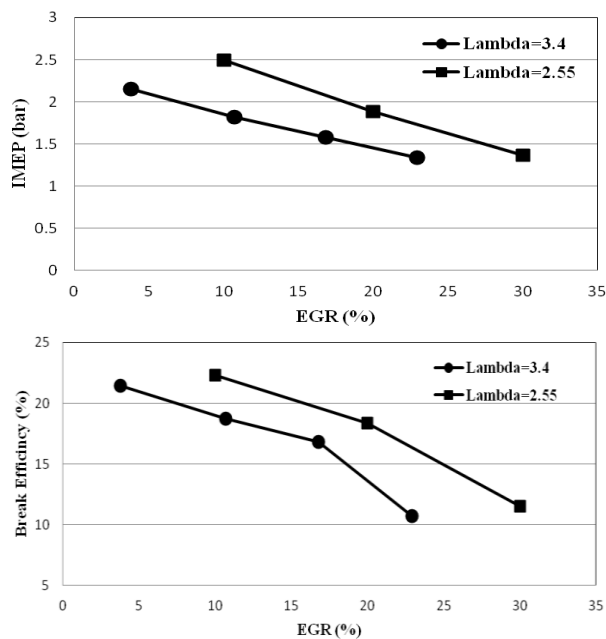


شکل ۱۱: تغییرات IMEP و بازده حرارتی برحسب تغییرات دمای ورودی

در شکل ۱۴ تغییرات فشار مؤثر متوسط ترمزی و بازده حرارتی با افزایش نسبت گازهای بازخورانی شده در شرائط نسبت هوای اضافه ثابت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت گازهای بازخورانی شده و یا نسبت هوای اضافه، توان خروجی موتور کاهش می‌یابد و حداکثر مقدار توان قابل دستیابی در حداکثر مقدار گازهای بازخورانی شده حاصل می‌گردد. در حقیقت ثابت نگه داشتن نسبت هوای اضافه و افزایش نسبت گازهای بازخورانی شده توان موتور را کاهش می‌دهد. اما افزایش نسبت گازهای بازخورانی شده به همراه کاهش نسبت هوای اضافه موجب افزایش توان خروجی می‌شود.

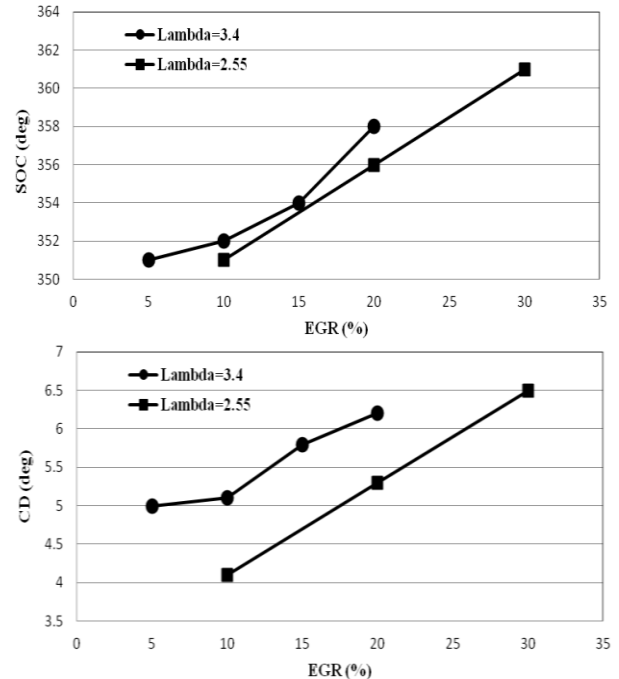
بازده حرارتی نیز همچون توان خروجی به شدت تحت تأثیر نسبت گازهای بازخورانی شده و نسبت هوای اضافه قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین بازده حرارتی در نزدیکی مرزهای کوبش حاصل می‌شود و کمترین مقدار آن نیز در حوالی مخلوط بسیار رقیق به دست خواهد آمد. افزایش نسبت هوا به سوخت با جایگزینی مولکول‌های هوا به جای مولکول‌های سوخت، موجب کاهش ظرفیت گرمایی مخلوط و دمای بیشتر مخلوط پس از چرخه تراکم می‌شود، اما از طرف دیگر، نسبت هوا به سوخت رقیق‌تر موجب کاهش دمای احتراق خواهد شد.

کاهش دمای احتراق و به دنبال آن کاهش دمای چرخه انبساط موجب اکسیداسیون ناقص CO و THC می‌شود و میزان این آلاینده‌ها را در خروجی می‌افزاید. همان‌طور که انتظار می‌رود، میزان CO و THC با افزایش نسبت گازهای بازخورانی شده در نسبت هوای اضافی ثابت، افزایش می‌یابد.

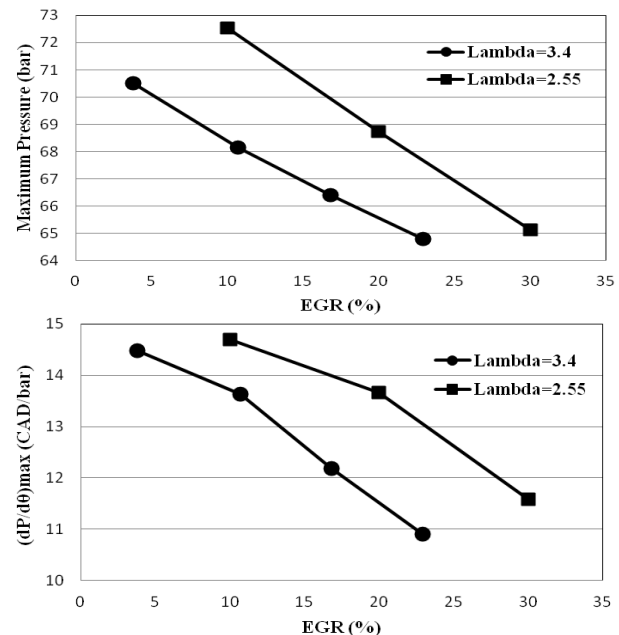


شکل ۱۴: تغییرات IMEP و بازده حرارتی برحسب تغییرات نسبت گازهای بازخورانی شده

از طرف دیگر، ترکیب نسبت گازهای بازخورانی شده و نسبت هوای اضافه مقدار توان خروجی را در موتوری HCCI مشخص می‌کند. جایگزینی هوای ورودی با گازهای بازخورانی شده، موجب افزایش فشار مؤثر متوسط ترمزی می‌شود و این درحالیست که اگر با افزایش نسبت گازهای بازخورانی شده مقدار نسبت هوای اضافه ثابت نگه داشته شود، فشار مؤثر متوسط ترمزی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲: تغییرات زمان شروع اشتعال و طول مدت احتراق برحسب تغییرات نسبت گازهای بازخورانی شده



شکل ۱۳: تغییرات بیشینه فشار و حداکثر نرخ افزایش فشار برحسب تغییرات نسبت گازهای بازخورانی شده

کوبش کاهش یابد. بنابراین با ایجاد ناهمگنی دمایی هرچند بیشینه فشار داخل محفظه افزوده می‌شود، اما با کاهش حداکثر نرخ افزایش فشار و به دنبال آن مسطح شدن نمودار آزادسازی گرما، امکان دستیابی به توان‌های بزرگتر فراهم می‌گردد.

نکته حائز اهمیت در افزایش دمای نقطه ملتهب، رابطه عکس عمر شمع با دمای کاری آن است؛ یعنی با افزایش دمای شمع در شرایط دائم کار، از عمر آن کاسته می‌شود. از طرف دیگر در نتایج مشخص است که با افزایش دمای شمع به مقادیر گرمتر، از نرخ کاهش زمان تأخیر در اشتعال نیز کاسته می‌شود.

در شکل ۱۵ فرایند انتشار شعله در اطراف شمع نقطه ملتهب و به دنبال آن گسترش شعله در محفظه احتراق نشان داده شده است. در این شکل تغییرات چهار شاخص دما، توزیع سوخت (CH_4)، مونواکسیدکربن (CO) و دی‌اکسیدکربن (CO_2) در زوایای مختلف گردش میل لنگ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در این بخش مقدار گازهای بازخورانی شده بسیار ناچیز و دمای مخلوط ورودی در ۴۲۶ کلوین ثابت نگه داشته شده است. مونواکسیدکربن یکی از گونه‌های واکنش تعادلی در یک مرحله از سازوکار واکنش‌های شیمیایی است. اگرچه مونواکسیدکربن یک محصول میانی مستقیم احتراق نیست، ولی غلظت آن تعیین‌کننده سرعت واکنش‌های شیمیایی به‌ویژه در دماهای گرم است.

بنابراین از غلظت آن می‌توان مکان فعال بودن واکنش‌های شیمیایی احتراق را تعیین نمود. از طرف دیگر غلظت دی‌اکسیدکربن به‌عنوان یک محصول احتراق، نشان‌دهنده کامل بودن احتراق است؛ به ویژه زمانی که دمای محفظه احتراق و غلظت مونواکسیدکربن کاهش می‌یابد. بنابراین همه این چهار شاخص کمک می‌کنند تا تفسیر بهتری از اشتعال در اطراف شمع نقطه ملتهب داشته باشیم.

۵- نتایج حاصل از آزمون تجربی

با توجه به نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی احتراق در مراحل قبل، ۳ حالت مختلف که در جدول ۴ ارائه شده، برای صحت‌گذاری نتایج انتخاب گردید. تمامی این حالت‌ها در شرایط تنفس طبیعی و باز بودن کامل پروانه هوا^۲ آزمون شده‌اند. در انجام این آزمون‌ها، دمای مخلوط ورودی و مقدار گازهای بازخورانی شده ثابت و دمای شمع نقطه ملتهب متغیر انتخاب شده‌اند.

حالت ۱ در جدول ۴ براساس شرایط پایه آزمون شد و نتایج مربوط به آن در شکل ۸ نشان داده شده است. در شکل ۱۸ برای دو حالت مختلف استفاده از شمع نقطه ملتهب که در جدول ۴ ارائه شده، نتایج فشار داخل استوانه با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در حالت کلی که با افزایش نسبت گازهای بازخورانی شده، نسبت هوای اضافه کاهش می‌یابد، کمترین مقدار این آلاینده‌ها در بیشترین نسبت گازهای بازخورانی شده که مخلوط در نزدیکی شرایط مخلوط درست^۱ قرار دارد، حاصل می‌شود.

۴-۳- تأثیر تغییر دمای نقطه ملتهب

از آنجایی که خوداشتعالی به شکل قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر دمای مخلوط داخل استوانه قرار دارد، مقدار دما و همچنین نحوه توزیع دمایی مخلوط داخل محفظه احتراق، نقش مهمی در زمان خوداشتعالی و پایش احتراق HCCI خواهد داشت. همان طور که پیشتر نیز اشاره شد، احتراق HCCI یک مخلوط کاملاً همگن، با نرخ ناگهانی افزایش فشار و در نتیجه شرایط احتراقی مشابه با کوبش همراه خواهد بود. یکی از روش‌هایی که می‌تواند حداکثر مقدار نرخ آزادسازی حرارت را کاهش داده و احتراق ملایم‌تری را به دنبال داشته باشد، ایجاد ناهمگنی دمایی در مخلوط داخل محفظه احتراق است. در این مقاله، همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با قرار دادن یک شمع نقطه ملتهب بر روی بستار و در اطراف دریچه خروجی، ناهمگنی دمایی در مخلوط داخل محفظه ایجاد شده است.

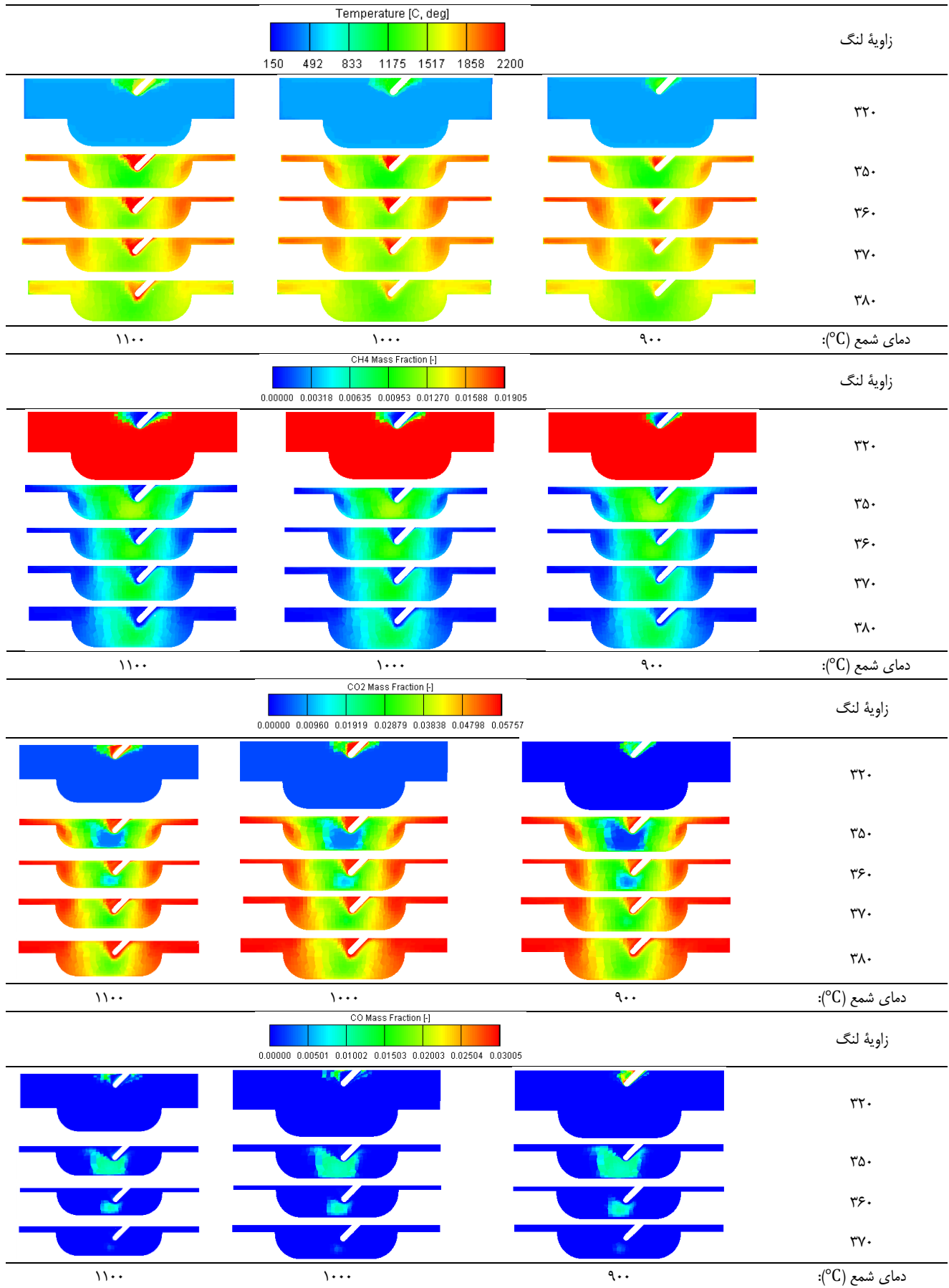
استفاده از شمع نقطه ملتهب در موتوری با احتراق HCCI تاکنون در مقاله‌ای گزارش نشده است اما در یک کار تجربی - عددی در موتوری گاز سوز تزریق مستقیم با افشانه در داخل محفظه احتراق، از شمع نقطه ملتهب برای کمک به شروع احتراق و دوری از کوبش استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش دمای شمع نقطه ملتهب و ثابت نگه داشتن دما و فشار هوای ورودی، ترکیب گاز طبیعی و شرایط پاشش گاز، مهلت اشتعال کاهش می‌یابد و همچنین از میزان آلاینده‌های خروجی نیز کاسته می‌شود [۲۸].

شمع نقطه ملتهب استفاده شده در این کار از شرکت بوش انتخاب شده است که قابلیت عمر زیاد در شرایط کار دائم را دارد. همچنین همان طور که در شکل ۱۶ نشان داده است در کمتر از ۳ ثانیه به حداکثر دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد خواهد رسید. البته باید خاطر نشان شود سامانه پایش طراحی شده برای این شمع، قابلیت ایجاد دمای متغیر برای شمع نقطه ملتهب را میسر نموده است. در این سامانه با تغییر ولتاژ از ۸ تا ۱۱ ولت امکان تغییر دمایی از ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد بوجود آمده است.

در شکل ۱۷ تغییرات فشار داخل محفظه با تغییر دمای شمع نقطه ملتهب نشان داده شده است. با توجه به اینکه با افزایش دمای شمع نقطه ملتهب، زمان تأخیر در اشتعال کاهش می‌یابد و شروع احتراق پیش می‌افتد، بیشینه فشار داخل محفظه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با ایجاد ناهمگنی طول مدت احتراق افزایش می‌یابد که موجب می‌شود، حداکثر مقدار نرخ افزایش فشار و به دنبال آن تمایل به

² Throttle

¹ Stoichiometric



شکل ۱۵: توزیع دما، توزیع CH₄، CO₂ و CO در زوایای مختلف گردش میل لنگ

جدول ۴: شرایط آزمون تجربی

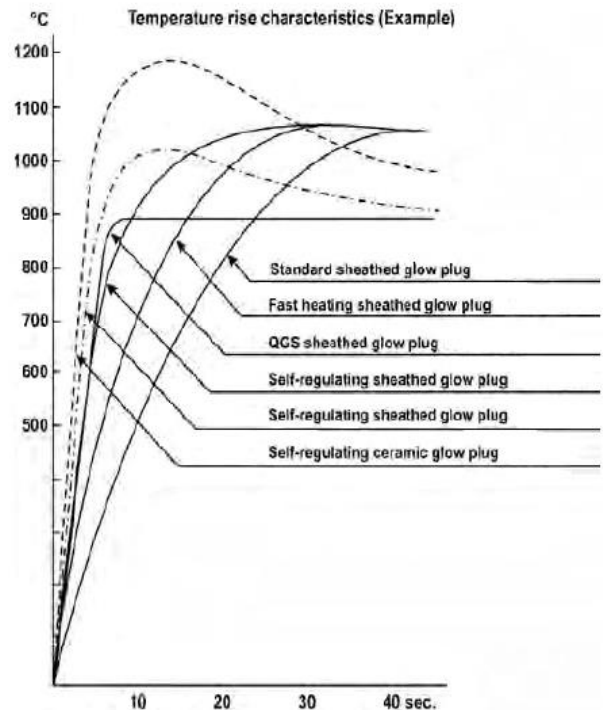
شماره آزمون	نسبت هوای اضافه	EGR (%)	دمای مخلوط ورودی (K)	دمای شمع نقطه ملتهب (°C)
۱	۳,۲	۳	۴۲۶	بدون شمع
۲	۳,۲	۳	۴۲۶	۱۰۰۰
۳	۳,۲	۳	۴۲۶	۱۱۰۰

در نتایج حاصل از آزمون تجربی مقدار بیشینه فشار داخل محفظه و همچنین حداکثر نرخ افزایش فشار نسبت به نتایج شبیه سازی کمتر است. علت اساسی این کاهش، ناهمگنی طبیعی توزیع سوخت و شرایط دمایی مخلوط در داخل محفظه در شرایط واقعی در مقایسه با شرایط شبیه سازی است. اختلاط غیر همگن مخلوط تازه و گازهای باقیمانده در ورودی، اختلاط غیر همگن مخلوط تازه و گازهای باقیمانده در محفظه احتراق و انتقال حرارت و آشفتنی جریان داخل محفظه در خلال چرخه تراکم از دلایل ایجاد این ناهمگنی طبیعی در توزیع سوخت و شرایط دمایی داخل محفظه است.

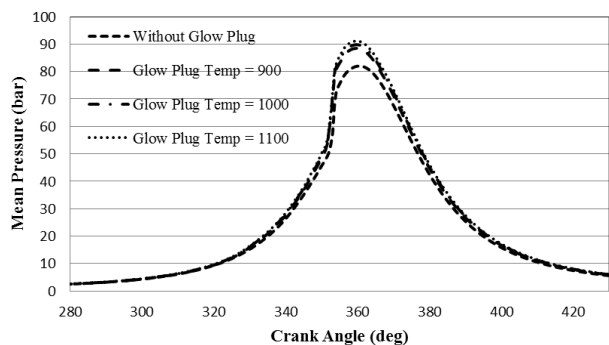
۶- نتیجه گیری

از مطالعات انجام شده در ارتباط با احتراق HCCI به روشنی مشخص است که احتراق واقعی در شرایط توزیع دمایی غیر همگن اتفاق می افتد و احتراق در شرایط غیر همگن نسبت به مخلوط همگن آهسته تر است. بر همین اساس در این کار، تلاش شده تا تأثیر چینه بندی دمایی مناسب به وسیله گرمایش مخلوط ورودی، بازخوری گازهای خروجی و قرار دادن نقطه ملتهب در داخل استوانه بر گسترش بازه عملکردی موتوری HCCI بررسی شود. ابتدا برای بررسی تأثیر متغیرها بر عملکرد احتراق از یک الگوی اختراقی دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد و در ادامه، با نتایج به دست آمده از شبیه سازی، در آزمون تجربی، با دمای مخلوط ورودی و مقدار گازهای بازخوری شده ثابت تأثیر تغییر دمای نقطه ملتهب بر عملکرد احتراق بررسی شد.

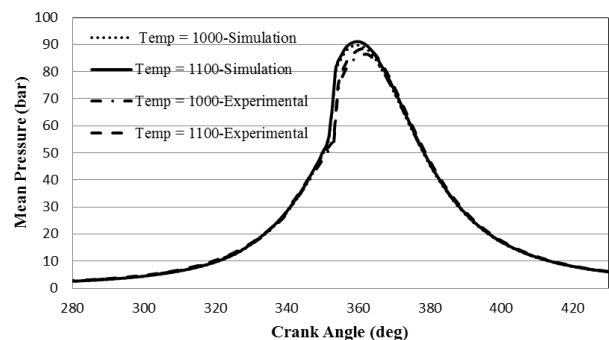
نتایج نشان می دهد گرمایش مخلوط ورودی موجب پیش افتادن زمان اشتعال، کاهش طول مدت احتراق، افزایش بیشینه فشار داخل محفظه، افزایش نرخ رشد فشار، کاهش IMEP و بازده حرارتی و کاهش CO و THC خواهد شد. همچنین نتایج بیانگر این واقعیت است که با افزایش نسبت گازهای بازخوری شده در نسبت ثابت هوای اضافه، زمان شروع اشتعال به تأخیر می افتد، طول مدت احتراق افزایش و بیشینه فشار داخل محفظه و حداکثر نرخ افزایش فشار کاهش خواهد یافت.



شکل ۱۶: تغییرات دمای شمع نقطه ملتهب بوش نسبت به زمان [۲۸]



شکل ۱۷: تغییرات فشار متوسط داخل محفظه در شرایط استفاده از نقطه ملتهب



شکل ۱۸: تغییرات متوسط فشار داخل محفظه بر اساس زاویه میل لنگ برای حالت ۲ و ۳ از جدول ۳

- [6] M. Noguchi, Y. Tanaka, T. Tanaka, Y. Takeuchi, A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion, SAE International, Paper No. 790840, 1979
- [7] P.M. Najt, D.E. Foster, Compression-ignited homogeneous charge combustion, SAE International, Paper No. 830264, 1983
- [8] R.H. Thring, Homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines, SAE International, Paper No. 892068, 1989
- [9] O. Jahanian, S.A. Jazayeri, A comprehensive study on the leading factors affecting on the start of combustion in a homogenous charge compression ignition (HCCI) engine fueled with methane, The Journal of Engine Research, Vol. 20, pp. 69-79, 2010
- [10] M. Sjoeborg, J.E. Dec, N.P. Cernansky, Potential of thermal stratification and combustion retard for reducing pressure-rise rates in HCCI engines based on multi-zone modeling and experiments, SAE International, Paper No. 2005-01-0113, 2005
- [11] T. Amano, S. Morimoto, Y. Kawabata, Modeling of the effect of air/fuel ratio and temperature distribution on HCCI engines, SAE International, Paper No. 2001-01-1024, 2001
- [12] E.D. John, W. Hwang, Characterizing the development of thermal stratification in an HCCI engine using planar-imaging thermometry, SAE International Journal of Engines, Vol. 2, pp. 421-438, 2009
- [13] T.C. Liu, J.B. Jeffries, R.K. Hanson, Wavelength modulation absorption spectroscopy with 2f detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows, Applied Physics B, Vol. 78, pp. 503-511, 2004
- [14] T. Noda, D.E. Foster, A numerical study to control combustion duration of hydrogen-fueled HCCI by using multi-zone chemical kinetics simulation, SAE International, Paper No. 2001-01-0250, 2001
- [15] S.N. Shahangian, S.A. Jazayeri, Effect of initial temperature and EGR on combustion and performance characteristics of homogenous charge compression ignition engine fueled with dimethyl ether, The Journal of Engine Research, Vol. 14, pp. 63-70, 2009
- [16] A. Kakuho, M. Nagamine, Y. Amenomori, T. Urushihara, T. Itoh, In-cylinder temperature distribution measurement and its application to HCCI combustion, SAE International, Paper No. 2006-01-1202, 2006
- [17] M. Ikemoto, Y. Kojima, N. Iida, Development of the control system using EGR gas for the HCCI engine running on DME, SAE International, Paper No. 2005-32-0062, 2005

همچنین با افزایش نسبت گازهای بازخورانی شده در شرائطی که نسبت هوای اضافه ثابت نگه داشته می‌شود، مقدار IMEP و بازده حرارتی کاهش و مقادیر CO و THC افزایش خواهند یافت. اصلی‌ترین شاخص در ایجاد چینه‌بندی دمایی در داخل محفظه احتراق، استفاده از شمع نقطه ملتهب در بستار است. افزایش دمای شمع نقطه ملتهب در داخل محفظه احتراق موجب پیش‌رسی احتراق، افزایش بیشینه فشار داخل محفظه، کاهش حداکثر نرخ افزایش فشار و به دنبال آن کاهش تمایل به کوبش خواهد شد. بنابراین با انتخاب مقادیر بهینه دمای مخلوط ورودی، نسبت گازهای بازخورانی شده و دمای شمع نقطه ملتهب می‌توان بازه عملکردی احتراق را در شرائط چینه‌بندی شده نسبت به حالت پایه افزایش داد. برای صحت‌گذاری نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، در یک دمای ثابت مخلوط ورودی و نسبت ثابت گازهای بازخورانی شده، تأثیر تغییر دمای شمع نقطه ملتهب بر احتراق HCCI بررسی شد. نتایج آزمون تجربی نیز بر گسترش بازه عملکردی در شرائط چینه‌بندی دمایی داخل محفظه صحت گذاشته است.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از همکاری علمی و مشاوره‌ای شرکت دیزل سنگین ایران و شرکت مدرن سیستم البرز به‌ویژه آقای مهندس محمود رضازاده که در تجهیز و راه اندازی اتاق آزمون نهایت همکاری را داشته‌اند، تقدیر و تشکر می‌گردد.

References

- [1] M. Kraft, P. Maigaard, F. Mauss, M. Christensen, B. Johansson, Investigation of combustion emissions in a homogeneous charge compression injection engine: Measurements and a new computational model, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, pp. 1195-1201, 2000
- [2] H. Zhao, Homogeneous charge compression ignition (HCCI) and controlled auto ignition (CAI) engines for the automotive industry, Wood-head Publishing Ltd., Brunel University, UK, 2007
- [3] O. Erlandsson, Early Swedish hot-bulb engines - Efficiency and performance compared to contemporary gasoline and diesel engines, SAE International, Paper No. 2002-01-0115, 2002
- [4] L.A. Gussak, High chemical activity of incomplete combustion products and a method of pre-chamber torch ignition for avalanche activation of combustion in internal combustion engines, SAE International, Paper No. 750890, 1975
- [5] S. Onishi, S.H. Jo, K. Shoda, P.D. Jo, S. Kato, Active thermo-atmosphere combustion (ATAC): A new combustion process for internal combustion engines, SAE International, Paper No. 790501, 1979

- [24] M. Zabetian, A. Mozaffari, Combustion simulation of natural gas in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines and analysis of effect of engine operating conditions on combustion initiation, *The Journal of Engine Research*, Vol. 14, pp.1-10, 2009
- [25] V. Hosseini, Reformer gas application in HCCI combustion engine, PhD Thesis, University of Alberta, Canada, 2008
- [26] H. Zhao, Z. Peng, J. Williams, N. Ladommatos, Understanding the effects of recycled burnt gases on the controlled auto ignition (CAI) combustion in four-stroke gasoline engines, SAE International, Paper No. 2001-01-3607, 2001
- [27] H. Zhao, Z. Peng, N. Ladommatos, Understanding of controlled auto ignition combustion in a four-stroke gasoline engine, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 215, pp. 1297-1310, 2001
- [28] X. Cheng, Modeling injection and ignition in direct injection natural gas engine, PhD Thesis, University of Toronto, Canada, 2008
- [18] J. Krasselt, J. Ghandhi, R. Herold, P. Najt, D. Reuss, D. Foster, Investigations into the effects of thermal and compositional stratification on HCCI combustion - Part I: Metal engine results, SAE International, Paper No. 2009-01-1105, 2009
- [19] R.E. Herold, J.M. Krasselt, D.E. Foster, J.B. Ghandhi, D.L. Reuss, P.M. Najt, Investigations into the effects of thermal and compositional stratification on HCCI combustion - Part II: Optical engine results, SAE International, Paper No. 2009-01-1106, 2009
- [20] D.W. Jeong, O.S. Kwon, O.T. Lim, The research about thermal stratification effect on pressure rise rate in supercharged HCCI engine based on numerical analysis, SAE International, Paper No. 2009-32-0141, 2009
- [21] T. Joelsson, R. Yu, X.S. Bai, N. Takada, I. Sakata, Flow and temperature distribution in an experimental engine: LES studies and thermographic imaging, SAE International, Paper No. 2010-01-2237, 2010
- [22] R. Sankaran, H.G. Ima, E.R. Hawkes, J.H. Chen, The effects of non-uniform temperature distribution on the ignition of a lean homogeneous hydrogen - air mixture, *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 875-882, 2005
- [23] O. Colin, A. Benkenida, The 3-zones extended coherent flame model (ECFM3Z) for computing premixed/diffusion combustion, *Oil and Gas Science and Technology*, Vol. 59, pp. 593-609, 2004



Investigation of combustion chamber thermal stratification effect on combustion performance of homogeneous charge compression ignition engine

M. Pourfallah^{1*}, A.A. Ranjbar², S.M. Mirsalim³, S.A. Jazayeri⁴

¹Babol Noushivani University of Technology, Babol, Iran, m.pourfalah@gmail.com

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

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

⁴K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, jazayeri@kntu.ac.ir

*Corresponding Author, Phone Number: +98-911-1252300

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 August 2014

Accepted: 06 December 2014

Keywords:

HCCI engine

Thermal stratification

Range of operation

ABSTRACT

Homogenous charge combustion ignition (HCCI) is an excellent method for higher efficiency and to reduce NO_x and particulate matter simultaneously in comparison to conventional internal combustion engines. However, reaching for higher loads and improving combustion phasing control are important challenges for the HCCI research. In this study, thermal stratification using variable intake charge temperature, the EGR ratio and variable glow plug temperature have been investigated. A combination of experiments on single cylinder engine and the 3D simulation of combustion was used for this work. As a result, increasing intake charge and glow plug temperature advanced combustion timing, shortened ignition delay time and decreased the rate of heat release. Higher combustion efficiency and higher the allowable engine load could be obtained by the increase in the rate of EGR. In general, thermal stratification has the potential to extend high-load limits of HCCI combustion by improving the control over the combustion phase; as well as reducing the maximum rate of pressure rise.

