



بررسی تأثیر افزودن گاز ترکیبی بر احتراق اشتعال تراکمی همگن سوخت ترکیبی

الهه نشاط اسفهلانی^{۱*}، رحیم خوشبختی سرای^۲

^۱ دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، e_neshat@sut.ac.ir

^۲ دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، khoshbakhhti@sut.ac.ir

* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۴۱ - ۳۳۴۵۹۴۷۶

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۳۰ آذر ۱۳۹۴

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۴

کلیدواژه‌ها:

گاز ترکیبی

احتراق HCCI

هیپتان نرمال

ایزواکتان

چکیده

هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر افزودن گاز ترکیبی به سوخت پایه بر احتراق بار همگن اشتعال تراکمی است. ابزارهای لازم برای دستیابی به هدف مذکور الگوی چند منطقه‌ای مناسب و دقیق برای شبیه‌سازی احتراق HCCI و سازوکار سینتیک شیمیایی شبه مفصل با ۱۰۱ گونه و ۵۹۴ واکنش است. در مطالعه حاضر گاز ترکیبی از گازهای هیدروژن و مونوکسیدکربن در نظر گرفته شده و پنج مقدار مختلف از آن به سوخت پایه اضافه شده است. سوخت پایه ترکیبی از سوخت هیپتان نرمال و ایزواکتان است. در این تحقیق از سه ترکیب مختلف به عنوان سوخت پایه استفاده شده است این ترکیب‌ها عبارتند از: PRF20، PRF40 و PRF80. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که افزودن گاز ترکیبی آغاز احتراق را به تأخیر می‌اندازد و سبب کاهش بیشینه فشار و دما در داخل محفظه احتراق می‌گردد. مقدار مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته خروجی با افزایش مقدار گاز ترکیبی افزایش یافته و مقدار اکسیدهای نیتروژن خروجی کاهش می‌یابند.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

موتورهای بار همگن اشتعال تراکمی نسل جدیدی از موتورهای احتراق داخلی هستند که دارای قابلیت تولید توان برابر با توان تولیدی موتورهای دیزل بوده ولی سوخت کمتری را مصرف می‌کند. این موتورها در مقایسه با موتورهای سنتی اکسیدهای نیتروژن کمتری را تولید می‌کنند و قابلیت استفاده از سوخت‌های مختلف و متنوع را دارند.

با این حال این موتورها محدودیت‌هایی دارند که از اهم آنها می‌توان به بازه محدود عملکردی و عدم پایش دقیق احتراق در آنها اشاره نمود. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی برای غلبه به این محدودیت‌ها انجام یافته است. دسته عمده‌ای از این مطالعات به ارائه راهکار برای پایش احتراق این موتورها پرداخته اند [۱].

یکی از مهمترین راهکارها برای پایش احتراق HCCI استفاده از افزودنی هاست. گاز ترکیبی^۱ یکی از افزودنی‌هایی است که برای پایش احتراق HCCI توسط محققان استفاده شده است. گاز ترکیبی مخلوطی از گازهای سبک هیدروژن (H_2)، مونوکسید کربن (CO) و مقدار ناچیزی از گازهای نیتروژن و آب است [۲].

برای اولین بار شادو^۲ و همکاران تأثیر افزودن گاز RG بر احتراق HCCI را بررسی کردند. سوخت مورد استفاده در مطالعه مذکور دی‌متیل اتر بوده و نتایج به دست آمده نشان می‌دادند که استفاده از گاز ترکیبی سبب به تأخیر افتادن احتراق می‌شود [۳، ۴].

در مطالعه‌ای دیگر انگ و همکاران نیز تأثیر افزودن گاز هیدروژن بر احتراق هپتان نرمال و ایزواکتان را بررسی کردند و نشان دادند که افزودن گاز ترکیبی احتراق HCCI هپتان نرمال را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد [۵].

حسینی و همکاران در مطالعه‌ای دیگر به بررسی تأثیر افزودن گاز RG بر احتراق HCCI گاز طبیعی پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌داد که استفاده از گاز ترکیبی بازه عملکردی موتور را افزایش داده و اکسیدهای نیتروژن خروجی را نیز کاهش می‌دهد [۶].

ایده افزودن گاز ترکیبی به سوخت ترکیبی هپتان نرمال و ایزواکتان برای اولین بار توسط حسینی و همکاران ارائه شد [۷، ۸]. آنها نشان دادند که با استفاده از گاز ترکیبی می‌توان بازه عملکردی موتور HCCI را افزایش داد. وشتانی و همکاران نیز با افزودن گاز ترکیبی به گاز طبیعی نشان دادند که مقدار گاز هیدروژن موجود در گاز ترکیبی تأثیر تعیین کننده‌ای بر زمان آغاز احتراق دارد [۹].

هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی تأثیر افزودن گاز ترکیبی به احتراق HCCI سوخت ترکیبی از سوخت‌های هپتان نرمال و ایزواکتان است. برای نیل به این هدف از یک الگوی چند منطقه‌ای که قبلاً صحت آن سنجیده شده است و نیز یک سازوکار سینتیک شیمیایی

مناسب استفاده شده و اثرات گاز ترکیبی بر عملکرد، آلاینده‌ها و شیمی احتراق بررسی شده است.

۲- روش شناسی

۲-۱- الگوی چند منطقه‌ای

در مطالعه حاضر برای شبیه‌سازی چرخه بسته موتور از الگوی چند منطقه‌ای استفاده شده است. در این الگو منطقه احتراق به چند منطقه مختلف تقسیم شده است.

مناطق موجود به چهار نوع کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

- ✓ منطقه هسته: منطقه هسته داخلی‌ترین منطقه موتور است.
- ✓ مناطق میانی: مناطق میانی در اطراف منطقه هسته قرار دارند.
- ✓ منطقه لایه مرزی: منطقه لایه مرزی نیز منطقه چسبیده به دیواره بوده و در حال تبادل حرارت با دیواره است.
- ✓ منطقه درزها: منطقه درزها نیز یک منطقه با حجم و دمای ثابت است.

تمامی مناطق در حال تبادل جرم و حرارت با مناطق مجاور خویش اند.

الگوی چند منطقه‌ای با یک سازوکار سینتیک شیمیایی شبه مفصل به هم پیوسته و شیمی احتراق با استفاده از سازوکار مورد استفاده شبیه‌سازی می‌شود. معادلات مربوط به قانون اول ترمودینامیک و سینتیک شیمیایی برای هر یک از مناطق به صورت جداگانه حل می‌گردد. معادله‌های (۱) تا (۸) معادلات مورد نظر را نشان می‌دهد.

$$\frac{dU_i}{dt} = -\frac{dW_i}{dt} + \frac{dQ_i}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dU_i}{dt} = c_v^i m_i \frac{dT_i}{dt} + m_i \sum_{j=1}^{n_s} u_j \frac{dY_j}{dt} + \sum_{j=1}^{n_s} u_j Y_j \frac{dm_i}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dW_i}{dt} = P \frac{dV_i}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{dQ_{i,cond}}{dt} + \frac{dQ_{i,conv}}{dt} + \frac{dQ_{i,mtran}}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dQ_{i,cond}}{dt} = -kA_i \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{dQ_{BL,conv}}{dt} = h(T_{wall} - T_{BL}) A_{wall} \quad (6)$$

$$\frac{dQ_{i,mtran}}{dt} = \frac{dm_{in,i}}{dt} H_{in} - \frac{dm_{out,i}}{dt} H_{out} \quad (7)$$

$$\frac{dY_{k,i}}{dt} = \frac{\dot{\omega}_{k,i} M W_k}{\rho_i} \quad (8)$$

¹ Reformer Gas

² Shudo

در هنگام افزودن گاز RG و جایگزین شدن سوخت توسط آن، تلاش می‌شود که مقدار انرژی شیمیایی کل ترکیب ورودی به محفظه احتراق ثابت بماند. بنابراین مقدار RG ورودی با استفاده از معادله (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$RG = \frac{\dot{m}_{RG} LHV_{RG}}{\dot{m}_{RG} LHV_{RG} + \dot{m}_{PRF} LHV_{PRF}} \times 100 \quad (12)$$

در هر نمونه، سوخت پایه توسط پنج مقدار مختلف جایگزین و تأثیر مقادیر مختلف گاز ترکیبی بر احتراق، بررسی شده است. مقادیر گاز ترکیبی به گونه‌ای انتخاب شده است که سهم این گاز از کل انرژی ورودی به داخل مخزن ۰ تا ۳۰ درصد باشد.

۳- داده‌های تجربی

برای صحت سنجی الگوی چند منطقه‌ای وصل شده با سازوکار سینتیک شیمیایی مورد نظر، از داده‌های تجربی که با استفاده از موتور CFR در آزمایشگاه موتور دانشگاه آلبرتای کانادا به دست آمده است، استفاده می‌شود. ویژگی‌های این موتور در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های موتور مورد استفاده در آزمایش‌ها

موتور	Waukesha
حجم جابجایی (cm ³)	۶۱۲
قطر استوانه (cm)	۸٫۲۵
طول پیمایش سمبه (cm)	۱۱٫۴
طول شاتون (cm)	۲۴
IVO (aTDC)	۱۰
IVC (aTDC)	۲۱۴
EVO (aTDC)	۵۰۰
EVC (aTDC)	۱۵

۴- بحث بر روی نتایج

همانگونه که قبلاً نیز ذکر شد سوخت پایه در مطالعه حاضر دارای سه ترکیب PRF20، PRF40 و PRF80 است. سه نمونه مختلف با شرایط عملکردی متفاوت و با بهره‌گیری از سوخت‌های مورد اشاره انتخاب شده و مقدار ۰ تا ۳۰ درصد گاز ترکیبی به آنها اضافه شده است.

جدول ۲ ویژگی‌های نمونه‌های انتخاب شده را نشان می‌دهد.

پس از حل معادلات فوق، فشار داخلی محفظه احتراق با استفاده از معادله (۹) محاسبه می‌گردد. همانطور که معادله مذکور نشان می‌دهد برای محاسبه فشار کل از دما، حجم و ترکیب داخل محفظه استفاده شده است.

$$P = \frac{R_u \sum_{i=1}^{n_z} \frac{m_i}{MW_i}}{\sum_{i=1}^{n_z} \frac{V_i}{T_i}} \quad (9)$$

جزئیات بیشتر الگو و معادلات مورد استفاده در روش‌های انتقال جرم و انتقال حرارت در مطالعات چاپ شده قبلی قابل دسترس است [۱۰، ۱۱].

الگوی مورد استفاده برای شبیه‌سازی مرحله تبادل گاز یک الگوی تک منطقه‌ای است که در آن علاوه بر حل معادلات انرژی و سینتیک شیمیایی، معادلات ورود و خروج جرم نیز برای هر گام زمانی حل می‌شوند. معادله‌های (۱۰) و (۱۱) معادلات مورد نظر را نشان می‌دهند.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{C_D A_R P_u}{\sqrt{R_u T_u}} \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

$$if \left(\frac{P_d}{P_u} \right) > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \quad (10)$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{C_D A_R P_u}{\sqrt{R_u T_u}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

$$if \left(\frac{P_d}{P_u} \right) \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \quad (11)$$

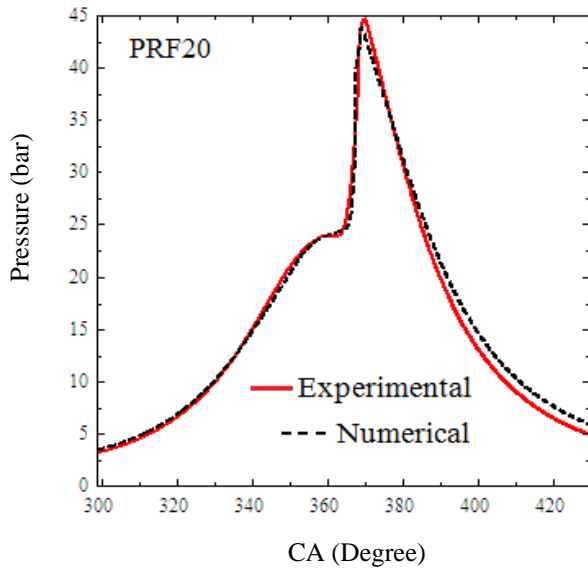
۲-۲- سوخت

سوخت مورد استفاده در مطالعه حاضر سوخت ترکیبی از هپتان نرمال و ایزواکتان است. این سوخت ترکیبی در مطالعات پیشین مورد توجه قرار گرفته است و عمدتاً با عنوان PRF^۱ از آن یاد می‌شود. در مطالعه حاضر PRFXX سوختی است که در آن مقدار XX مول ایزواکتان با ۱۰۰-XX مول هپتان نرمال ترکیب شده است.

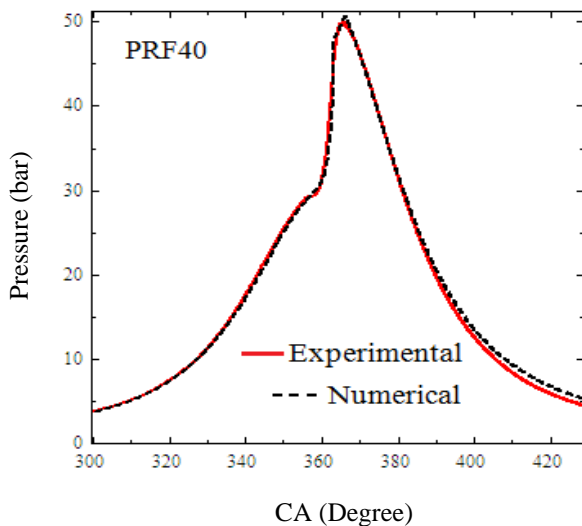
در مطالعه حاضر از سه ترکیب مختلف PRF20، PRF40 و PRF80 به عنوان سوخت پایه استفاده شده است. سازوکار سینتیک مورد استفاده یک سازوکار شبه توسعه یافته با ۱۰۱ گونه و ۵۰۴ واکنش است [۱۲].

گاز RG در مطالعه حاضر ترکیبی از گازهای هیدروژن و مونوکسیدکربن در نظر گرفته شده است که به نسبت‌های مولی یکسان باهم ترکیب شده اند.

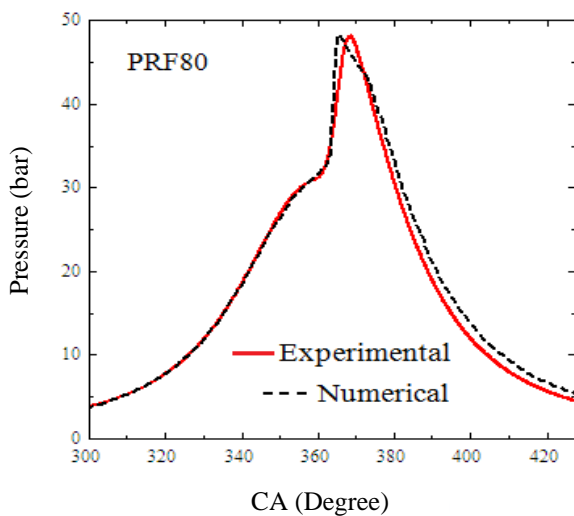
¹ Primary Reference Fuel



شکل ۱: منحنی‌های فشار تجربی و عددی برای نمونه ۱



شکل ۲: منحنی‌های فشار تجربی و عددی برای نمونه ۲



شکل ۳: منحنی‌های فشار تجربی و عددی برای نمونه ۳

جدول ۲: ویژگی‌های نمونه‌های مورد استفاده

سوخت	Rc	λ	EGR%	RG%	rpm
PRF20	۱۲,۳	۱,۶۹	۱۷,۶۳	۲۰	۷۰۰
PRF40	۱۴,۷	۱,۸۹	۳۰,۵۵	۱۰	۷۰۰
PRF80	۱۵,۴	۲,۴۹	۰	۳۰	۷۰۰

شکل‌های ۱ تا ۳ منحنی‌های فشار عددی نمونه‌های ذکر شده را در مقایسه با داده‌های تجربی نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل‌های ۳-۱ بر می‌آید. نتایج حاصل از کار عددی دارای همخوانی مطلوبی با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده دارد.

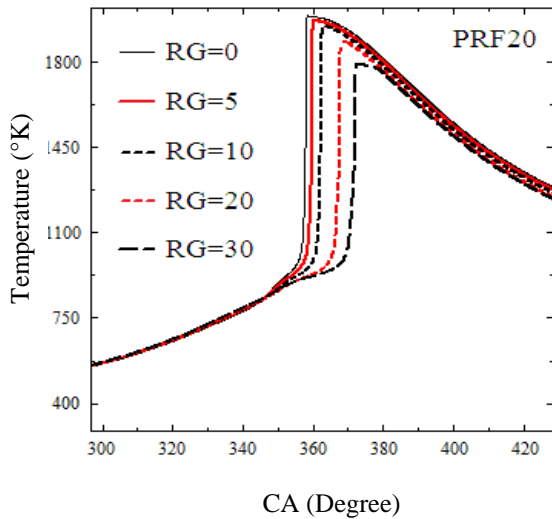
جدول ۳ آلاینده‌های محاسبه شده از روش عددی را با داده‌های تجربی مقایسه می‌کند. داده‌های این جدول نیز نشان دهنده دقت قابل قبول الگو در پیش‌بینی آلاینده‌های خروجی از موتور است. داده‌های این جدول نشان می‌دهد که بیشینه خطای الگو در پیش‌بینی آلاینده CO ۱۰٪ و در پیش‌بینی آلاینده UHC ۲۰٪ است.

جدول ۳: آلاینده‌های خروجی از موتور

آلاینده	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
CO % تجربی	۰,۱۸	۰,۱۹	۰,۱۹
CO % عددی	۰,۱۷	۰,۲۱	۰,۲۱
CO ₂ % تجربی	۶,۲۳	۵,۸۹	۴,۳۶
CO ₂ % عددی	۶,۵۹	۵,۷۶	۴,۵۱
UHC (ppm) تجربی	۳۳۶۵	۳۵۳۳	۳۷۹۲
UHC (ppm) عددی	۳۲۰۰	۲۸۶۷	۳۶۲۱

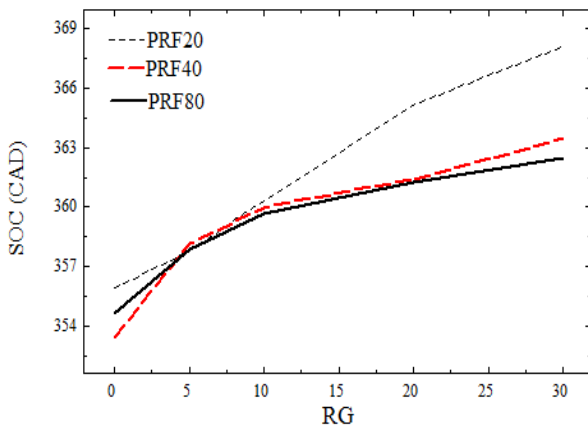
پس از حصول اطمینان از قابلیت الگو در پیش‌بینی رفتار موتور مورد نظر، گاز RG با مقادیر مختلف به سوخت اضافه می‌شود. شکل‌های ۴ تا ۶ منحنی‌های فشار به دست آمده برای نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

همانگونه که در این شکل‌ها مشخص است افزودن گاز ترکیبی سبب به تأخیر انداختن آغاز احتراق شده و همین امر سبب شده است تا بخش مهمی از احتراق پس از نقطه مکث بالا به وقوع بپیوندد و بیشینه دما کاهش یافته و به تبع آن بیشینه فشار نیز کاهش یابد. شکل ۷ دمای منطقه هسته را به ازای مقادیر مختلف گاز ترکیبی برای نمونه شماره ۱ نشان می‌دهد.



شکل ۷: منحنی‌های دما برای مقادیر مختلف گاز ترکیبی - نمونه ۱

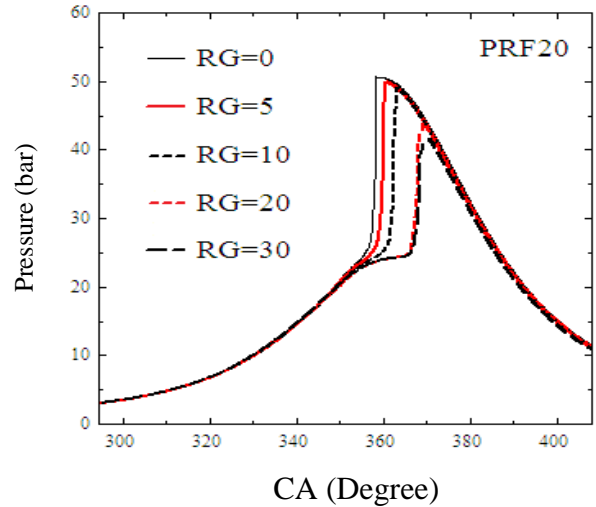
شکل ۸ زمان آغاز احتراق را برای هر سه نمونه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این مطالعه نقطه آغاز احتراق به زمانی اطلاق می‌شود که ۱۰٪ از کل حرارت آزاد شده در حین فرایند احتراق، آزاد شده باشد. شکل ۸ نشان می‌دهد همانگونه که پیش‌بینی شده بود افزودن گاز ترکیبی آغاز احتراق را به تأخیر می‌اندازد. دلیل این امر این است که گازهای هیدروژن و مونوکسید کربن هر دو دارای عدد اکتانی بزرگتری نسبت به هپتان نرمال هستند. بنابراین جایگزینی آنها سبب می‌شود تا مقدار انرژی آزاد شده در حین فرایندهای احتراقی دما خنک، کاهش یافته و بنابراین دمای محفظه احتراق نیز افزایش کمتری یافته و کل احتراق به درجات بزرگتر منتقل شود.



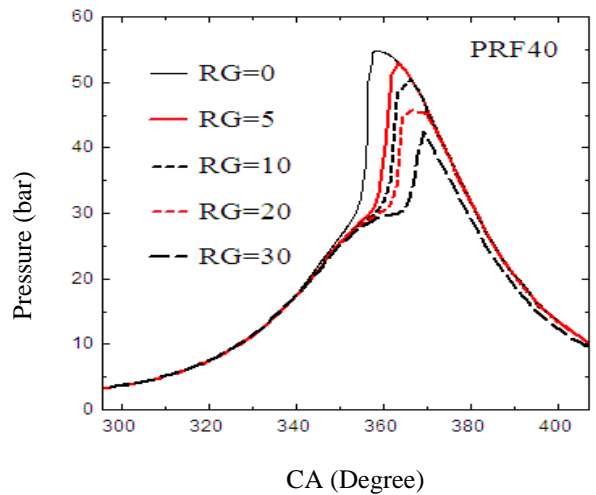
شکل ۸: زمان آغاز احتراق برای نمونه‌های مختلف

شکل ۹ مقدار بیشینه حرارت آزاد شده در حین احتراق دما خنک را نشان می‌دهد. همانگونه که شرح داده شد مقدار بیشینه نرخ حرارت آزاد شده با افزایش گاز ترکیبی کاهش یافته است. دلیل این کاهش جایگزین کردن هپتان نرمال توسط گاز ترکیبی است که فاقد واکنش‌های دما خنک است.

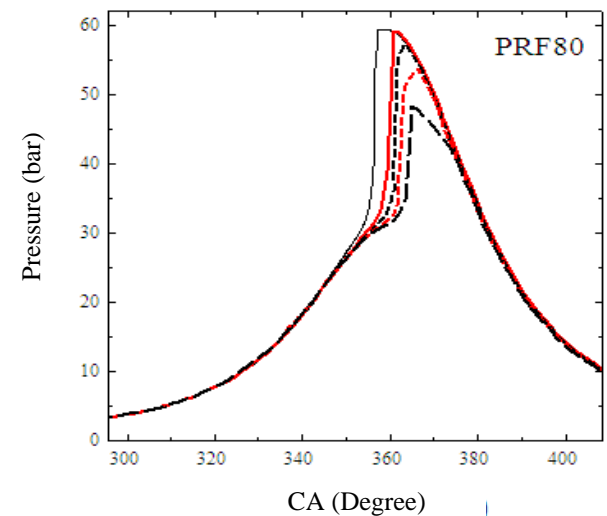
کاهش بیشینه دما با افزایش گاز ترکیبی در این شکل کاملاً مشهود است. روند مشابهی برای دمای سایر مناطق و نیز نمونه‌ها وجود دارد.



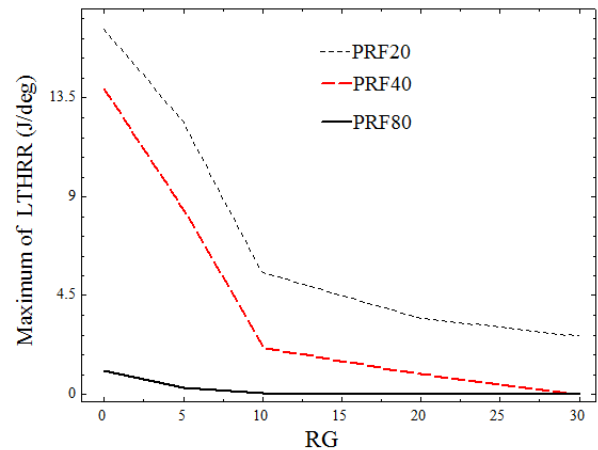
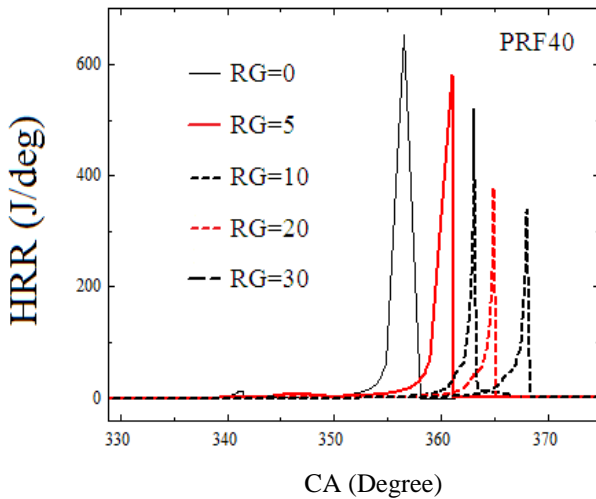
شکل ۴: منحنی‌های فشار برای مقادیر مختلف گاز ترکیبی - نمونه ۱



شکل ۵: منحنی‌های فشار برای مقادیر مختلف گاز ترکیبی - نمونه ۲

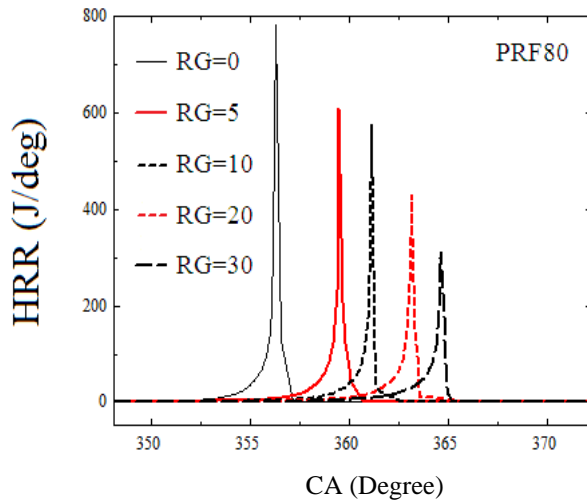


شکل ۶: منحنی‌های فشار برای مقادیر مختلف گاز ترکیبی - نمونه ۳

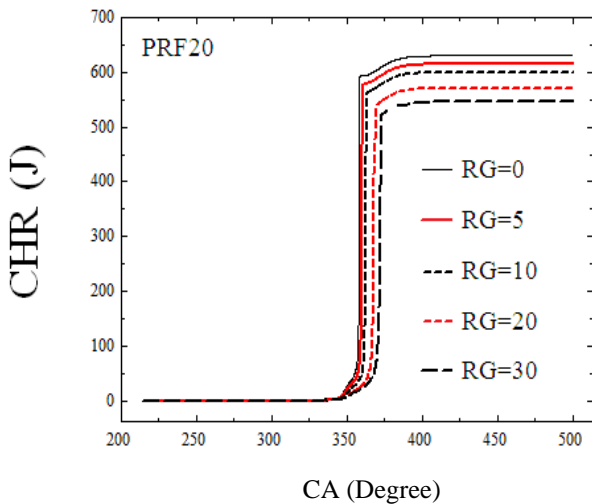


شکل ۹: بیشینه نرخ آزاد سازی حرارت طی واکنش‌های دما خنک

شکل ۱۱: نرخ آزاد سازی انرژی برای نمونه شماره ۲



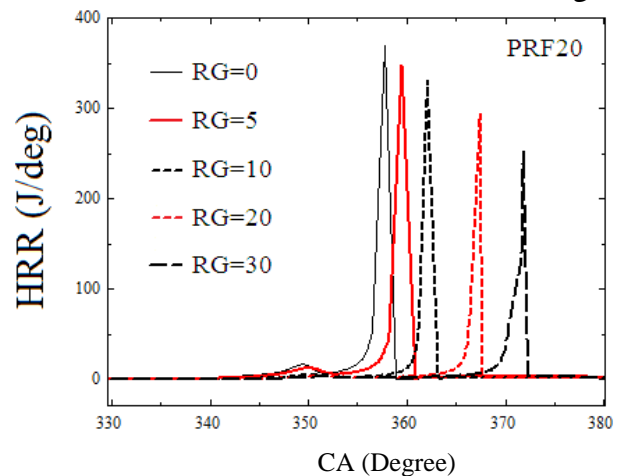
شکل ۱۲: نرخ آزاد سازی انرژی برای نمونه شماره ۳



شکل ۱۳: انرژی آزاد شده تجمعی برای نمونه شماره ۱

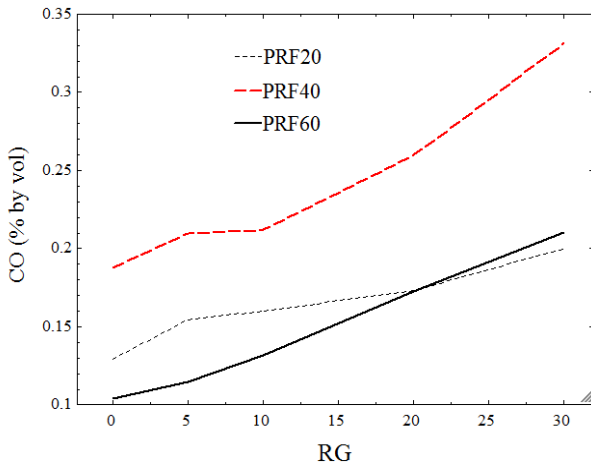
شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نرخ حرارت آزاد شده را برای تمامی واکنش‌ها و برای تمامی نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. این شکل بیانگر این واقعیت است که با افزایش گاز ترکیبی مقدار بیشینه منحنی HRR کاهش یافته و زمان وقوع آن نیز به تأخیر افتاده است. به تأخیر افتادن زمان آن با توجه به تأخیر افتادن آغاز احتراق امری قابل قبول است. اما کاهش بیشینه آن ممکن است به دو دلیل صورت پذیرد که اولی به دلیل توزیع بازه انجام احتراق است که سبب افت بیشینه نرخ آزادسازی انرژی می‌شود و می‌تواند در شرایطی پدیده‌ای مطلوب تلقی شود. اما دلیل دیگری که می‌تواند سبب کاهش بیشینه نرخ آزادسازی انرژی شود اینست که احتراق به طور کامل صورت نگیرد.

این پدیده، پدیده‌ای نامناسب است و امکان دارد سبب افت بازده و افزایش آلاینده‌های UHC و CO خروجی از موتور گردد. برای بررسی علل کاهش بیشینه نرخ آزاد سازی انرژی منحنی‌های مربوط به حرارت آزاد شده تجمعی نیز رسم شده و در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نشان داده شده‌اند.

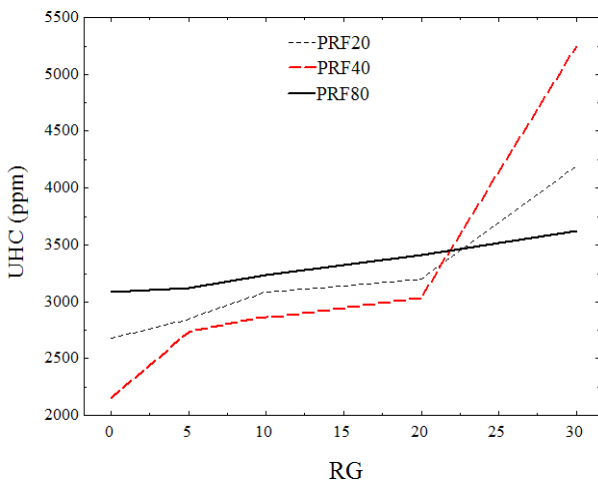


شکل ۱۴: نرخ آزاد سازی انرژی برای نمونه شماره ۱

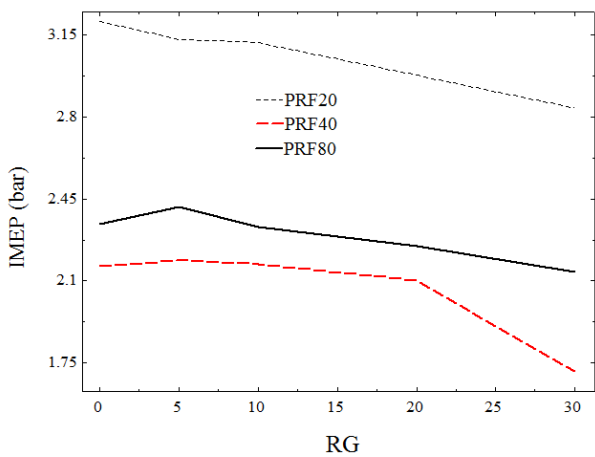
دو نمونه دیگر، مقدار بیشینه فشار متوسط مؤثر زمانی است که ۵٪ از سوخت اصلی توسط گاز ترکیبی جایگزین شده باشد. این مطلب نشانگر این است که افزودن مقادیر مختلفی از گاز ترکیبی نه تنها سبب پایش احتراق می‌شود بلکه افزودن مقادیر خاصی از آن می‌تواند سبب بهبود بازده قانون اول ترمودینامیک موتور شود.



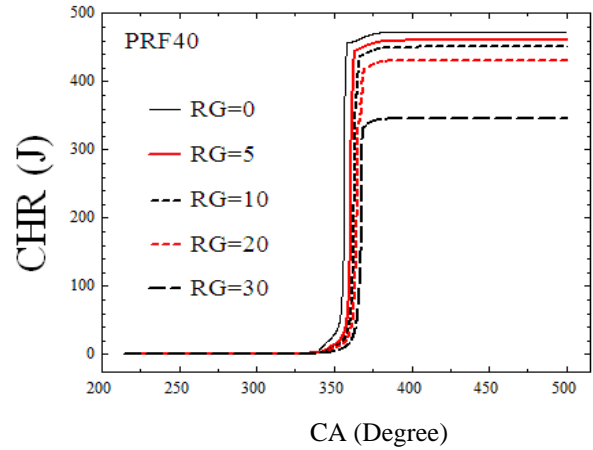
شکل ۱۶: تغییرات مقدار CO خروجی از موتور



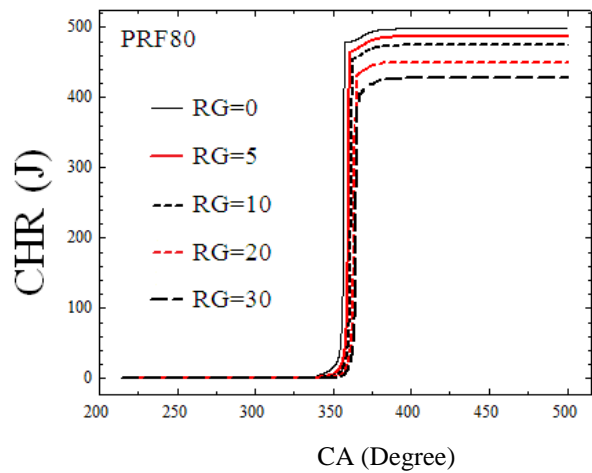
شکل ۱۷: تغییرات مقدار UHC خروجی از موتور



شکل ۱۸: تغییرات مقدار IMEP با افزایش گاز ترکیبی



شکل ۱۴: انرژی آزاد شده تجمعی برای نمونه شماره ۲



شکل ۱۵: انرژی آزاد شده تجمعی برای نمونه شماره ۳

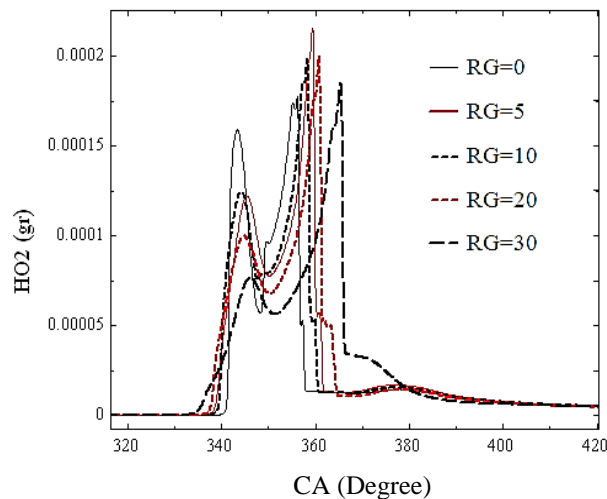
شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نشان می‌دهند که کل حرارت آزاد شده طی فرایند احتراق کاهش یافته است. این در حالی است که انرژی شیمیایی ترکیب ورودی به داخل محفظه احتراق همواره ثابت بوده است. بنابراین مشخص می‌شود که با افزایش مقدار گاز ترکیبی، مقداری از سوخت فرایند احتراق کامل خود را طی نمی‌کند. این مطلب به دلیل تأخیر در آغاز اشتعال و کاهش دمای محفظه احتراق است. با توجه به عدم احتراق همه سوخت پیش‌بینی می‌شود که افزودن گاز ترکیبی آلاینده‌های CO و UHC را افزایش دهد. البته افزایش CO علاوه بر وجود احتراق ناقص می‌تواند به دلیل وجود آن در گاز ترکیبی نیز باشد. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ تغییرات مقدار آلاینده‌های خروجی از موتور را به ازای تغییرات مقدار گاز ترکیبی نشان می‌دهد.

شکل ۱۸ تغییرات فشار متوسط مؤثر را بر حسب افزایش گاز RG برای نمونه‌های مورد نظر نشان می‌دهد. این تصویر نشان می‌دهد که مقدار فشار متوسط مؤثر بیشینه، برای نمونه شماره ۱ هنگامی است که مقدار گاز ترکیبی افزوده شده برابر با صفر است، در حالی که برای

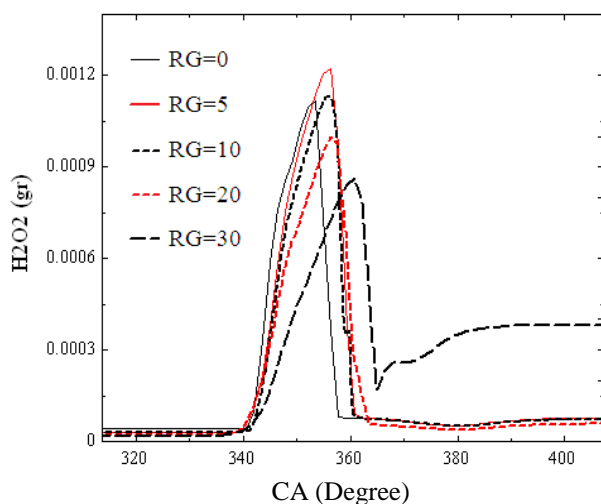
ملکول‌های فعال پراکسید هیدروژن و سوپراکسید هیدروژن را نشان می‌دهند.

ملکول‌های فعال HO_2 در هر دو حالت دما گرم و دما خنک تولید می‌شوند. در شکل ۲۰ اولین بیشینه منحنی به سبب تولید سوپراکسید هیدروژن در حین فرایندهای دما خنک است. وقتی غلظت این ملکول‌های فعال به اندازه کافی شدید می‌شود در اثر واکنش با هیدروکربن‌ها به پراکسید هیدروژن تبدیل می‌شوند.

بنابراین غلظت این ملکول‌های فعال در داخل محفظه احتراق کاهش می‌یابد. با شروع واکنش‌های دما گرم، سوپراکسید هیدروژن از واکنش اکسیژن با ملکول فعال هیدروکربن تولید می‌شود و یک نقطه بیشینه دوم در منحنی به وجود می‌آید و در نهایت با افزایش دما و ایجاد شرایط مناسب این ذرات به ملکول‌های فعال OH و در نهایت به آب تبدیل شده و غلظت آنها تقریباً به صفر می‌رسد.



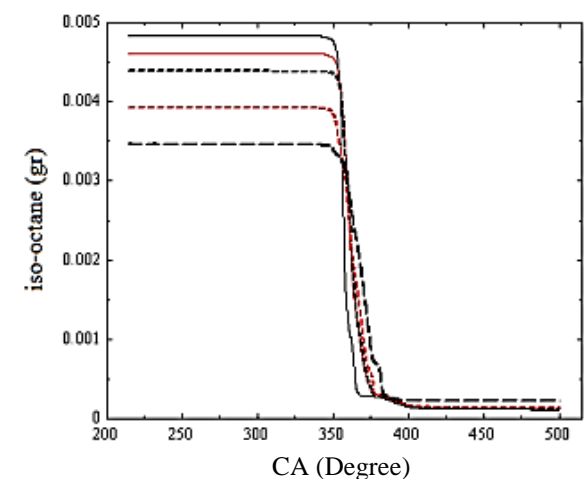
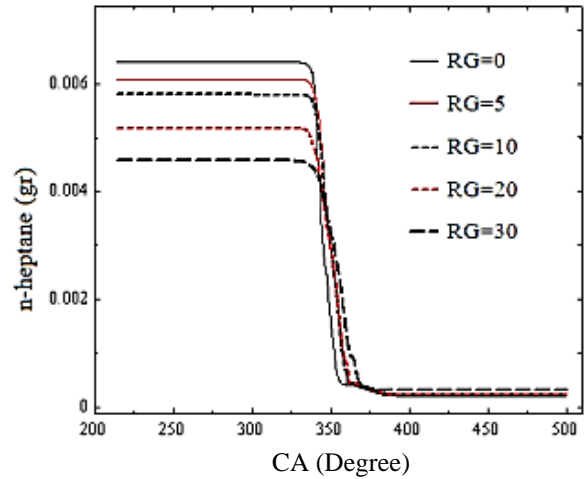
شکل ۲۰: تغییرات جرم HO_2



شکل ۲۱: تغییرات جرم H_2O_2

شکل ۲۱ نشان می‌دهد که ملکول‌های فعال پراکسید هیدروژن با آغاز واکنش‌های دما خنک تولید شده اند و نقطه بیشینه آنها اندکی پیش

تغییراتی که در عملکرد و آلاینده‌های موتور در اثر افزودن گاز ترکیبی ایجاد می‌شوند به سبب تأثیرات شیمیایی این گاز بر فرایند احتراق سوخت پایه است. شکل ۱۹ تأثیر افزودن این گاز را بر احتراق سوخت PRF40 نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: تغییرات هپتان نرمال و ایزواکتان با افزایش گاز ترکیبی

شکل ۱۹ نشان می‌دهد که افزودن گاز ترکیبی بر زمان آغاز احتراق بی‌تأثیر است اما مدت زمان مصرف آن را توسعه می‌دهد زیرا وجود مقدار اندکی گاز هیدروژن در داخل محفظه احتراق سبب می‌شود واکنش هیدروژن زدایی از سوخت در جهت برگشت نیز فعال شود و بنابراین مقدار اندکی از ملکول‌های فعال^۱ سوخت دوباره به خود سوخت تبدیل شوند و در نتیجه بازه مصرف سوخت وسیع شود.

واکنش‌های دما خنک تاجایی ادامه می‌یابند که CO ، HO_2 و H_2O_2 تولید شوند. تولید CO در حین فرایندهای دما گرم نیز ادامه می‌یابد و در نهایت با تبدیل CO به CO_2 خاتمه می‌یابد. ملکول‌های فعال HO_2 و H_2O_2 در حین فرایندهای دما گرم به OH تبدیل شده و OH نیز به H_2O تبدیل می‌شود. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ روند تولید

¹ Radicals

۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، تأثیر افزودن گاز ترکیبی بر احتراق HCCI سوخت‌های ترکیبی از هپتان نرمال و ایزواکتان با استفاده از الگوی چند منطقه‌ای و سازوکار سینتیک شیمیایی شبه مفصل بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزودن گاز ترکیبی سبب به تأخیر افتادن آغاز احتراق شده و مقدار بیشینه فشار و دمای داخل محفظه احتراق را کاهش می‌دهد.

کاهش دمای محفظه احتراق سبب افزایش آلاینده‌هایی چون گاز مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته در خروجی موتور می‌گردد. برای نمونه‌های مورد مطالعه افزایش مقدار اندکی از گاز ترکیبی (در حدود ۵٪) سبب افزایش فشار متوسط مؤثر شده و بنابراین بازده حرارتی موتور را افزایش می‌دهد. افزودن گاز ترکیبی در برخی موارد سبب بروز احتراق ناقص شده و بنابراین بازده احتراقی را کاهش می‌دهد.

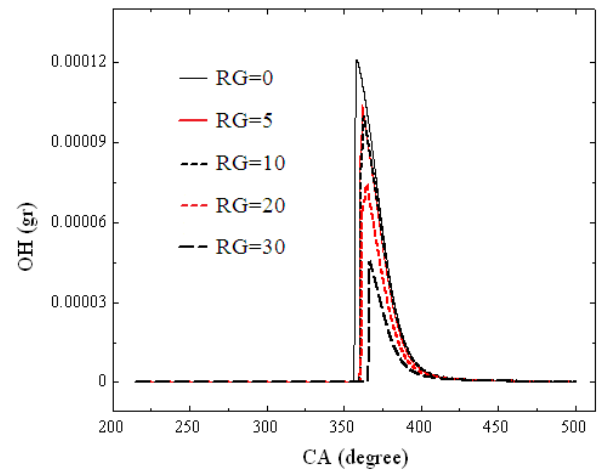
فهرست علائم

A	مساحت، m^2
C_v	گرمای ویژه در فشار ثابت، $J/kg^\circ K$
C_D	ضریب تخلیه
D	قطر سمبه، m
h	آنتالپی، J/kg
k	ضریب هدایت حرارتی $J/ms^\circ K$
l	طول هر استوانه، m
LHV	مقدار حرارت آزاد شده
m	جرم، kg
MW	جرم مولکولی هر گونه
n_z	تعداد مناطق
P	فشار داخل استوانه، Pa
Q	حرارت، J
RG	درصد گاز ترکیبی
R_u	ثابت جهانی گازها، $J/mol^\circ K$
T	دما، K
t	زمان، s
$thick$	ضخامت، m
U	انرژی داخلی، J

از پایان واکنش‌های دما گرم است. در انتهای فرایندهای دما گرم این ملکول‌های فعال به ملکول‌های فعال OH و ذرات آب تبدیل می‌شوند.

شکل ۲۲ روند تغییرات غلظت ملکول‌های فعال OH را در داخل محفظه احتراق نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است.

مقدار کلی ملکول‌های فعال OH با افزایش مقدار گاز ترکیبی کاهش می‌یابد. زیرا برای ثابت نگه داشتن مقدار انرژی ورودی به داخل محفظه احتراق، باید هر گرم از سوخت، توسط تقریباً ۱٫۵ گرم از گاز ترکیبی جایگزین شود. هر گرم از سوخت PRF40 حاوی ۰٫۱۶ اتم هیدروژن است. در حالی که ۱٫۵ گرم از گاز ترکیبی دارای ۰٫۱ اتم هیدروژن است. بنابراین با افزایش مقدار گاز ترکیبی، مقدار کلی هیدروژن کاهش یافته و در نتیجه مقدار OH داخل محفظه احتراق کم می‌شود.



شکل ۲۲: تغییرات جرم OH

بررسی‌های انجام یافته نشان می‌دهد که افزودن گاز ترکیبی اثرات شیمیایی مهمی بر روی احتراق HCCI سوخت ترکیبی از سوخت‌های هپتان نرمال و ایزواکتان دارد.

این سوخت با داشتن عدد اکتانی بزرگ و نداشتن احتراق دما خنک آغاز احتراق را به تأخیر می‌اندازد. به تأخیر افتادن آغاز احتراق، سبب آزاد شدن بخش قابل توجهی از انرژی در حین فرایند انبساط شده و باعث می‌شود که بیشینه منحنی‌های فشار و دما کاهش یابد.

به تأخیر افتادن فرایند احتراق، در برخی موارد سبب افزایش فشار محفظه احتراق، در حین فرایند احتراق شده و سبب افزایش فشار متوسط مؤثر می‌گردد.

اگر تأخیر در آغاز احتراق بیش از حد باشد مقدار بیشینه فشار افت خیلی محسوسی داشته و سبب بروز احتراق ناقص شده و فشار متوسط مؤثر نیز کاهش می‌یابد.

dimethyl ether, in SAE Paper 2002-01-2828, 2002

[5] J. A. Eng, W. R. Leppard and T. M. Sloane, The effect of POx on the autoignition chemistry of n-heptane and isoctane in an HCCI engine, in SAE Paper 2002-01-2861, 2002

[6] V. Hosseini and M.D. Checkel, Using reformer gas to enhance HCCI combustion of CNG in a CFR engine, in SAE Paper 2006-01-3247, 2006

[7] V. Hosseini and M. D. Checkel, Effect of reformer gas on HCCI combustion - Part I: High Octane Fuels, in SAE Paper 2007-01-0208, 2007

[8] V. Hosseini and M. D. Checkel, Effect of reformer gas on HCCI combustion - Part II: Low Octane Fuels, in SAE Paper 2007-01-0206, 2007

[9] S. Voshtani, *et al.*, Investigating various effects of reformer gas enrichment on a natural gas-fueled HCCI combustion engine. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, pp: 19799-19809, 2014

[10] E. Neshat and R. K. Saray, Development of a new multi zone model for prediction of HCCI (homogenous charge compression ignition) engine combustion, performance and emission characteristics. Energy, Vol. 73, pp: 325-339, 2014

[11] E. Neshat and R. K. Saray, Effect of different heat transfer models on HCCI engine simulation. Energy Conversion and Management, Vol. 88, pp: 1-14, 2014

[12] E. Neshat and R. K. Saray, An optimized chemical kinetic mechanism for HCCI combustion of PRFs using multi-zone model and genetic algorithm. Energy Conversion and Management, Vol. 92, pp: 172-183, 2015

u انرژی داخلی واحد جرم، J/kg

V حجم، m^3

W کار، J

x فاصله خطی، m

Y نسبت جرمی هر گونه

علائم یونانی

γ ضریب اتمی گاز

ρ چگالی

θ زاویه میل لنگ

مراجع و منابع

[1] F. Zhao, *et al.*, Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines, USA: SAE, 2003

[2] H. J. Curran, *et al.*, A comprehensive modeling study of n-heptane. Combustion and Flame, Vol. 114, pp: 149-177, 1998

[3] T. Shudo and Y. Ono, HCCI combustion of hydrogen, carbon monoxide and dimethyl ether, in SAE Paper 2002-01-0112, 2002

[4] T. Shudo, Y. Ono and T. Takahashi, Influence of hydrogen and carbon monoxide on HCCI combustion of



Investigation on the effect of reformer gas addition on HCCI combustion of blended fuel

E. Neshat Esfahlani^{1*}, R. Khoshbakhti Saray²

¹Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, e_neshat@sut.ac.ir

²Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, khoshbakhti@sut.ac.ir

*Corresponding Author, Telephone Number: +98-4133459476

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 December 2015

Accepted: 17 February 2016

Keywords:

HCCI engine

Primary reference fuels

Reformer gas

Multi-zone model

ABSTRACT

Main purpose of this paper is investigating on the effect of reformer gas on the HCCI combustion of blended fuels. A validated multi zone model coupled with a semi detailed chemical kinetics mechanism. Chemical kinetics mechanism contains 101 species and 594 reactions. Reformer gas is considered as a mixture of carbon monoxide and hydrogen and five different values of it are added to base fuel. Base fuel in this study is a mixture of n-heptane and iso-octane and three different compositions containing PRF20, PRF40 and PRF80 are focused. Results show that reformer gas addition retards the start of combustion, and reduces in-cylinder peak pressure and temperature. Reformer gas addition affects combustion duration and exhaust emissions. Exhaust carbon monoxide and unburned hydrocarbons increase and nitrogen oxides decreases by increase of reformer gas concentration.



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