



## بررسی جامع تأثیر گونه‌های اصلی تشکیل دهنده EGR بر احتراق همگن هپتان نرمال

سالار زینالی<sup>۱\*</sup>، الهه نشاط<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران. [Z.salar1374@gmail.com](mailto:Z.salar1374@gmail.com)

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران. [e\\_neshat@sut.ac.ir](mailto:e_neshat@sut.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۹ آذر ۱۳۹۹

پذیرش: ۰۵ بهمن ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

احتراق HCCI

هپتان نرمال

EGR

گونه‌های بی‌اثر مصنوعی

### چکیده

هدف از مطالعه حاضر بررسی جامع و کامل اثرات مختلف EGR بر احتراق همگن فقیرسوز سوخت هپتان نرمال است. برای نیل به هدف از یک الگوی چندمنطقه‌ای متصل به یک سازوکار واکنش شیمیایی شبه توسعه یافته استفاده شده است. برای تخمین شرایط ترکیب داخل محفظه احتراق، یک الگوی تک منطقه‌ای برای شبیه‌سازی فرایند تبادل گاز به الگوی چندمنطقه‌ای متصل شده است. به سبب فقیر بودن مخلوط سوخت و هوا، نیتروژن، اکسیژن، کربن دی‌اکسید و آب به عنوان اجزای اصلی تشکیل دهنده EGR در نظر گرفته شده و اثرات گرمایی، رقیق‌سازی و شیمیایی هر یک از آنها با استفاده از روش گازهای مصنوعی بی‌اثر مطالعه شده است. موتور HCCI به عنوان محفظه احتراق همگن فقیرسوز در نظر گرفته شد. همچنین از هپتان به عنوان سوخت موتور استفاده شده است. در ابتدا صحت الگوی مورد استفاده با داده‌های تجربی برای دو حالت عملکردی ارزیابی و سپس درصد‌های مختلف EGR به الگو افزوده شد. در بررسی فرایند احتراق اثرات گرمایی، رقیق‌سازی و شیمیایی هر یک از گونه‌های تشکیل دهنده EGR مطالعه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در مخلوط‌های فقیرسوز با سوخت دارای عدد اکتانی کوچکتر، اثر رقیق‌سازی EGR بر رو اثر گرمایی و شیمیایی آن غالب است. برای یک مخلوط بسیار فقیر نیتروژن و برای یک مخلوط تقریباً فقیر آب دارای بیشترین اثر گرمایی است. اثر رقیق‌سازی اکسیژن به دلیل قابلیت شرکت در واکنش‌های شیمیایی با سایر گونه‌ها متفاوت است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

در نتایج مطالعه مورد نظر این بود که افزایش EGR بازده گرمایی موتور را افزایش داده و سبب بهبود اقتصاد مصرف سوخت شده بود [۱۳].

جانگ و همکاران نشان دادند که افزودن EGR، IMEP موتور را افزایش داده و سبب بهینه کردن زمان آغاز و پایان احتراق می‌شود [۱۴].

علاوه بر مطالعات کلی که معمولاً نشانگر تأثیر مثبت EGR بر کاهش آلایندگی NOx، بهبود زمان احتراق و بهبود بازده موتورهای HCCI هستند، مطالعات اندکی نیز وجود دارند که با دقت بیشتری بر روی تأثیر EGR بر احتراق HCCI پرداخته اند. به عنوان نمونه نیشی و همکاران به بررسی تأثیر افزودن EGR بر واکنش‌های مهم انجام یافته در حین فرایند احتراق در موتورهای HCCI پرداخته و نشان دادند که افزودن EGR سبب کاهش نرخ پیشروی واکنش‌های خنک در احتراق دی متیل اتر می‌شود [۱۵].

پوتراساری و همکاران نشان دادند که افزودن EGR سبب کاهش واکنش پذیری  $H_2O_2$  تولید شده در حین واکنش‌های خنک شده و بنابراین غلظت OH را کاهش داده و دمای واکنش‌های خنک را نیز کاهش می‌دهد و به دلیل کاهش دما، NOx کمتری تولید می‌شود [۴]. اگر چه مطالعات توسعه‌ای متعددی در زمینه تأثیر EGR بر احتراق HCCI وجود دارد اما اثرات ریزفرایندی این افزایش بر احتراق، اثرات مختلف آن اعم از اثر گرمایی، اثر رقیق‌سازی، اثر شیمیایی و اثرات جداگانه هر یک از اجزای آن تاکنون مطالعه نشده است.

هدف اصلی مطالعه حاضر، انجام مطالعه جامع در زمینه بررسی تأثیر اهر یک از گونه‌های اصلی تشکیل دهنده EGR بر عملکرد و آلایندگی موتور HCCI است. برای دستیابی به این هدف از یک الگوی چندمنطقه‌ای که قبلاً صحت آن سنجیده شده است و نیز یک سازوکار واکنش شیمیایی مناسب استفاده شده است. اثرات مختلف EGR و نیز اثرات گونه‌های مختلف آن نیز بررسی می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- الگوی چندمنطقه‌ای

در این پژوهش برای شبیه‌سازی چرخه بسته موتور از یک الگوی چندمنطقه‌ای استفاده شده است. در این الگو محفظه احتراق به چند منطقه مختلف تقسیم شده است. مناطق موجود به چهار نوع کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: منطقه هسته، منطقه میانی، منطقه لایه مرزی و منطقه درزها. منطقه هسته داخلی ترین منطقه موتور بوده و مناطق میانی در اطراف آن قرار دارند.

منطقه لایه مرزی نیز منطقه چسبیده به دیوار بوده و در حال تبادل گرما با دیوار است. منطقه درزها نیز یک منطقه با حجم و دمای ثابت است.

امروزه استفاده از فناوری بازخورانی گازهای حاصل از احتراق<sup>۱</sup> در موتورهای احتراق داخلی در راستای کاهش آلایندگی‌های تولیدی امری ضروری است. اگرچه در موتورهای قدیمی، EGR تنها با هدف مهار آلایندگی‌های موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از آن در موتورهای خنک<sup>۲</sup> نه تنها برای مهار آلایندگی مفید بوده بلکه سبب توسعه بازه عملکردی، مهار زمانی احتراق و افزایش بازده گرمایی نیز می‌شوند.

EGR متشکل از گازهای حاصل از احتراق بوده و در موتورهای خنک به سبب فقیر بودن مخلوط سوخت و هوا، نیتروژن، اکسیژن، کربن دی‌اکسید و آب اجزای اصلی تشکیل دهنده آن اند. موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن که با عنوان HCCI خوانده می‌شوند نسل جدیدی از موتورهای احتراق داخلی هستند که مخلوط سوخت و هوا در آنها به صورت همگن فرایند تراکم را طی می‌کنند. این موتورها دارای قابلیت تولید توان برابر با توان تولیدی موتورهای دیزلی و بنزینی بوده ولی سوخت کمتری نسبت به آنها مصرف می‌کنند [۱، ۲]. احتراق موتورهای HCCI از نوع احتراق خنک<sup>۳</sup> بوده و به همین دلیل منجر به تولید NOx بسیار اندکی می‌شوند. البته این نوع از احتراق دارای مشکلاتی از جمله عدم مهار پذیری، بازه بسته کاری، شروع سرد<sup>۴</sup>، آماده‌سازی مخلوط همگن و... نیز است [۳، ۴].

راهکارهای متعددی توسط محققان، برای مهار فرایند احتراق در موتورهای بارهمگن اشتعال تراکمی ارائه شده است. استفاده از سوخت‌های ترکیبی [۵]، استفاده از افزایشده‌ها [۶] و استفاده از EGR [۷، ۸] از جمله روش‌های مهار فرایند احتراق در موتورهای بارهمگن اشتعال تراکمی اند [۹].

نتایج به دست آمده از مطالعه اولسون و همکاران نشان داد استفاده از EGR در موتورهای HCCI سبب کاهش همزمان آلایندگی‌های NOx، CO و UHC می‌شود [۱۰].

کیم و لی نشان دادند که افزودن EGR سبب به تأخیر انداختن آغاز احتراق و توسعه بازه احتراق شده و احتراق کوبشی HCCI را مهار می‌کند [۱۱].

شی و همکاران با انجام آزمایشاتی به این نتیجه رسیدند که افزودن EGR سبب کاهش NOx تولیدی از موتورهای HCCI شده ولی در عین حال سوت خروجی از این موتورها را نیز افزایش نمی‌دهد. از دیگر نتایج ارائه شده می‌توان به توسعه بازه عملکردی موتور، کاهش احتمال بروز کوبشی، تأخیر در آغاز احتراق و توسعه بازه انجام احتراق در اثر افزودن EGR می‌توان اشاره نمود [۱۲].

فتحی و همکاران نشان دادند که افزودن EGR سبب افزایش CO و UHC تولیدی شده و NOx تولیدی را کاهش می‌دهد. نکته قابل توجه

<sup>3</sup> Low temperature combustion

<sup>4</sup> Cold Start

<sup>1</sup> Exhaust Gas Recirculation (EGR)

<sup>2</sup> Low temperature

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

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

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

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

### ۲-۲- سازوکار واکنش شیمیایی

سوخت مورد استفاده در مطالعه حاضر سوخت هپتان نرمال است. سازوکار مورد استفاده برای شبیه‌سازی شیمی احتراق، سازوکار شبه‌توسعه‌یافته ارائه شده در دانشگاه چالمرز است [۱۹]. سازوکار مورد استفاده دارای ۵۷ گونه و ۲۹۰ واکنش بود و مراحل احتراقی سرد و داغ در آن در نظر گرفته شده‌اند.

پنج مقدار مختلف درصد EGR به سوخت اصلی متان اضافه شده و تأثیر آن بر ویژگی‌های احتراقی، انتشار آلاینده‌ها و بازده قانون اول ترمودینامیک سنجیده می‌شود. اثرات مختلف مواد تشکیل دهنده EGR نیز ارزیابی می‌شود. در این مطالعه، گازهای حاصل از احتراق به گونه‌ای به سوخت اضافه می‌شود تا مقدار سوخت ورودی ثابت بماند (نسبت هم‌ارزی متغیر). درصد EGR از معادله (۱۱) محاسبه می‌گردد.

$$EGR = \frac{N_{EGR}}{N_{fuel} + N_{air} + N_{EGR}} \times 100 \quad (11)$$

پس از اجرای برنامه برای درصد‌های مختلف EGR داده‌های به دست آمده بررسی می‌شوند.

### ۲-۳- روش گونه‌های بی‌اثر مصنوعی

هر ماده‌ای که افزون بر سوخت و هوا به ترکیب داخل محفظه احتراق افزوده می‌شود دارای سه نوع اثر مختلف بر فرایند احتراق است که عبارتند از: اثر گرمایی<sup>۱</sup>، اثر رقیق‌کنندگی<sup>۲</sup> و اثر شیمیایی<sup>۳</sup>. هدف اصلی در مطالعه حاضر تفکیک اثرات مختلف EGR بر احتراق HCCI متان و بحث بر روی آنهاست.

علاوه بر این اثرات مختلف هر یک از گونه‌های مهم موجود در ترکیب EGR محاسبه شده و بررسی می‌شوند. برای به دست آوردن اثرات شیمیایی، گونه‌های بی‌اثر مصنوعی همانند  $a\text{CO}_2$ ،  $a\text{H}_2\text{O}$ ،  $a\text{N}_2$  و  $a\text{O}_2$  با خواص ترموفیزیکی گونه‌های پایه تعریف شده و ترکیب EGR مشتمل بر آنها در نظر گرفته می‌شود.

تمامی مناطق در حال تبادل جرم و گرما با مناطق مجاور خویش‌اند. الگوی چندمنطقه‌ای با یک سازوکار واکنش شیمیایی شبه مفصل به هم پیوسته و شیمی احتراق با استفاده از سازوکار مورد استفاده شبیه‌سازی می‌شود. معادلات مربوط به قانون اول ترمودینامیک و واکنش شیمیایی برای هر یک از مناطق به صورت جداگانه حل می‌شود. معادلات (۸-۱) معادلات مورد نظر را نشان می‌دهند:

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

$$\frac{dU_i}{dt} = c_{v,i} m_i \frac{dT_i}{dt} + m_i \sum_{j=1}^{n_s} u_{j,i} \frac{dY_{j,i}}{dt} + \sum_{j=1}^{n_s} u_{j,i} Y_{j,i} \frac{dm_i}{dt} \quad (2)$$

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

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

$$\frac{dq_{i,cond}}{dt} = -k A_i \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{dq_{i,conv}}{dt} = h(T_w - T_{BL}) A_w \quad (6)$$

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

$$\frac{dY_{j,i}}{dt} = \frac{\dot{w}_{j,i} M W_j}{\rho_i} \quad (8)$$

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

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

جزئیات بیشتر برای الگو و معادلات مورد استفاده در روش‌های انتقال جرم و انتقال گرما در مطالعات قبلی قابل دسترس است [۱۶، ۱۷]. الگوی چندمنطقه‌ای به یک الگوی ترمودینامیکی برای شبیه‌سازی چرخه باز موتور متصل شده است. الگوی مورد استفاده برای شبیه‌سازی مرحله تبادل گاز یک الگوی تک منطقه‌ای است که در آن علاوه بر حل معادلات انرژی و واکنش شیمیایی، معادلات ورود و خروج جرم نیز برای گام زمانی حل می‌شوند. معادله (۱۰) معادله مورد نظر را نشان می‌دهند [۱۸].

<sup>3</sup> Chemical

<sup>1</sup> Thermal

<sup>2</sup> Dilution

است که به یک لگام ترمز برقی متصل است. به اهم ویژگی‌های موتور مورد استفاده نیز در جدول ۱ اشاره شده است. سامانه ورودی دارای یک گرم کننده و یک مهارکننده دم است تا بتواند دمای هوای ورودی در هنگام نیاز افزایش داده شود. موتور دارای دو افشانه برای پاشش سوخت‌های مختلف است. در این صورت در هنگام استفاده از سوخت‌های ترکیبی امکان پاشش همزمان دو سوخت فراهم شده و شرایط انجام اختلاط مطلوب‌تر دو سوخت فراهم می‌شود. دمای روغن روانکار با استفاده از یک گرم کننده ثابت نگهداشته شده می‌شود. سرعت دورانی موتور و فشار داخل محفظه احتراق در هر ۰,۱ درجه زاویه میل‌لنگ اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. برای سنجش فشار داخل محفظه احتراق از یک فشارسنج کیسلر<sup>۲</sup> استفاده شده است. اگرچه تغییرات چرخه‌ای در موتورهای بار همگن اشتعال تراکمی اندک است ولی برای افزایش دقت مطالعات برای هر حالت عملکردی از داده‌های مربوط به ۱۰۰ چرخه استفاده شده است [۲۴, ۲۵].

جدول ۱: ویژگی‌های موتور مورد استفاده در آزمایش‌ها

Waukesha	الگوی موتور
۶۱۲	حجم جابه جایی (cm <sup>3</sup> )
۸,۲۵	قطر استوانه (cm)
۱۱,۴	پیمایش سمبه (cm)
۲۴	طول دسته سمبه (cm)
۱۰	IVO (aTDC)
۲۱۴	IVC (aTDC)
۵۰۰	EVO (aTDC)
۱۵	EVC (aTDC)

برای انجام مطالعه دو حالت عملکردی مختلف انتخاب شده و اثرات افزودن EGR بر احتراق هر یک از حالت‌های مذکور بررسی شده است. جدول ۲ ویژگی‌های دو نمونه مذکور را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این جدول نشان داده شده است نسبت هم ارزی و مقدار EGR در نمونه‌های مورد استفاده، دارای مقادیر مختلف اند.

جدول ۲: ویژگی‌های نمونه‌های مورد استفاده

شماره	Rc	$\lambda$	EGR%	rpm
۱	۱۲,۷	۳,۶۷	۴۰	۷۰۰
۲	۱۲,۷	۲,۲۵	۰	۷۰۰

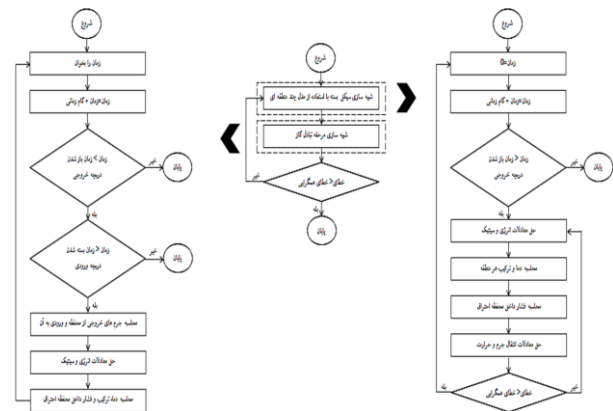
### ۵- نتایج و بحث

در ابتدا باید دقت الگو در پیش‌بینی عملکرد و آلاینده‌های موتور مورد ارزیابی قرار بگیرد. شکل ۲ منحنی‌های فشار تجربی و عددی دو نمونه

به عنوان مثال، گونه aCO<sub>2</sub> دارای تمامی خواص گرمایی و فیزیکی CO<sub>2</sub> بوده، ولی از آن‌جا که در سازوکار واکنش شیمیایی، واکنشی برای این گونه در نظر گرفته نشده است، aCO<sub>2</sub> در واکنش‌ها شرکت نمی‌کند. به منظور به دست آوردن اثرات گرمایی، گونه دامی b تعریف می‌شود. این گونه‌ها، نه تنها در سازوکار واکنش شیمیایی نقشی نداشته و در واکنش‌ها شرکت نمی‌کنند، بلکه با تعریف خواص این گونه متناظر با خواص مخلوط، اثرات ترموفیزیکی این گونه نیز از بین رفته است. اگر نتایج bEGR، از نتایج aEGR کم شود، اثر گرمایی EGR بر احتراق HCCI به دست می‌آید. در نهایت، برای به دست آوردن خواص رقیق‌کنندگی، اگر نتایج به دست آمده از اجرای برنامه تحت bEGR را از حالت درصد صفر EGR کم شود، اثر رقیق‌کنندگی EGR بر احتراق HCCI به دست می‌آید. در مطالعات مختلفی از روش گونه‌های مصنوعی بی‌اثر برای بررسی اثرهای مختلف افزایش‌دهنده‌های متعدد بر پدیده احتراق استفاده شده است [۲۳-۲۰].

### ۳- طرح حل مسئله

طرح حل مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است. حل مسئله از لحظه بسته شدن دریچه ورودی و با استفاده از داده‌های تجربی آغاز شده و پس از طی یک چرخه بسته وارد چرخه باز موتور می‌شود. در این لحظه الگوی تک منطقه‌ای فعال شده و فرایندهای تبادل گاز را شبیه‌سازی می‌کند. پس از اتمام فرایند تبادل گاز، الگوی چندمنطقه‌ای با شرایط اولیه محاسبه شده توسط الگوی تک منطقه‌ای فعال می‌شود و این روند تا زمانی که شرایط اولیه تغییر نکنند، ادامه می‌یابد.



شکل ۱: طرح حل مسئله

### ۴- نتایج تجربی

داده‌های تجربی مورد استفاده در مطالعه حاضر از فعالیت‌های آزمایشگاهی انجام یافته در دانشگاه آلبرتا<sup>۱</sup> کانادا حاصل شده است. موتور مورد استفاده در دانشگاه مزبور یک موتور تک استوانه تحقیقاتی<sup>۱</sup>

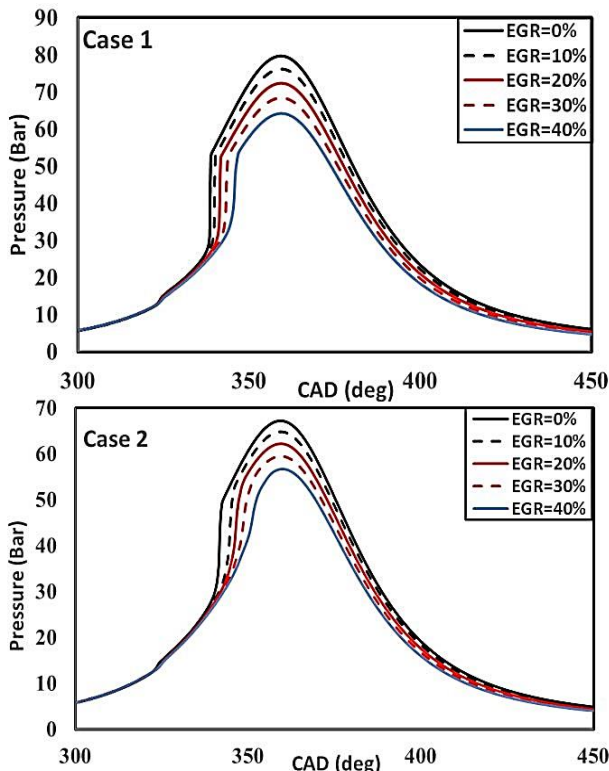
<sup>2</sup> Kistler 6043A

<sup>1</sup> Cooperative Fuel Research (CFR)

گازهای حاصل از احتراق دارای ظرفیت گرمایی بالایی هستند و گرمای درون استوانه را در طی فرآیند تراکم جذب کرده و باعث کاهش دمای بیشینه مخلوط می‌شوند. این کاهش دما، باعث کاهش فشار بیشینه درون استوانه شده و مخلوط دیرتر به نقطه خود اشتعالی می‌رسد و در نهایت، احتراق به عقب می‌افتد. نتیجه مشابهی نیز توسط بادوری و همکاران گزارش شده است. نتایج بدست آمده در مطالعه مذکور نشان می‌داد که EGR با توجه به ساختار سه اتمی ذرات تشکیل دهنده می‌تواند گرمای محفظه را جذب کرده و با تنظیم دما، فرآیند احتراق را نیز پایش نماید [۸].

شکل ۵ منحنی گرمای تجمعی آزاد شده را بر حسب درجه میل‌لنگ برای هر دو حالت نمایش می‌دهد. همان‌طور که از نمودارهای آزادسازی گرمای تجمعی مشخص است، با افزایش درصد EGR نه تنها شروع احتراق به عقب می‌افتد، بلکه مدت زمان احتراق نیز افزایش می‌یابد. بنابراین نرخ آزادسازی انرژی کاهش می‌یابد. در بخش قبل، به علت عقب افتادن شروع احتراق اشاره شد. از آن‌جا که گازهای حاصل از احتراق سبب کاهش اکسیژن موجود در مخلوط می‌شوند، نقش یک رقیق‌کننده را بازی کرده و سبب کاهش سرعت اکسیداسیون و در نهایت، کاهش نرخ احتراق می‌شوند.

توجه شود که در مطالعه حاضر، EGR جایگزین سوخت و هوا شده به طوری که نسبت هم ارزی مخلوط ثابت باقی می‌ماند. بنابراین با افزایش درصد EGR از مقدار سوخت ورودی به محفظه احتراق کاسته می‌شود.

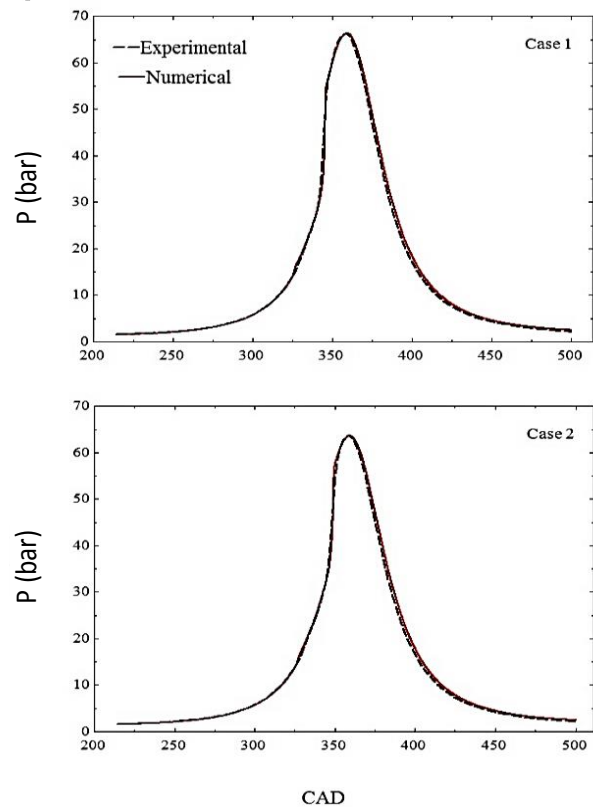


شکل ۳: منحنی فشار درون استوانه بر حسب درجه میل‌لنگ

مورد نظر را نشان می‌دهد. همانگونه که شکل نشان می‌دهد الگو دارای دقت مطلوبی در پیش‌بینی فشار داخل محفظه احتراق است. جدول ۳ نیز داده‌های مربوط به آلاینده‌های موتور را برای هر دو حالت مذکور نشان می‌دهد. داده‌های جدول مذکور نشان می‌دهد که علاوه بر فشار داخل محفظه احتراق، آلاینده‌های خروجی از موتور نیز توسط الگو به خوبی پیش‌بینی می‌شوند.

جدول ۳: آلاینده‌های خروجی از موتور

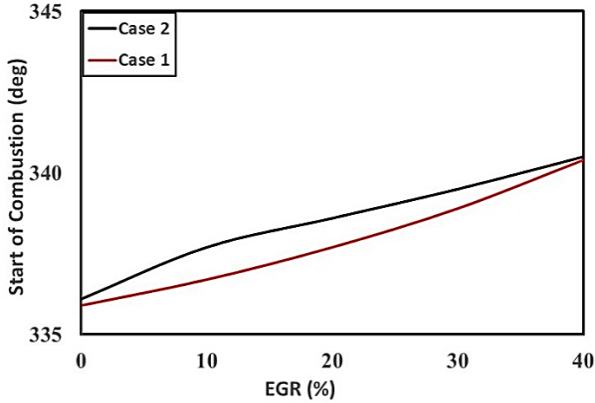
آلاینده	نمونه ۱	نمونه ۲
CO % تجربی	۰,۰۸۱	۰,۰۶۵
CO % عددی	۰,۰۸۱	۰,۰۶۷
CO <sub>2</sub> % تجربی	۴,۱	۶
CO <sub>2</sub> % عددی	۴,۱۵	۶,۲۶
UHC (ppm) تجربی	۴۱۱۲	۴۷۲۳
UHC (ppm) عددی	۳۹۲۱	۴۴۰۳



شکل ۴: منحنی‌های تجربی و عددی فشار داخل محفظه احتراق

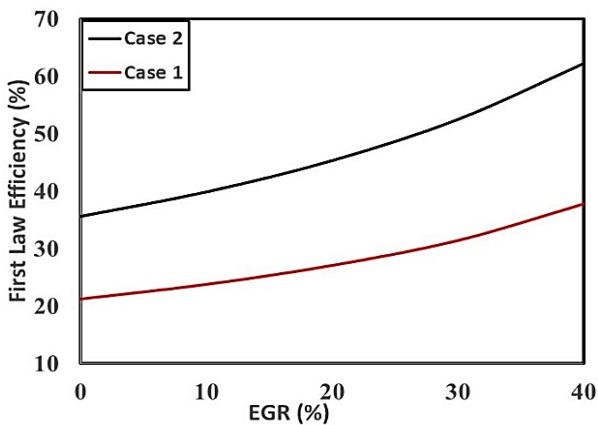
شکل ۳ منحنی فشار درون استوانه بر حسب زاویه میل‌لنگ و شکل ۴ منحنی دمای منطقه هسته را بر حسب درجه میل‌لنگ را برای هر دو حالت نمایش می‌دهند. همان‌طور که از نمودار مشخص است، افزایش درصد EGR باعث کاهش فشار بیشینه درون استوانه و کاهش دمای بیشینه مخلوط شده و شروع احتراق را به عقب می‌اندازد.

شکل ۶ تغییرات زمان شروع احتراق بر حسب درصد EGR را نمایش می‌دهد. همانطور که اشاره شد، افزایش درصد EGR، سبب کاهش دمای بیشینه مخلوط و در نتیجه تأخیر در اشتعال می‌شود. معیار شروع احتراق در این مطالعه درجه‌ای از میل‌لنگ در نظر گرفته می‌شود که در آن ۱۰٪ گرمای کلی آزاد شده باشد. نتیجه بدست آمده منطبق بر نتایج ارائه شده توسط داس و همکاران است [۹].



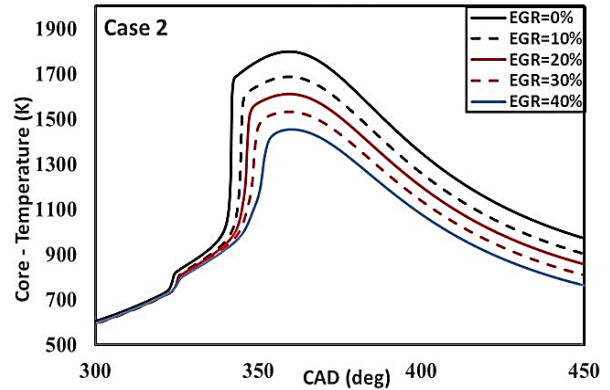
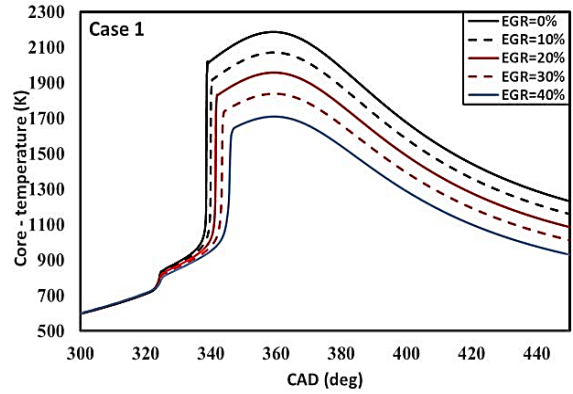
شکل ۶: زمان شروع احتراق بر حسب درصد EGR

شکل ۷ بازده قانون اول ترمودینامیک موتور را بر حسب درصد EGR و برای دو حالت نمایش می‌دهد. با افزایش درصد EGR، بازده افزایش پیدا می‌کند. افزایش درصد EGR منجر به کاهش فشار بیشینه و در نتیجه کار انجام شده در طی پیمایش انسپاس می‌شود. اما از طرفی، تأخیر در اشتعال سبب می‌شود تا آزادسازی انرژی بیشتر در پیمایش توان انجام شده تا کار ناشی از احتراق در پیمایش تراکم هدر نرود. در سوخت هیپتان نرمال، عامل دوم بر عامل اول غلبه کرده و سبب افزایش بازده می‌شود.

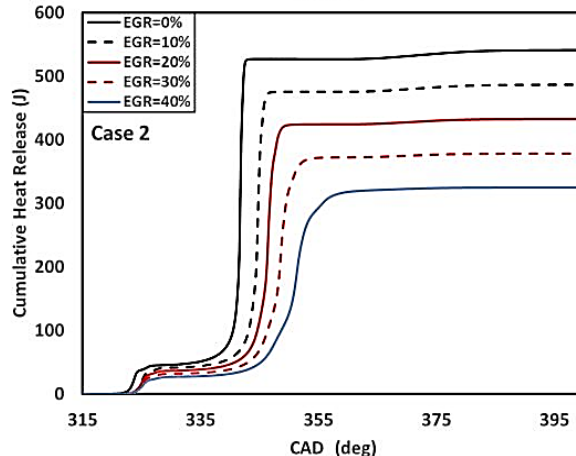
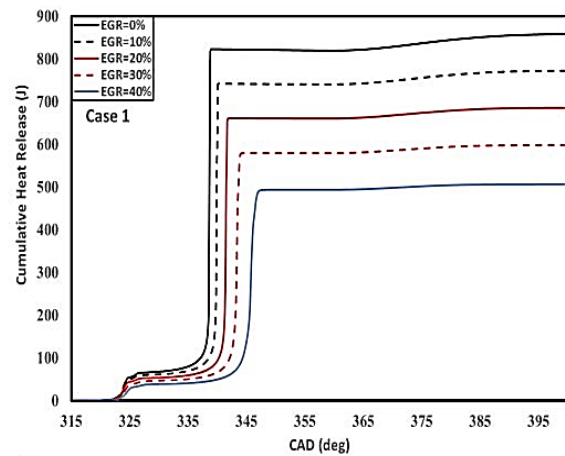


شکل ۷: بازده قانون اول بر حسب درصد EGR

شکل ۸ نمودار تولید آلاینده‌های مختلف را بر حسب درجه میل‌لنگ برای حالت ۲ نمایش می‌دهد. از اثرات عمده‌ی افزایش درصد EGR، کاهش  $NO_x$  تولیدی و افزایش CO و هیدروکربن‌های نسوخته است. کاهش دمای

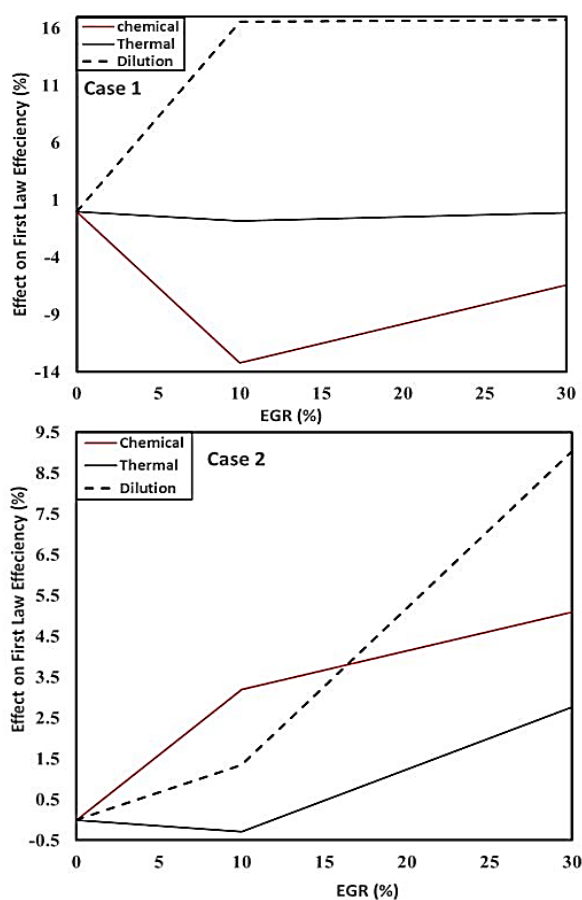


شکل ۴: منحنی دمای منطقه هسته بر حسب درجه میل‌لنگ



شکل ۵: گرمای آزاد شده تجمعی بر حسب درجه میل‌لنگ

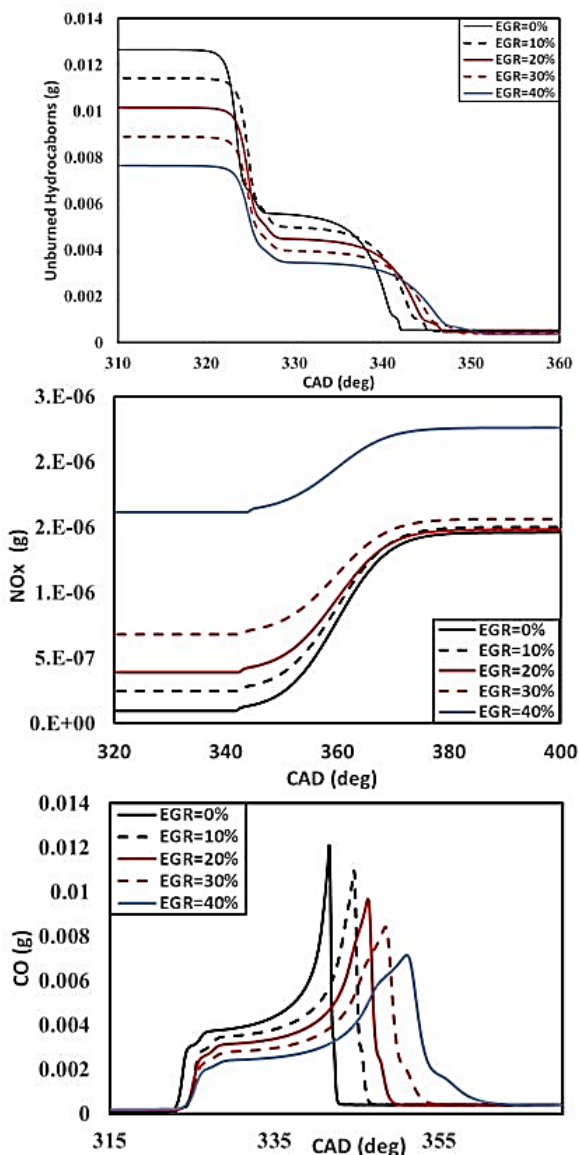
است، EGR تولیدی در آن دارای رادیکال‌های اکسیژن بوده و همین امر سبب می‌شود تا احتراق بهتر انجام شده و سریعتر شروع می‌شود. بنابر این به دلیل وجود رادیکال‌های آزاد سبب جلو افتادن احتراق شده و باعث می‌شود آزادسازی انرژی بیشتر در پیمایش تراکم انجام شده و کار ناشی از احتراق در پیمایش تراکم هدر رود. برای نمونه ۲ هر سه اثر EGR سبب افزایش بازده شده است زیرا با توجه به شکل ۶ احتراق در این نمونه در حین فرایند انبساط انجام یافته و افزودن EGR هر چند سبب به تأخیر افتادن احتراق می‌شود اما با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ سبب احتراق ناقص نمی‌شود.



شکل ۹: اثرات مختلف EGR بر روی بازده قانون اول

شکل ۱۰ اثرات گرمائی گونه‌های مهم موجود در EGR را بر روی بازده قانون اول هر دو نمونه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در میان چهار گونه مهم ذکر شده  $H_2O$  بیشترین ظرفیت گرمائی ویژه را بر واحد جرم داشته و  $O_2$  کمترین مقدار را داراست. این در حالی است که  $N_2$  بیشترین درصد جرمی را در ترکیب EGR داراست و پس از آن  $CO_2$  و  $H_2O$  قرار دارند. به عبارتی اگر تمامی EGR متشکل از  $H_2O$  می‌بود، اثر گرمائی EGR افزایش مشهودی داشت و اگر تمامی ترکیب  $O_2$  بود، عملاً EGR فاقد اثرات گرمائی معکوسی را نشان می‌داد. بنابراین  $O_2$  سهم منفی گرمائی داشته و مانع از به تأخیر انداختن گرما می‌شود.

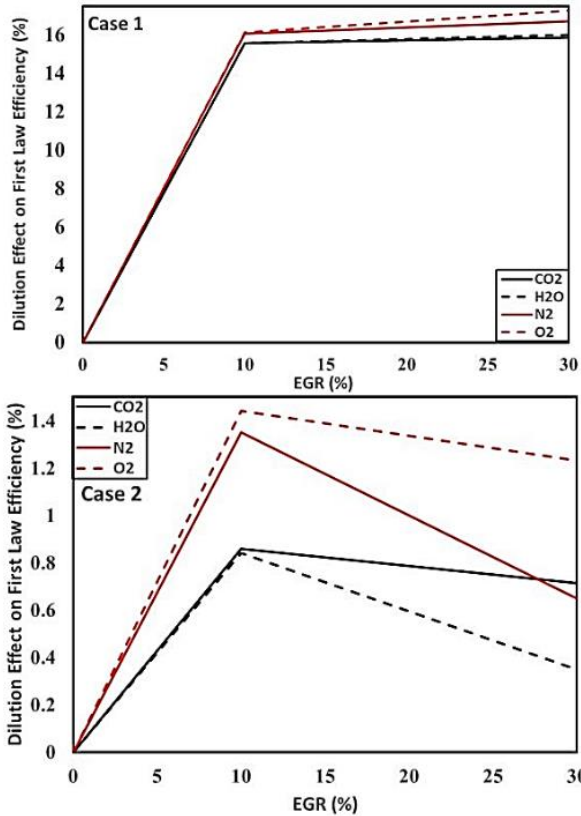
بیشینه مخلوط و همچنین کاهش میزان اکسیژن در مخلوط، سبب کاهش تولید  $NO_x$  می‌شود. از طرفی این کمبود اکسیژن و کاهش دما، سبب احتراق ناقص هیدروکربن‌ها و در نتیجه افزایش میزان  $CO$  و هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود. نمودارهای مشابهی نیز برای نمونه ۱ وجود دارند. نتایج مشابهی نیز توسط پوتراساری و همکاران گزارش شده است [۴].



شکل ۸: تغییرات جرمی آلاینده‌ها در محفظه احتراق

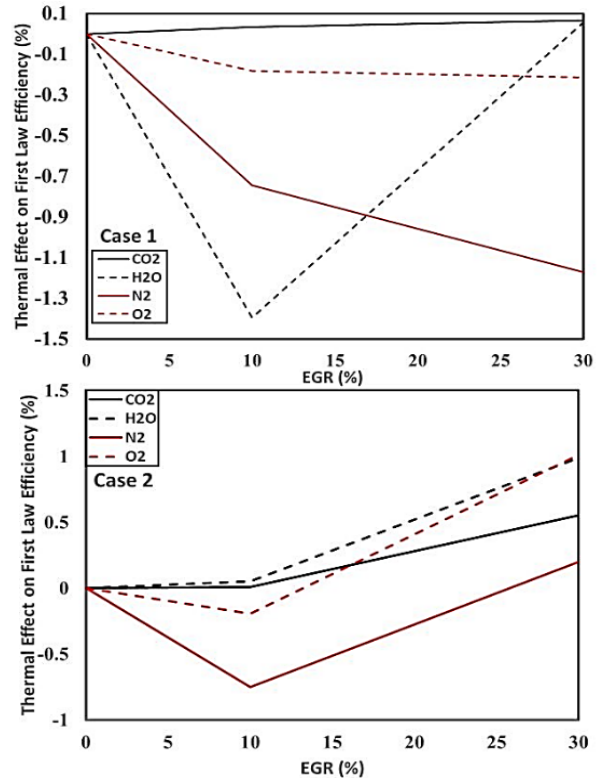
در ادامه اثرات شیمیایی، گرمایی و رقیق‌کنندگی EGR مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. این اثرات به صورت کلی برای ترکیب گازهای حاصل از احتراق و نیز به صورت جزئی برای چهار گونه اصلی موجود در گازهای حاصل از احتراق ( $O_2$  و  $N_2$ ،  $H_2O$ ،  $CO_2$ ) نمایش داده شده‌اند. شکل ۹ اثرات جزئی گاز EGR را بر روی بازده قانون اول نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، در نمونه ۱، اثر شیمیایی سبب کاهش بازده احتراق می‌شود. با توجه به اینکه این نمونه نسبت به نمونه شماره ۲ غنی تر

شکل ۱۲ اثر رقیق کنندگی گونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود اثر رقیق کنندگی سبب کاهش احتمال برخورد ذره‌های سوخت و هوا شده و احتراق را به تأخیر می‌اندازد.



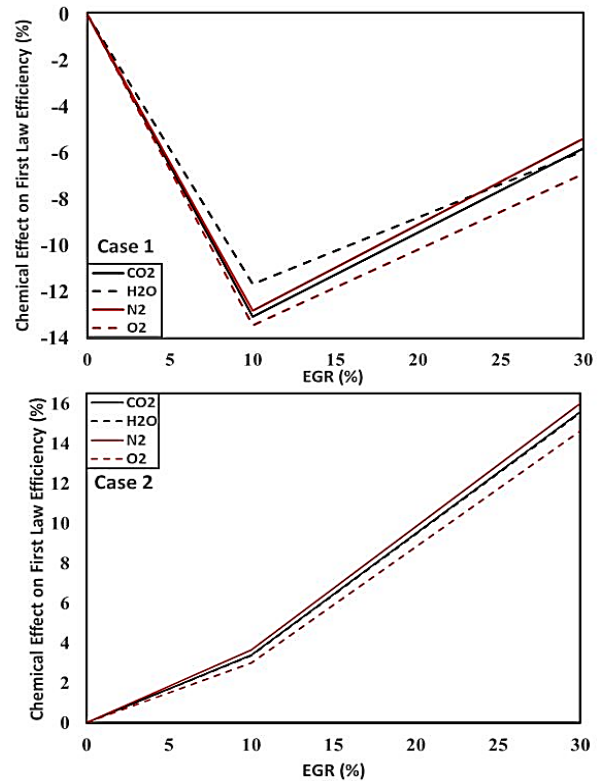
شکل ۱۲: اثرات رقیق کنندگی گونه‌های مختلف بر روی بازده قانون اول

شکل ۱۳ اثرات مختلف EGR را بر زمان آغاز احتراق نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشخص است اثر شیمیایی EGR برای هر دو نمونه سبب پیش انداختن احتراق شده است که دلیل این امر وجود هیدروکربن‌های نسوخته در ترکیب EGR است. شکل ۱۴ اثرات شیمیایی گونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص می‌شود که اکسیژن به دلیل قابلیت شرکت در واکنش‌های سوخت سبب تسریع در آغاز واکنش می‌شود.



شکل ۱۰: اثرات گرمایی گونه‌های مختلف بر روی بازده قانون اول

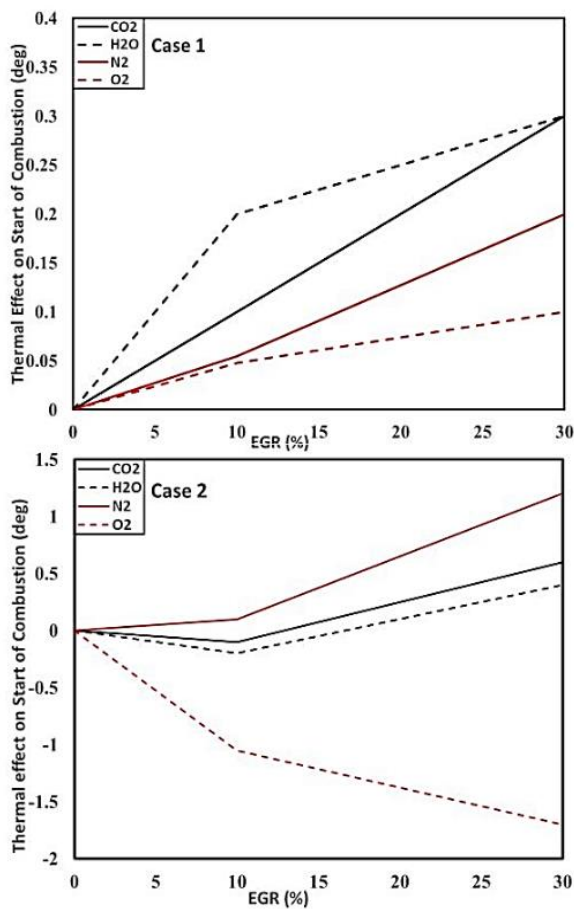
شکل ۱۱ تأثیر شیمیایی گونه‌ها را بر بازده احتراق نشان می‌دهد CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O به دلیل اینکه در بسیاری از واکنش‌ها نقش سطح سوم را بازی می‌کنند سبب بهبود واکنش‌های شیمیایی شده و بازده را افزایش می‌دهند.



شکل ۱۱: اثرات شیمیایی گونه‌های مختلف بر روی بازده قانون اول

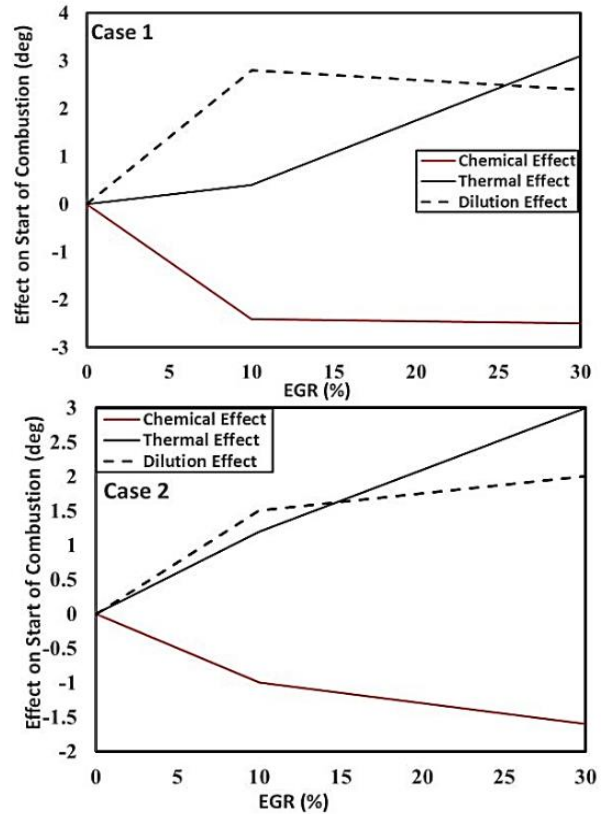
شکل ۱۵ اثرات ترمودینامیکی مولکول‌های مختلف را نشان می‌دهد. در نمونه شماره ۲ به دلیل رقیق بودن بیش از حد مخلوط، EGR ورودی دارای مقادیر قابل توجهی اکسیژن است و همین امر سبب شده است تا ظرفیت گرمایی متوسط EGR حاصل از احتراق در این نمونه کمتر از ظرفیت گرمایی متوسط EGR حاصل از احتراق نمونه دوم باشد.

بنابراین در مقادیر بالای EGR در نمونه شماره ۲ اکسیژن نسبت به متوسط مخلوط جاذب گرما نبوده و نقشی در کاهش دما و به تأخیر انداختن احتراق ندارد، بلکه به سبب داشتن ظرفیت گرمایی ضعیف‌تر نسبت به مخلوط داخل محفظه اثر گرمایی معکوس از خود نشان می‌دهد.

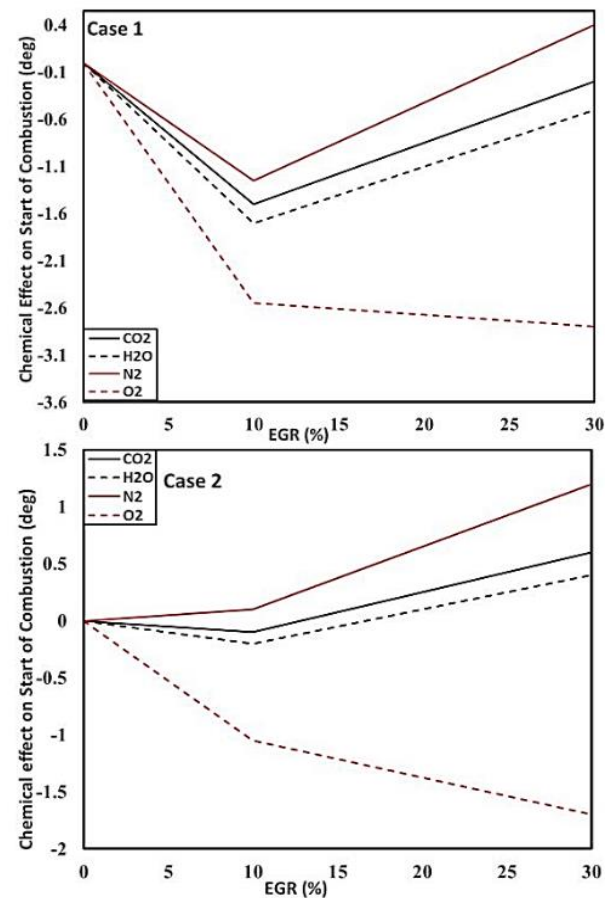


شکل ۱۵: اثرات گرمایی گونه‌های مختلف بر روی زمان شروع احتراق

شکل ۱۶ اثرات رقیق‌کنندگی ترکیب EGR را بر روی زمان آغاز احتراق و برای هر دو نمونه مورد بحث نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است برای نمونه ۲ اکسیژن به دلیل داشتن درصد جرمی بیشتر در ترکیب EGR دارای اثرات رقیق‌کنندگی بیشتر در راستای پیش‌انداختن احتراق است. در حالی که برای نمونه ۲ این ماده سبب به تأخیر انداختن احتراق می‌شود.



شکل ۱۳: اثرات مختلف EGR بر روی زمان شروع احتراق



شکل ۱۴: اثرات شیمیایی گونه‌های مختلف بر روی زمان شروع احتراق

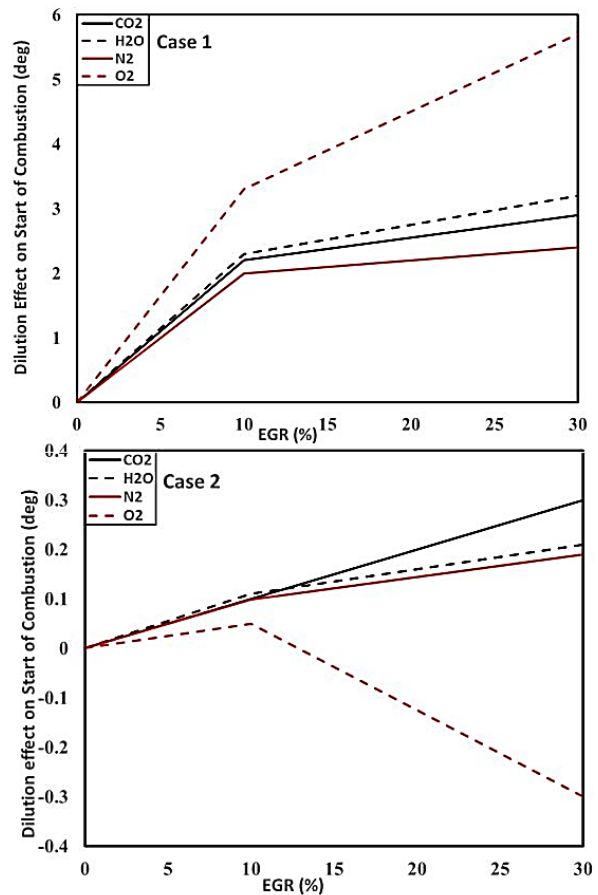
$k$	ضریب هدایت گرمایی، $J/ms^{\circ}K$
$M$	جرم، $kg$
$MW$	جرم مولکولی هر گونه
$n_z$	تعداد مناطق
$P$	فشار داخل استوانه، $Pa$
$Q$	گرما، $J$
$R_U$	ثابت جهانی گازها، $J/mol^{\circ}K$
$T$	دما، $K$
$t$	زمان، $s$
$u$	انرژی داخلی واحد جرم، $J/kg$
$W$	کار، $J$
$Y$	نسبت جرمی هرگونه

### علائم یونانی

$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\gamma$	ضریب اتمیسیته گاز
$\theta$	زاویه میل لنگ

### مراجع و منابع

- [1] Hasan, M.M., et al., Numerical study of engine parameters on combustion and performance characteristics in an n-heptane fueled HCCI engine. Applied Thermal Engineering, 2018. 128: p. 1464-1475.
- [2] Khandal, S., N. Banapurmath, and V. Gaitonde, Performance studies on homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine powered with alternative fuels. Renewable Energy, 2019. 132: p. 683-693.
- [3] Shaver, G.M., M. Roelle, and J.C. Gerdes. A two-input two-output control model of HCCI engines in American Control Conference. 2006. Minneapolis.
- [4] Putrasari, Y., N. Jamsran, and O. Lim, An investigation on the DME HCCI autoignition under EGR and boosted operation. Fuel, 2017. 200: p. 447-457.
- [5] Amjad, A., et al., Availability analysis of n-heptane and natural gas blends combustion in HCCI engines. Ener, 2011. 36(12): p. 6900-6909.
- [6] Megaritis, A., D. Yap, and M.L. Wyszynski, Effect of water blending on bioethanol HCCI combustion with forced induction and residual gas trapping. Energy, 2007. 32(12): p. 2396-2400.
- [7] Putrasari, Y., N. Jamsran, and O. Lim, An investigation on the DME HCCI autoignition under EGR and boosted operation. Fuel, 2017. 200(Supplement C): p. 447-457.



شکل ۱۶: اثرات رقیق کنندگی گونه‌های مختلف بر روی زمان شروع احتراق

### ۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تأثیرات کلی و جزئی EGR بر احتراق HCCI سوخت هپتان با استفاده از یک الگوی چندمنطقه‌ای و سازوکار واکنش شیمیایی شبه مفصل بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که:

- افزودن EGR به سوخت، احتراق را به تأخیر انداخته و سبب کاهش بیشینه فشار و دمای محفظه احتراق می‌شود.
- مشاهده می‌شود که با افزایش EGR می‌توان بازده را افزایش داد، تولید آلاینده  $NO_x$  را کاهش داده و زمان بندی احتراق را مهار نمود.
- در مخلوط‌های فقیرسوز با سوخت دارای عدد اکتانی کوچکتر، اثر رقیق‌سازی EGR بر رو اثر گرمایی و شیمیایی آن غالب است.
- برای یک مخلوط بسیار فقیر نیتروژن و برای یک مخلوط تقریباً فقیر آب دارای بیشترین اثر گرمایی است.
- اثر رقیق‌سازی اکسیژن به دلیل قابلیت شرکت در واکنش‌های شیمیایی با سایر گونه‌ها متفاوت است.

### فهرست علائم

$EGR$	درصد EGR
$h$	آنتالپی، $J/kg$

- [17] Neshat, E. and R.K. Saray, Effect of different heat transfer models on HCCI engine simulation. *Energy Conversion and Management*, 2014. 88: p. 1-14.
- [18] Heywood, J.B., *Internal combustion engine fundamentals* 1998, Singapore: McGraw Hill Inc.
- [19] Golovichev, V. [http://www.tfd.chalmers.se/~valeri/MECH/chem.inp\\_c7h16](http://www.tfd.chalmers.se/~valeri/MECH/chem.inp_c7h16).
- [20] Neshat, E., M. Nazemian, and D. Honnery, Thermodynamic modeling and validation of in-cylinder flow in diesel engines. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2019.
- [21] Neshat, E., A.V. Bajestani, and D. Honnery, Advanced numerical analyses on thermal, chemical and dilution effects of water addition on diesel engine performance and emissions utilizing artificial inert species. *fuel*, 2019. 242: p. 596-606.
- [22] Neshat, E., R.K. Saray, and V. Hosseini, Effect of reformer gas blending on homogeneous charge compression ignition combustion of primary reference fuels using multi zone model and semi detailed chemical-kinetic mechanism. *Applied Energy*, 2016. 179: p. 463-478.
- [23] Reyhanian, M. and V. Hosseini, Various effects of reformer gas enrichment on natural-gas, iso-octane and normal-heptane HCCI combustion using artificial inert species method. *Energy Conversion and Management*, 2018. 159: p. 7-19.
- [24] Hosseini, V. and M.D. Checkel, Reformer gas composition effect on HCCI combustion of n-heptane, iso-octane, and natural gas, 2008, SAE Technical Paper.
- [25] Hosseini, V. and M.D. Checkel, Effect of reformer gas on HCCI combustion-Part I: High Octane Fuels, 2007, SAE Technical Paper.
- [8] Bhaduri, S., H. Jeanmart, and F. Contino, EGR control on operation of a tar tolerant HCCI engine with simulated syngas from biomass. *Applied Energy*, 2018. 227: p. 159-167.
- [9] Das, P., P. Subbarao, and J. Subrahmanyam, Control of combustion process in an HCCI-DI combustion engine using dual injection strategy with EGR. *Fuel*, 2015. 159: p. 580-589.
- [10] Olsson, J.-O., et al., The effect of cooled EGR on emissions and performance of a turbocharged HCCI engine, 2003, SAE Technical paper.
- [11] Kim, D.S. and C.S. Lee, Improved emission characteristics of HCCI engine by various premixed fuels and cooled EGR. *Fuel*, 2006. 85(5): p. 695-704.
- [12] Shi, L., et al., Study of low emission homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine using combined internal and external exhaust gas recirculation (EGR). *Energy*, 2006. 31(14): p. 2665-2676.
- [13] Fathi, M., R.K. Saray, and M.D. Checkel, The influence of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on combustion and emissions of n-heptane/natural gas fueled Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engines. *Applied Energy*, 2011. 88(12): p. 4719-4724.
- [14] Jang, J., et al., Improvement of DME HCCI engine combustion by direct injection and EGR. *Fuel*, 2013. 113: p. 617-624.
- [15] Nishi, M., M. Kanehara, and N. Iida, Assessment for innovative combustion on HCCI engine by controlling EGR ratio and engine speed. *Applied Thermal Engineering*, 2016. 99: p. 42-60.
- [16] Neshat, E. 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*, 2014. 73: p. 325-339.



## Comprehensive Investigation on the Effect of the EGR Components on n-heptane HCCI Combustion

S. Zeinali<sup>1</sup>, E. Neshat<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Msc Student, Faculty of Mechanical Engineering Department, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, [Z.salar1374@gmail.com](mailto:Z.salar1374@gmail.com)

<sup>2</sup> Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, [e\\_neshat@sut.ac.ir](mailto:e_neshat@sut.ac.ir)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 19 December 2020

Accepted: 24 January 2021

#### Keywords:

HCCI combustion

N-heptane

EGR

Artificial inert species

### ABSTRACT

The main aim of the current study is a comprehensive investigation of the different effects of EGR on n-heptane lean homogeneous combustion. Achieving the goal, a thermodynamic multi-zone model coupled to a semi-detailed chemical kinetics mechanism is utilized. A single-zone model is used for the simulation of the gas exchange process. Due to lean combustion, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and CO<sub>2</sub> are considered as the main products of combustion, and their thermal, chemical and dilution effects are studied using the artificial inert species method. An HCCI engine is considered as the combustion chamber and n-heptane is the used fuel. At first, the model is validated against the experimental data and then different values of EGR are added to the in-cylinder mixture, and its thermal, dilution and chemical effects are discussed. The results show that for lean low-temperature combustion the dilution effect of EGR is more significant than its chemical and thermal effects. N<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O have more significant thermal effects on HCCI combustion of a very lean mixture and lean mixture. The dilution effects of O<sub>2</sub> is different from other species because it participates in chemical reactions.

