



## توسعه الگوی پیش‌بینی کننده زمان شروع احتراق در موتور اشتعال تراکمی مهارشونده واکنشی

سید مهدی لشکرپور<sup>۱</sup>، رحیم خوشبختی سرای<sup>۲\*</sup>، محمد نجفی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، [Lashkarpour@gmail.com](mailto:Lashkarpour@gmail.com)

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، شهر جدید سهند، تبریز، ایران، [khoshbakhti@sut.ac.ir](mailto:khoshbakhti@sut.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مکانیک برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، [najafi@srbiau.ac.ir](mailto:najafi@srbiau.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۶ دی ۱۳۹۹

پذیرش: ۰۳ بهمن ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

موتور اشتعال تراکمی مهارشونده واکنشی

دینامیک سیالات محاسباتی

الگوی چندمنطقه‌ای

الگوی انتگرال کوبشی اصلاح شده

روش وراثت

### چکیده

در این تحقیق، یک برنامه چندمنطقه‌ای بهبود یافته برای شبیه‌سازی احتراق موتور اشتعال تراکمی مهارشونده واکنشی توسعه یافته است. از تابع بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای توزیع سوخت هپتان نرمال به عنوان ورودی برنامه چندمنطقه‌ای استفاده و صحت‌گذاری گردیده است. بعد از صحت‌گذاری نتایج و با استفاده از داده‌های بدست آمده از الگوی چندمنطقه‌ای، ضرایب مجهول الگوی انتگرال کوبشی اصلاح شده و سپس الگوی ۵۰ درصد سوخت سوخته شده و الگوی بازه احتراق توسط روش وراثت تعیین و بهینه گردیده و با ۷۰ مورد از نتایج خروجی الگوی چندمنطقه‌ای و ۲۵ مورد از نتایج آزمون عملی مقایسه گردیده است. نتایج نشان دهنده بیشینه خطای ۱٫۲ درجه میل لنگ برای پیش‌بینی زمان شروع احتراق است. همچنین، دو الگوی دیگر متغیرهای ۵۰ درصد سوخت سوخته شده و بازه احتراق را بترتیب با خطاهای متوسط ۱ و ۱٫۲ درجه میل لنگ پیش‌بینی می‌نمایند.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



## ۱- مقدمه

RCCI<sup>۱</sup> فناوری احتراق یک موتور دو سوخته است که از ترکیب سوخت در داخل محفظه احتراق بهره برده و حداقل دارای دو سوخت با واکنش پذیری‌های متفاوت بوده و می‌تواند از پاشش چندمرحله‌ای برای مهار مقدار واکنش‌پذیری سوخت، زمان شروع و شدت احتراق استفاده نماید. در این نوع احتراق، سوخت با واکنش‌پذیری ضعیف به همراه هوا به داخل محفظه احتراق هدایت می‌شود.

این سوخت می‌تواند در راهگاه ورودی توسط افشانه پاشیده شده و قبل از باز شدن دریچه هوا با هوا ترکیب گردد. سوخت دارای واکنش‌پذیری شدید قبل از احتراق سوخت پیش‌آمیخته توسط پاشش یک یا چندمرحله‌ای به داخل محفظه احتراق وارد می‌شود. مفهوم RCCI مهار احتراق بهتری را نسبت به موتورهای HCCI دو سوخته و PCCI ارائه می‌دهد. همچنین، با استفاده از این فناوری احتراقی، بازده حرارتی موتور تا حدود ۶۰٪ افزایش پیدا می‌کند [۱].

اگوز و همکاران در سال ۲۰۱۳، برای شبیه‌سازی موتور دوسوخته در حالت کارکرد RCCI و همچنین بدست آوردن متغیرهای شروع احتراق و نرخ آزاد سازی انرژی از یک الگوی چندمنطقه‌ای<sup>۲</sup> به نام XCCI استفاده نموده اند [۲].

در این تحقیق یک الگوی ۱۰ منطقه‌ای توسعه داده شده است و از سینتیک شیمیایی برای اکسید کردن ترکیب سوخت دیزل و بنزین (ایزو اکتان به عنوان نماینده سوخت بنزین و هپتان نرمال به عنوان نماینده سوخت دیزل) استفاده شده است که دارای ۱۳۷ گونه و ۶۳۳ واکنش شیمیایی است. به منظور شبیه‌سازی پاشش سوخت و بدست آوردن توزیع سوخت در هر یک از مناطق، از شبیه‌سازی CFD<sup>۳</sup> استفاده گردیده است. در ادامه، توزیع سوخت بدست آمده توسط نرم‌افزار CFD، به هر یک از مناطق الگوی چندمنطقه‌ای اعمال می‌شود. تحقیق صورت پذیرفته نشان‌دهنده قابلیت شدید الگوی چندمنطقه‌ای در شبیه‌سازی زمان شروع احتراق و نرخ آزادسازی انرژی احتراق RCCI است.

ناظمی و همکاران [۳]، تحقیقاتی بر روی فرایندهای احتراقی یک موتور RCCI نمونه انجام داده‌اند. در این تحقیق، الگوی دینامیک سیالات محاسباتی به همراه مکانیزم سینتیک شیمیایی با استفاده از نرم‌افزار Converge توسعه داده شده است و نتایج توسط مقادیر بدست آمده از آزمون عملی صحت‌گذاری شده است. بعد از اطمینان از صحت نتایج بدست آمده توسط الگوی مذکور، متغیرهای احتراقی همانند زمان شروع احتراق و زمان ۵۰ درصد سوخت سوخته شده به همراه مقادیر آلاینده‌ها برای حالت‌های مختلف استخراج شده است. همچنین، در این تحقیق متغیرهای مهمی همانند زمان شروع احتراق،

فشار پاشش و زوایای نوک افشانه تغییر داده شده و تأثیر آن بر روی احتراق و آلاینده‌ها بررسی شده است.

در این تحقیق نشان داده شده است که کاهش فشار پاشش سوخت با واکنش‌پذیری شدید می‌تواند افزایش فشار داخل محفظه را محدود کرده و همچنین بصورت همزمان پیش‌رسی پاشش سوخت با واکنش‌پذیری شدید به داخل محفظه می‌تواند موجب کاهش چشمگیر آلاینده‌های کربن مونواکسید و هیدروکربن‌های نسوخته گردد. همچنین، برای بازه عملکردی موتور بهترین زاویه پاشش و زاویه سوراخ‌های نوک افشانه و فشار پاشش بهینه‌سازی گردیده است.

میکولسکی و همکاران [۴-۶]، الگوی چندمنطقه‌ای برای پیش‌بینی متغیرهای احتراقی و آلاینده‌ها یک موتور RCCI را ارائه داده‌اند. در الگوی مذکور، سوخت متان به عنوان سوختی با مقدار واکنش‌پذیری ضعیف در نظر گرفته شده است. این الگو همان الگوی مورد استفاده توسط اگوز است که با XCCI نام گذاری گردیده است. با بررسی‌های صورت گرفته مشخص می‌شود که با افزایش گرادیان مقدار سوخت نسوخته در مناطق محاسباتی تقسیم بندی شده در داخل محفظه احتراق به نسبت مقدار سوخت متان موجود، بازده حرارتی افزایش و مقدار آلاینده کربن مونواکسید کاهش پیدا می‌کند. تأثیر این بهبود در شرایط کارکردی موتور با بار کم<sup>۴</sup> بیشتر مشاهده می‌شود.

هدف کلی کار حاضر، پیش‌بینی مهم‌ترین متغیرهای احتراقی از جمله زمان شروع احتراق، زمان ۵۰ درصد سوخت سوخته شده، و بازه احتراق یک موتور RCCI دوسوخته با سوخت هپتان نرمال و متان است. واضح است که برای نیل به هدف کلی فوق، بایستی مراحل بدین شرح مدنظر قرار گیرند:

- ارائه الگویی CFD مناسب و دقیق برای شبیه‌سازی عملکرد موتورهای RCCI و تعیین مقدار سوخت تخیل شده در نواحی مختلف محفظه احتراق به عنوان ورودی الگوی چندمنطقه‌ای.
- ارائه الگویی چندمنطقه‌ای مناسب و دقیق برای شبیه‌سازی عملکرد موتورهای RCCI با استفاده از نتایج بدست آمده از الگوی CFD.
- ارائه الگوهای پایه فیزیکی برای پیش‌بینی متغیرهای احتراقی موتور RCCI از جمله زمان شروع احتراق، زمان ۵۰ درصد سوخت سوخته شده، و بازه احتراق.

## ۲- شبیه‌سازی

به منظور توسعه الگوهای پیش‌بینی کننده شروع احتراق (SOC)، زمان ۵۰ درصد سوخت سوخته شده (CA50) و بازه احتراق (BD) یک موتور RCCI دوسوخته با سوخت هپتان نرمال و متان، توسعه الگوی احتراقی چندمنطقه‌ای ضرورت می‌یابد که در ذیل به توصیف آن پرداخته می‌شود.

<sup>۱</sup> Computational fluid dynamic

<sup>۲</sup> Part load condition

<sup>۱</sup> Reactivity controlled compression ignition

<sup>۲</sup> Multi zone Model

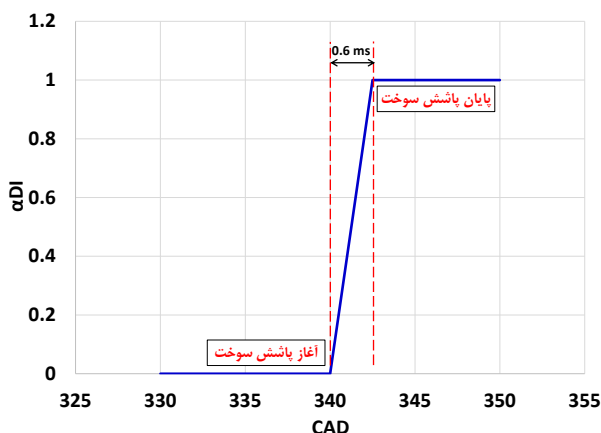
## ۱-۲- الگوی چند منطقه‌ای

پس می‌توان با معلوم بودن ضرایب A، B، C و D با اعمال ورودی‌های اشاره شده، زاویه میل لنگ برای SOC را تعیین کرد. در واقع، توسعه الگوی MKIM را می‌توان در تعیین و بهینه‌سازی این ضرایب خلاصه کرد. برای حل این انتگرال و تعیین و بهینه‌سازی ضرایب A، B، C و D، نیاز به طیف گسترده‌ای از داده‌های تجربی لازم بنظر می‌رسد که زمان شروع احتراق آن‌ها نیز مشخص باشد. چرا که در این مرحله نیاز است با معلوم بودن  $\theta_{soc}$ ،  $\theta_{ivc}$ ،  $\phi$ ،  $N$ ،  $P_{ivc}$ ،  $T_{ivc}$ ،  $V_{ivc}$ ،  $K_c$  و  $EGR$  مجهولات رابطه MKIM، یعنی ضرایب A، B، C و D را محاسبه نمود.

در این مرحله با توجه به اینکه به داده‌های تجربی زیادی نیاز است ضروری است از روش جایگزین بهره جست که همان نتایج بدست آمده برای زمان شروع احتراق (SOC) و سایر خصوصیات احتراقی از الگوی ترموشیمیایی است. شایان ذکر است نتایج خروجی از الگوی ترموشیمیایی چندمنطقه‌ای برای متغیرهای احتراقی از دقیق خواهد بود.

## ۲-۳- الگوی پیش‌بینی کننده زمان شروع احتراق در موتور RCCI

برای بررسی و بدست آوردن زمان شروع احتراق در موتورهای RCCI، زمان پاشش سوخت با واکنش‌پذیری شدید و همچنین متغیری برای مشخص نمودن نوع و تأثیر سوخت‌ها باید در معادله اصلی لحاظ گردد. یکی از مزیت‌های موتورهای RCCI نسبت به HCCI اضافه شدن متغیر پاشش مستقیم سوخت با واکنش‌پذیری شدید به داخل محفظه احتراق است. بر خلاف موتورهای HCCI که بعد از بسته شدن دریچه هوا متغیری برای مهار زمان‌بندی احتراق وجود ندارد، موتورهای RCCI دارای یک متغیر مناسب برای مهار زمان شروع احتراق اند. به منظور لحاظ نمودن پاشش سوخت در معادله MKIM، ضریبی به نام  $\alpha_{DI}$  مطابق با شکل ۱ تعریف می‌شود.



شکل ۱: ضریب  $\alpha_{DI}$  برای لحاظ نمودن پاشش سوخت به داخل محفظه (برای حالت ۲۰ BTDC CA)

در کار حاضر، برای شبیه‌سازی چرخه بسته موتورهای RCCI، الگوی چندمنطقه‌ای توسعه یافته است. توضیح مربوط به الگو، فرضیات به کار رفته، معادلات حاکم و روش حل در مراجع [۸-۷] به صورت کامل اشاره و بررسی گردیده است.

## ۲-۲- الگوی پایه فیزیکی انتگرال کوبشی اصلاح شده

از داده‌های خروجی الگوی چندمنطقه‌ای توسعه داده شده که همان متغیرهای احتراقی است، برای بهینه‌سازی ضرایب در الگوی پیش‌بین استفاده خواهد گردید. خروجی‌های الگوی ترموشیمیایی را می‌توان متغیرهای احتراقی همچون زمان شروع احتراق، مدت احتراق، زاویه  $50\%$  آزادسازی انرژی و نیز متغیرهای عملکردی موتور تعیین کرد. معادله مربوط به الگوی انتگرال کوبشی اصلاح شده (از این پس به اختصار MKIM نامیده می‌شود) که عملاً با سه فرض پلی‌تروپیک بودن فرآیند تراکم، استفاده از نسبت هوا به سوخت<sup>۱</sup> بجای غلظت لحظه‌ای هوا (اکسیژن) و سوخت و اعمال تأثیر EGR، از معادله ۱ حاصل می‌شود که همان معادله معروف آرنیوس و کار لیونگوود و وو است، و عبارت است از [۹]:

$$\int_{\theta_{IVC}}^{\theta_{SOC}} \frac{\varphi^B}{AN \exp\left[\frac{C(P_{IVC}V_c^{K_c})^D}{T_{IVC}V_c^{K_c-1}}\right]} d\theta = 1 \quad (1)$$

که در آن  $\varphi$  نسبت هم ارزی (در حالت تک سوخته)، N سرعت موتور برحسب د.د.د.،  $P_{ivc}$  و  $T_{ivc}$  بترتیب فشار و دما در لحظه بسته شدن دریچه ورودی و برحسب کیلوپاسکال و کلونین،  $k_c$  ضریب پلی‌تروپیک فرآیند تراکم،  $V_{ivc}$  حجم محفظه احتراق در لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی،  $V(\theta)$  حجم محفظه احتراق در هر گام زمانی و EGR بازخورانی گازهای خروجی است. A، B، C و D نیز ضرایب ثابتی اند که برای استفاده از الگو باید تعیین گردند.  $V_c$  و A و  $V(\theta)$  بر طبق معادلات ۲ و ۳ عبارت است از [۹]:

$$V_c = \frac{V_{ivc}}{V(\theta)}, \quad A = f(EGR) \quad (2)$$

$$V(\theta) = V_{cl} + \frac{1}{2}V_{cl}(CR - 1) \left[ R + 1 - \cos\theta - \sqrt{R^2 - \sin^2\theta} \right] \quad (3)$$

CR نسبت تراکم،  $V_{cl}$  حجم لقی و R نسبت طول دسته سمبه به شعاع لنگ است. به زبان ساده‌تر، رابطه انتگرال کوبشی اصلاح شده نشان می‌دهد که با اعمال ورودی‌های ذکر شده و شروع از زاویه میل لنگ در لحظه IVC، زمانی که انتگرال تعریف شده برابر ۱ شود، آن زاویه بعنوان زاویه میل لنگ برای SOC تعیین می‌شود.

<sup>۱</sup> Air Fuel Ratio (AFR)

نرمال بترتیب با نام گذاری‌های  $\varphi_{methane}$  و  $\varphi_{nhept}$ ، شکل نهایی معادله MKIM برای استفاده در موتور RCCI بدین شکل است:

$$\Psi = \left[ \frac{C(P_{IVC} V_c^{Kc})^D}{\alpha_{DI} CN_{mix} + F} \right] / [T_{IVC} V_c^{Kc-1}] \quad (1-7)$$

$$\int_{\theta_{IVC}}^{\theta_{SOC}} \frac{\varphi_{methane}^B + (\alpha_{DI} \times \varphi_{nhept}^E)}{AN \exp[\Psi]} d\theta = 1 \quad (2-7)$$

برای مشخص شدن زمان شروع احتراق، شش ضریب مجهول A، B، C، D، E و F باید از طریق بهینه‌سازی با در نظر گرفتن شرایط کارکردی مختلف موتور تعیین گردند.

## ۲-۴- الگوی پیش‌بینی کننده CA50 و BD

همانطور که از معادله ۷ مشخص است، این الگو تنها قادر به پیش‌بینی زمان شروع احتراق است. برای پیش‌بینی سایر متغیرهای احتراقی از جمله CA50 و BD در وهله اول از تابع ویب استفاده می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌شود (معادلات ۸ تا ۱۰) [۱۱].

$$X_b(\theta) = 1 - \exp \left[ -A \left( \frac{\theta - \theta_{SOC}}{\theta_d} \right)^B \right] \quad (8)$$

$$\theta_d = C(1 + X_d)^D \varphi^E \quad (9)$$

$$X_d = EGR + \frac{X_r}{1 - X_r} \quad (10)$$

در این معادلات،  $X_b$  کسر جرمی مخلوط سوخته شده،  $\theta_{SOC}$  زاویه میل‌لنگ در لحظه شروع احتراق،  $\theta$  زاویه میل‌لنگ مربوط به کسر جرمی مخلوط سوخته شده،  $\varphi$  نسبت هم ارزی،  $X_r$  کسر جرمی گازهای باقی‌مانده از چرخه قبل، EGR بازخورانی گازهای خروجی و A، B، C، D و E ضرایب ثابتی اند که باید مقادیر آن‌ها برای استفاده از این تابع برای پیش‌بینی سایر متغیرهای احتراقی شامل CA50 و مدت زمان احتراق تعیین گردد. با توجه به اینکه در فرضیات حاکم بر الگوی ترموشیمیایی فرض بر این است که از چرخه اول و فقط با اعمال EGR، شبیه‌سازی انجام می‌گیرد.

بنابراین مقدار  $X_r$  برابر صفر خواهد بود و عملاً  $X_d$  همان مقدار EGR خواهد بود. واضح است که برای محاسبه CA50 کفایت  $X_b$  برابر ۰.۵ و برای محاسبه BD، فقط کفایت  $\theta_d$  محاسبه گردد. در واقع در تابع ویب برطبق معادله ۱۱ می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} X_b = 0.5 \rightarrow \theta = \theta(CA50) \\ BD = \theta_d = C(1 + X_d)^D \varphi^E \end{cases} \quad (11)$$

مدت زمان ۰.۶ میلی ثانیه، زمان شروع پاشش تا لحظه باز شدن کامل افشانه در آزمون‌های عملی است. همچنین، واکنش‌پذیری سوخت‌های یک موتور دو سوخته با عدد ستان<sup>۱</sup> مجموع دو سوخت مشخص می‌شود. عدد ستان مخلوط دو سوخت تابعی از نسبت هم ارزی دو سوخت بوده که در معادله ۴ نشان داده شده است [۱۰].

$$CN_{mix} = \frac{\left( FAR_{st,nhept} \varphi_{DI} CN_{nhept} + FAR_{st,methane} \varphi_{PFI} CN_{methane} \right)}{FAR_{st,nhept} \varphi_{DI} + FAR_{st,methane} \varphi_{PFI}} \quad (4)$$

که FAR نسبت سوخت به هوا، CN عدد ستان، زیرنویس mix نشان‌دهنده مخلوط سوخت هپتان نرمال و متان، st بیانگر حالت درست<sup>۲</sup>، methane سوخت متان، nhept سوخت هپتان نرمال، DI سوخت پاشش مستقیم و PFI بیانگر سوخت همگن اند. مطابق تحقیقات صورت گرفته، ثابت C در معادله ۱ را می‌توان به صورت انرژی فعال‌سازی مخلوط سوخت تقسیم بر ثابت جهانی گازها تعریف نمود، همچنین انرژی فعال‌سازی سوخت به عدد ستانی آن سوخت مطابق با معادله ۵ وابسته است [۱۰].

$$\text{Activation energy} \left( \frac{J}{\text{mole}} \right) \approx C = \frac{a}{CN_{mix} + b} \quad (5)$$

همچنین باید توجه داشت که در معادله ۴، عدد ستان سوخت متان برابر با صفر در نظر گرفته شده است. همچنین ضرایب a و b در معادله ۵ باید تعیین گردند. باید این نکته را در نظر گرفت که در صورت تغییر نوع سوخت‌ها، اعداد ستان مورد استفاده در معادله ۴ تغییر خواهند کرد. همچنین، در صورت استفاده از سوخت‌های دیگر و یا موتور با هندسه متفاوت، مقادیر تجربی متغیرهای احتراقی که با آن ضرایب بهینه خواهند گردید تغییر یافته و تغییر آنها مستقیماً بر روی ضرایب ثابت تأثیر خواهد گذاشت. برای محاسبه مقدار ضریب پلی‌تروپیک  $K_c$  برای معادله ۱ می‌توان از داده‌های خروجی الگوی ترموشیمیایی چندمنطقه‌ای استفاده کرد. بدین‌صورت که می‌توان تمامی متغیرهای  $V_{IVC}$ ،  $V_{SOC}$ ،  $P_{IVC}$  و  $P_{SOC}$  را که از الگوی ترموشیمیایی استحصال شده است، در معادله ۶ قرار داد.

$$\frac{P_{SOC}}{P_{IVC}} = \left( \frac{V_{IVC}}{V_{SOC}} \right)^{Kc} \quad (6)$$

در معادله ۶، فرایند تراکم داخل محفظه احتراق از لحظه IVC تا لحظه SOC، پلی‌تروپیک فرض شده است. با در نظر گرفتن تغییرات واکنش‌پذیری و ضریب  $\alpha$  تعریف شده و جایگزینی در معادله ۱ و جداسازی نسبت‌های هم ارزی با توجه به دو نوع سوخت متان و هپتان

<sup>۱</sup> Port fuel injection

<sup>۱</sup> Cetane number

<sup>۲</sup> Stoichiometric

۶- محاسبه  $\theta_{SOC}$  این بار با دانستن ضرایب معلوم A تا F برای هر حالت و مقایسه با مقدار اولیه.

ب) روند بدست آوردن ضرایب بهینه الگوی CA50 و BD به شکل خلاصه به صورت زیر است:

- مرحله اول و دوم دقیقاً همانند مرحله یک و دو قسمت قبل است.
- جمع آوری ورودی‌های الگوی CA50 برای حالت‌های کاری مختلف از جمله  $\varphi_{methane}$ ،  $\theta_{n-Hep\ tane}$ ،  $\theta_{SOC}$ ،  $V_{SOC}$ ،  $P_{IVC}$ ،  $T_{IVC}$ ،  $\theta_{CA50}$  و تشکیل معادله ۸ با استفاده از معادله ۱۲ برای هر حالت.
- حل همزمان معادلات برای تمامی حالات با استفاده از روش وراثت و بدست آوردن ضرایب مجهول A، B،  $a_1$  تا  $a_5$ .
- محاسبه  $\theta_{CA50}$  و  $\theta_d$  این بار با دانستن ضرایب معلوم برای هر حالت و مقایسه با مقدار اولیه.

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی

داده‌های تجربی مورد استفاده در مطالعه حاضر از فعالیت‌های آزمایشگاهی انجام یافته در دانشگاه آلبرتا کانادا حاصل شده است [۱۴]. موتور مورد استفاده در دانشگاه مزبور یک موتور تک استوانه CFR است که به یک لگام ترمز برقی<sup>۲</sup> متصل است. اهم ویژگی‌های موتور مورد استفاده در جدول ۱ ذکر شده است. موتور مورد استفاده می‌تواند با دو سرعت مختلف ۷۰۰ و ۸۰۰ د.د.د. مورد استفاده قرار بگیرد که در تحقیق بر روی ۷۰۰ د.د.د. به عنوان مبنا مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱: ویژگی‌های موتور مورد استفاده در آزمایش‌ها [۱۴]

Engine name	Waukesha		
Displacement (cm <sup>3</sup> )	612		
Bore (cm)	8.25		
Stroke (cm)	11.4		
IVO (aTDC)	10	EVO (aTDC)	500
IVC (aTDC)	214	EVC (aTDC)	15

روش و تجهیزات مورد استفاده در آزمون‌ها در مرجع [۱۴] بیان گردیده است.

## ۴- نتایج

### ۴-۱- صحنه‌گذاری نتایج MMZM

قابلیت الگوی چندمنطقه ای در پیش‌بینی عملکرد موتور RCCI، دقت الگو در پیش‌بینی فشار داخل محفظه، و نرخ آزادسازی حرارت و متغیرهای احتراقی، دقت الگو در پیش‌بینی آلاینده‌های خروجی از موتور به ویژه UHC، CO، و NOx بررسی و تأثیر تعداد مناطق تعیین شده بر نتایج در مرجع [۸] به شکل کامل بررسی گردیده است.

با توسعه برنامه مربوط به تابع ویب در نرم‌افزار متلب و با اعمال ورودی‌های  $\varphi$  و EGR و همچنین نتایج استخراج شده از الگوی ترموشیمیایی برای هر بیست حالت عملکردی مختلف و اتصال این برنامه به برنامه روش وراثت موجود در نرم‌افزار متلب، ضرایب A، B، C، D و E بهینه‌سازی شدند.

با تعیین مقادیر A، B، C، D و E برنامه مربوط به تابع ویب در محیط برنامه‌نویسی فترتن و متلب توسعه داده شد تا از آن برای پیش‌بینی CA50 و BD استفاده گردد. الگوی دیگر نیز مد نظر قرار گرفته است که در بخش بعدی توضیحات مبسوط ارائه شده است.

همچنین برای بدست آوردن بازه احتراق می‌توان از معادلات دقیق‌تر (۱۲) به همراه (۱۳) استفاده نمود. در تحقیق کنونی از این معادلات به عنوان معادله نهایی و مناسب برای تخمین بازه احتراق و CA50 استفاده گردیده است. با این توضیح، تابع دومی که در [۱۲] معرفی و در [۱۳] نیز استفاده شده، بررسی شده است. در حالت استفاده از معادله ۱۲ به جای معادله ۱۱ در معادله ۷ باید ضرایب A، B،  $a_1$  تا  $a_5$  از طریق بهینه‌سازی مشخص گردند.

$$\theta_d = a_1 a_2^{\varphi_{methane}} a_3^{\varphi_{nhept}} a_4^z a_5^{\theta_{SOC}} \quad (12)$$

$$Z = T_{IVC} \left( \frac{V_{IVC}}{V_{SOC}} \right)^{K_c - 1} \quad (13)$$

### ۲-۵- روند بهینه‌سازی الگوهای پیش‌بینی کننده

روند بدست آوردن ضرایب بهینه الگوی MKIM بهبود یافته به شکل خلاصه به صورت زیر است:

۱- جمع آوری ورودی‌های الگوی چندمنطقه‌ای اعتباردهی شده برای حالت‌های کارکردی مختلف موتور از جمله شار جرمی هپتان نرمال، شار جرمی هوا، شار جرمی متان، زمان پاشش سوخت، درصد بازخورانی گازهای خروجی، فشار در لحظه بسته شدن دریچه هوا، دور موتور، زاویه بسته شدن دریچه هوا و زاویه باز شدن دریچه دود.

۲- حل الگوی چندمنطقه‌ای برای هر حالت کارکردی و بدست آوردن مقادیر  $\theta_{SOC}$ ،  $\theta_{CA50}$  و  $\theta_{BD}$  با استفاده از تحلیل نمودار آزادسازی انرژی، بدست آوردن مقادیر  $P_{SOC}$ ،  $V_{SOC}$  و محاسبه  $K_c$  از معادله ۶

۳- جمع آوری ورودی‌های الگوی MKIM برای حالت‌های کارکردی مختلف از جمله  $\varphi_{methane}$ ،  $\theta_{n-Hep\ tane}$ ،  $CN_{mix}$ ،  $P_{SOC}$ ،  $V_{SOC}$ ،  $P_{IVC}$ ،  $\alpha_{DI}$  و تشکیل معادله انتگرالی ۷ برای هر حالت.

۴- حل همزمان معادلات MKIM برای تمامی حالات با استفاده از روش وراثت و بدست آوردن شش ضریب مجهول A، B، C، D، E و F.

۵- جداسازی تمامی آزمون‌های مورد استفاده در قسمت قبل بر حسب درصد EGR، ثابت فرض کردن ضرایب A، B، C، D، E و F و حل مجدد آزمون‌ها برای درصد‌های مشابه EGR و بدست آوردن منحنی تغییرات ضریب A.

<sup>۲</sup> Electric dynamometer

<sup>۱</sup> Cooperative Fuel Research

مورد از نتایج الگوی چندمنطقه‌ای (شامل درصد EGR از ۰ تا ۴۰ درصد) متغیرهای A, B, C, D, E و F از الگوی MKIM بهینه می‌گردند. در گام دوم، با اعمال جواب‌های دارای EGR یکسان (به پنج گروه دارای درصد EGR برابر با ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ تقسیم می‌گردند) در برنامه روش وراثت و با ثابت نگه داشتن ضرایب A, B, C, D, E و F ضریب A که در نسبت تراکم ثابت تابعی از EGR تعریف شده بود، برای این حالات تنظیم می‌گردد.

هدف اصلی در بهینه‌سازی، بدست آوردن ضرایب مناسب به عنوان تابعی از یک یا چند ورودی  $P_{IVC}$ ،  $T_{IVC}$ ،  $\phi$ ، و EGR% و N است. باید به این نکته توجه داشت که به دلیل افزایش دقت در معادله ۶ مقدار  $K_C$  متغیر در نظر گرفته شود (برای هر یک از ۷۰ حالت جداگانه محاسبه شده و به صورت یک ماتریس مجزا با پسوند mat به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است).

ذکر این نکته ضروریست که در صورت نیاز به ساده‌سازی می‌توان از مقدار متوسط این متغیر استفاده نمود. متغیرهای  $P_{IVC}$ ،  $T_{IVC}$ ،  $\phi$  و N به طور مستقیم در معادله ۷ وارد می‌شوند. بنابراین می‌توان براحتی این متغیرها را با اعمال اصلاحیه ذکر شده به عنوان ورودی به الگوی نهایی وارد کرد. تأثیر متغیر EGR را باید در یک یا چند ضریب مجهول A, B, C, D, E یا F اعمال کرد. برای دستیابی به الگوی پیش‌بینی کننده ساده و دقیق باید حساسیت خاصی را معطوف به نحوه بهینه‌سازی داشت.

بدین صورت که از ضرایب A, B, C, D, E و F ضریب یا ضرایبی را باید انتخاب کرد که در نهایت رفتار الگو را نسبت به متغیر درصد EGR به رفتار خطی نزدیک‌تر کند. به عبارت دیگر، در صورت تعیین کردن ضرایب A, B, C, D, E و F به صورت تابعی از متغیر درصد EGR، بدلیل اینکه این ضرایب به عنوان توان و یا در عبارت نمایی قرار دارند، رفتار الگوی نهایی را پیچیده‌تر می‌سازند.

بنابراین بهتر است راهکاری سنجیده شود که تأثیر متغیر درصد EGR فقط بر ضریب A اعمال گردد. بنابراین در ابتدا برای هر ۷۰ حالت مشخص شده، ضرایب بهینه شده و سپس با دسته‌بندی مقادیر EGR برای هر نسبت تراکم، ضریب A بهینه خواهد شد و در انتها از مقادیر بهینه شده به صورت تابعی بر حسب درصد EGR استفاده خواهد گردید. در ابتدا به ازای ۷۰ نتیجه حل عددی الگوی چندمنطقه‌ای و با اعمال برنامه روش وراثت و بدون دسته بندی نتایج بر حسب درصد EGR، ضرایب A تا F بهینه گردیده که در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: متغیرهای بهینه شده معادله MKIM برای پیش‌بینی زمان شروع احتراق

A	0.0334	D	-4.3868
B	0.0732	E	0.4588
C	717.9255	F	56.0194

## ۴-۲- پیش‌بینی متغیرهای احتراقی موتور RCCI با استفاده از الگوی توسعه یافته پایه فیزیکی

### ۴-۲-۱- پیش‌بینی زمان شروع احتراق (SOC)

معادله اصلاح شده MKIM (معادله ۷) شامل شش ضریب مجهول بوده که برای تعیین زمان شروع احتراق باید مشخص گردند. برای کمینه نمودن فاصله نتایج عددی (و یا تجربی) با نتایج حاصل از شبیه‌سازی ریاضی ضرایب مجهول الگوی MKIM باید بهینه‌سازی گردند. از آنجایی که، هدف اصلی این تحقیق، بهینه‌سازی عددی ضرایب مجهول است، از روش مرسوم روش وراثت توسعه یافته در متلب برای تعیین ضرایب استفاده خواهد شد. برای تعیین ضرایب، نیاز به طیف داده‌های وسیعی خواهد بود که به همین منظور از ۷۰ نمونه از نتایج شبیه‌سازی عددی به روش چندمنطقه‌ای استفاده خواهد شد. ۷۰ حالت بررسی شده در بازه آزمون‌های عملی صورت گرفته انتخاب شده‌اند. بعد از بهینه‌سازی و تعیین ضرایب، نتایج بدست آمده برای زاویه شروع احتراق با ۷۰ مورد از نتایج عددی (که برای بهینه‌سازی استفاده گردیده بود) به علاوه ۲۵ مورد نتایج آزمون تجربی مقایسه خواهد گردید. شرایط کاری مورد استفاده برای بدست آوردن متغیرهای مجهول الگوهای MKIM و آهنگ سوختن در جدول ۲ نشان داده شده است.

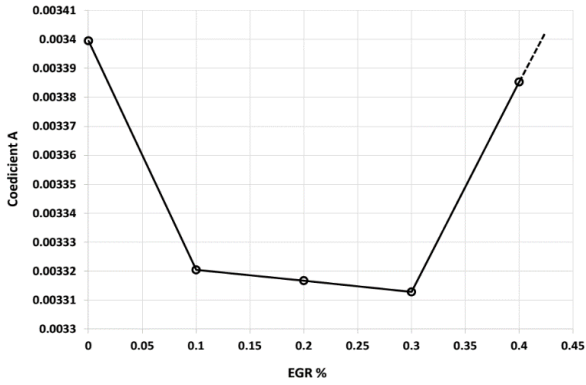
جدول ۲: شرایط کاری مورد استفاده برای بدست آوردن متغیرهای مجهول الگوهای MKIM و آهنگ سوختن

Operating parameters	Values
Methane mass flow rate (mg/s)	79 ~ 102
N-heptane mass flow rate (mg/s)	0.86 ~ 6.64
EGR (%)	0 - 10 - 20 - 30 - 40
Lambda	1.28 ~ 2.72
DI timing (bTDC)	25 - 20 - 15 - 10
Engine speed (rpm)	700
Intake temperature (K)	425 - 516
Intake pressure (kPa)	129.5 - 134.7

مقادیر  $\theta_{IVC}$ ،  $\phi_{methane}$ ،  $\phi_{n-hept}$ ،  $V_C$ ،  $T_{IVC}$ ،  $N$  و EGR برای هر حالت آزمایش، از نتایج آزمون تجربی در دسترس بدست آمده است. متغیر  $P_{IVC}$  با استفاده از منحنی فشار آزمون‌های عملی در هر حالت مشخص می‌شود.

همچنین، مقادیر  $P_{SOC}$ ،  $T_{SOC}$  و  $\theta_{SOC}$  برای هر حالت از نتایج حاصل از الگوی چندمنطقه‌ای بدست می‌آیند. با مشخص شدن فشار و دمای لحظه شروع احتراق، ضریب پلی‌تروپیک  $k_c$  نیز از معادله ۶ برای هر حالت محاسبه می‌شود.

معادله پلی‌تروپیک برای ارتباط مابین فشار لحظه شروع احتراق و فشار لحظه بسته شدن دریچه هوای ورودی است. در ابتدا، با استفاده از ۷۰

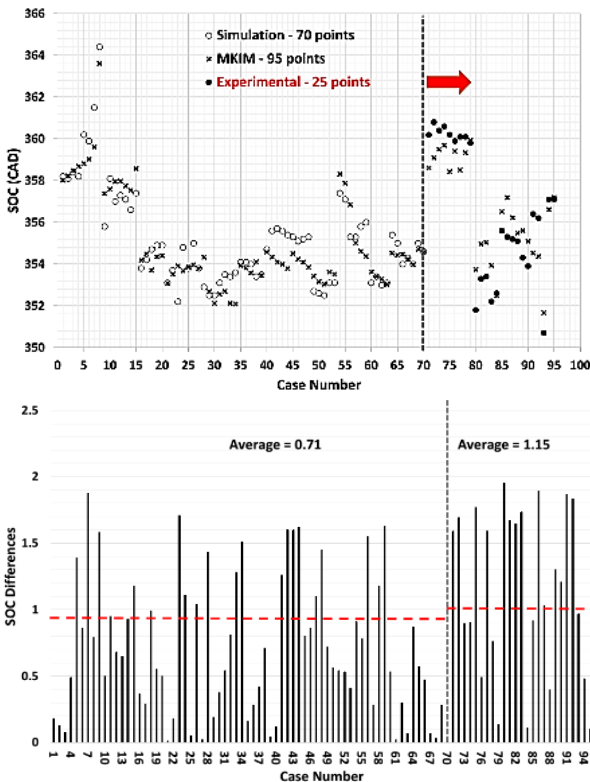


شکل ۳: تغییرات متغیر A بر حسب درصد EGR

جدول ۴: متغیرهای بهینه شده معادله MKIM برای پیش بینی زمان

شروع احتراق		
A	B	C
Figure 3	0.0732	717.9255
D	E	F
-4.3868	0.4588	56.0194

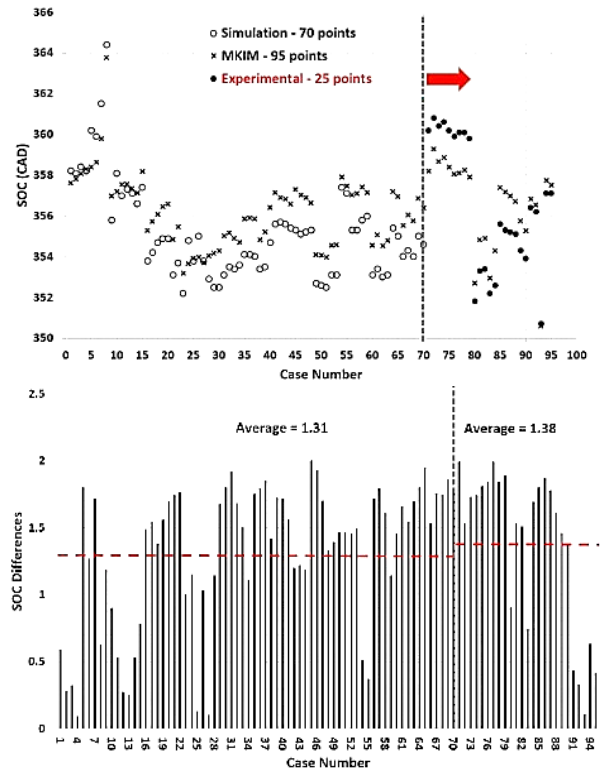
شکل ۴ نشان دهنده نتایج بدست آمده برای زمان شروع احتراق با استفاده از الگوی MKIM (معادله ۷) و مقایسه آن با مقادیر تجربی با استفاده از ضرایب جدول ۴ است. ۷۰ مورد اول با نتایج بدست آمده از الگوی چندمنطقه‌ای مقایسه گردیده و ۲۵ مورد بعدی با نتایج تجربی مقایسه شده است.



شکل ۴: مقایسه نتایج پیش بینی شده توسط الگوی MKIM و ۷۰ مورد از نتایج الگوی چندمنطقه‌ای و ۲۵ مورد از نتایج تجربی

جدول ۳ نشان دهنده ضرایب بدست آمده برای پیش بینی زمان شروع احتراق توسط الگوی MKIM (معادله ۷) بدون در نظر گرفتن تغییرات ضریب A (ثابت در نظر گرفتن ضریب A به ازای تمامی حالات EGR) است. زمان شروع احتراق در ۷۰ مورد اول با نتایج بدست آمده از الگوی چندمنطقه‌ای (که در بهینه سازی ضرایب استفاده گردیده) مقایسه شده و ۲۵ مورد بعدی با نتایج تجربی مقایسه گردیده است.

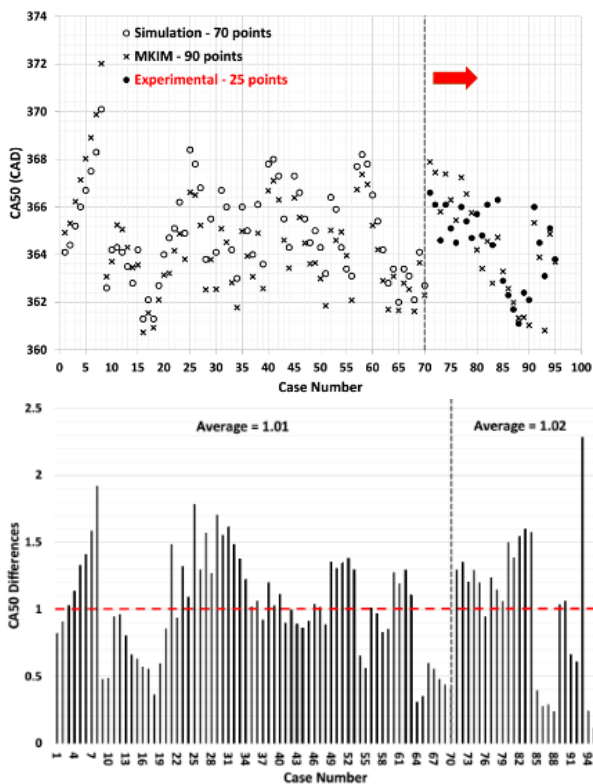
با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۲، الگوی مذکور با در نظر گرفتن مقدار ثابت برای ضریب A و بدون در نظر گرفتن تأثیر درصد EGR، قادر به پیش بینی زمان شروع احتراق با دقت نه چندان مناسبی است. متوسط اختلاف زمان شروع احتراق بدست آمده از الگوی MKIM با تعداد ۷۰ مورد از نتایج الگوی چندمنطقه‌ای برابر با ۱,۳۱ درجه میل لنگ و متوسط اختلاف نتایج بدست آمده با نتایج آزمون عملی برابر با ۱,۳۸ درجه میل لنگ است. همچنین، برای کلیه داده‌های مقایسه‌ای، الگوی مذکور می‌تواند با بیشینه ۲ درجه میل لنگ لحظه شروع احتراق را پیش بینی نماید. حال در این مرحله باید تغییرات ضریب A را بر حسب EGR مشخص و در محاسبه زمان شروع احتراق لحاظ نمود. به همین منظور، همانگونه که قبلاً اشاره شد، نتایج با مقدار EGR ثابت (بین ۰ تا ۴۰ درصد) را طبقه‌بندی نموده و با ثابت نگه داشتن ضرایب B تا F، ضریب A بر حسب درصد EGR محاسبه می‌شود.



شکل ۲: مقایسه نتایج پیش بینی شده توسط الگوی MKIM و ۷۰ مورد از نتایج الگوی چندمنطقه‌ای و ۲۵ مورد از نتایج تجربی

روند تغییرات ضریب A به ازای درصدهای مختلف EGR در شکل ۳ نشان داده شده است. مقادیر بهینه شده ضرایب مجهول معادله MKIM در جدول ۴ نشان داده شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده، متوسط اختلاف بازه احتراق بدست آمده از الگوی نرخ سوختن با تعداد ۷۰ مورد از نتایج الگوی چندمنطقه‌ای برابر با ۱,۱۱ درجه میل‌لنگ و متوسط اختلاف نتایج بدست آمده با نتایج آزمون عملی برابر با ۱,۲۹ درجه است. همچنین، برای کلیه داده‌های مقایسه‌ای، الگوی مذکور می‌تواند با بیشینه ۲,۲ درجه میل‌لنگ بازه احتراق را پیش‌بینی نماید. همچنین، شکل ۶ نشان‌دهنده نتایج پیش‌بینی شده CA50، اختلاف آن با داده‌های ورودی در مقایسه کلیه نتایج ورودی با خروجی الگو توسط الگوی CA50 (معادله ۸) و با استفاده از ضرایب جدول ۵ است.



شکل ۶: مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط الگوی CA50 و ۷۰ مورد از نتایج الگوی چندمنطقه‌ای و ۲۵ مورد از نتایج آزمون تجربی

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۶، الگوی مذکور با در نظر گرفتن ضرایب بهینه شده جدول ۵ قادر به پیش‌بینی زمان CA50 با تعداد ۷۰ مورد از نتایج الگوی چندمنطقه‌ای برابر با ۱,۰۱ درجه میل‌لنگ و متوسط اختلاف نتایج بدست آمده با نتایج آزمون عملی برابر با ۱,۰۲ درجه است.

همچنین، برای کلیه داده‌های مقایسه‌ای، الگوی مذکور می‌تواند با بیشینه ۲,۳ درجه میل‌لنگ بازه احتراق را پیش‌بینی نماید. جدول ۶ متوسط اختلاف نتایج پیش‌بینی متغیرهای احتراق برای هر سه الگوی فیزیکی مورد بررسی را نشان می‌دهد.

دقت الگوی مذکور با اعمال ضریب متغیر A افزایش می‌یابد به گونه‌ای که الگوی مذکور قادر به پیش‌بینی زمان شروع احتراق دقیق‌تر است. در این حالت، متوسط اختلاف با نتایج الگوی چندمنطقه‌ای برابر با ۰,۷۱ درجه میل‌لنگ و متوسط اختلاف با نتایج آزمون عملی برابر با ۱,۱۵ درجه است. همچنین، برای کلیه داده‌های مقایسه‌ای، الگوی مذکور می‌تواند با بیشینه ۲ درجه میل‌لنگ لحظه شروع احتراق را پیش‌بینی نماید.

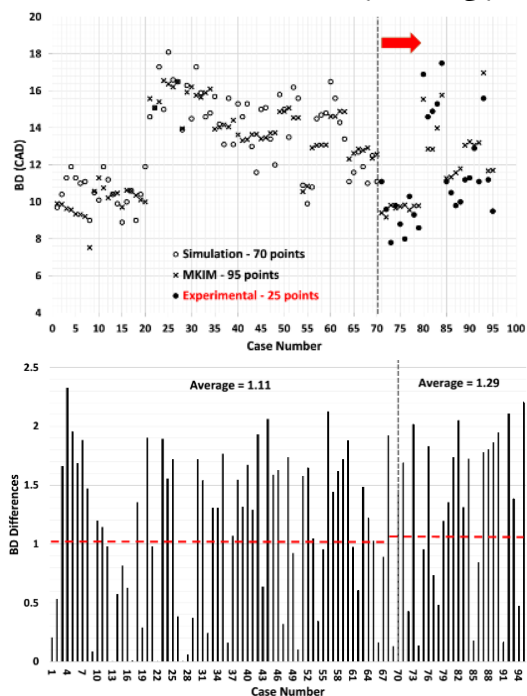
#### ۴-۲-۲- پیش‌بینی CA50 و بازه احتراق

مطابق تابع ویب، رفتار نمایی کسر جرمی سوخته شده (رابطه ۸) توانایی خوبی برای پیش‌بینی زمان CA50 دارد در حالی که معادله ۹ با ورودی‌های EGR% و نسبت هم ارزی نمی‌تواند به خوبی تغییرات را دنبال کند. به همین منظور، از معادلات ۱۲ و ۱۳ برای پیش‌بینی بازه احتراق و در نهایت CA50 استفاده خواهد شد. مقادیر بهینه شده ضرایب مجهول معادله همزمان CA50 و بازه احتراق در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵: متغیرهای بهینه شده معادله CA50 و بازه احتراق

A	B	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>
-7.6782	8.8280	812656.5026	3.7404
a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	
0.0015	0.9975	0.9754	

شکل ۵ نشان‌دهنده نتایج پیش‌بینی شده بازه احتراق و اختلاف آن با داده‌های ورودی و مقایسه کلیه نتایج ورودی با خروجی الگو توسط الگوی BD و با استفاده از ضرایب جدول ۵ است. ۷۰ مورد اول با نتایج بدست آمده از الگوی چندمنطقه‌ای مقایسه گردیده و ۲۵ مورد بعدی با نتایج تجربی مقایسه گردیده است.



شکل ۵: مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط الگوی BD و ۷۰ مورد از نتایج الگوی چندمنطقه‌ای و ۲۵ مورد از نتایج آزمون تجربی

## فهرست علائم

RCCI	Reactivity controlled Compression Ignition
PCCI	Premixed Charge Compression Ignition
BD	Burn duration
SOC	Start of combustion
SOI	Start of injection
CA50	50% of fuel burned
CFD	Computational fluid dynamics
MMZM	Modified multi zone model
EGR	Exhaust gas recirculation (Mass base)
EVC	Exhaust valve closing angle (Degree)
EVO	Exhaust valve opening angle (Degree)
IVC	Inlet valve closing angle (Degree)
IVO	Inlet valve opening angle (Degree)
K	Thermal conductivity (Jm/s. K)
L	Length of combustion chamber (volume/cylinder head area) (m)
P	Pressure (Pa)
RC	Connecting road length (m)
rpm	Engine speed (revolution per minutes)
S	Stroke (m)
T	Temperature (K)
t	Time (s)
TDC	Top dead center (Degree)
V	Volume (m3)

## مراجع

- [1] Reitz, R.D. and G. Duraisamy, Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015. 46: p. 12-71.
- [2] Egüz, U., et al., Predicting auto-ignition characteristics of RCCI combustion using a multi-zone model. *International Journal of Automotive Technology*, 2013. 14(5): p. 693-699.
- [3] Nazemi, M. and M. Shahbakhti, Modeling and analysis of fuel injection parameters for combustion and performance of an RCCI engine. *Applied Energy*, 2016. 165: p. 135-150.
- [4] Mikulski, M. and C. Bekdemir, Understanding the role of low reactivity fuel stratification in a dual fuel RCCI engine – A simulation study. *Applied Energy*, 2017. 191: p. 689-708.
- [5] Mikulski, M. and P. Bekdemir, Experimental Validation of a Combustion Kinetics Based Multi-Zone Model for Natural Gas-Diesel RCCI Engines. *Symposium for combustion control Aachen*, 2016.

## جدول ۶: متوسط اختلاف با نتایج آزمون عملی و الگوی چندمنطقه‌ای

		متوسط	متوسط
		اختلاف با	نتایج آزمون
		چندمنطقه‌ای	عملی
	ضریب A ثابت	۱,۳۱	۱,۳۸
	متغیر SOC	۰,۷۱	۱,۱۵
	ضریب A متغیر		
	متغیر BD	۱,۱۱	۱,۲۹
	متغیر CA50	۱,۰۱	۱,۰۲

## ۵- نتیجه گیری

در کار حاضر، برنامه چندمنطقه‌ای بهبود یافته برای شبیه‌سازی احتراق RCCI توسعه یافته است. از تابع بدست آمده از شبیه‌سازی CFD برای توزیع سوخت هپتان نرمال به عنوان ورودی برنامه چندمنطقه‌ای استفاده گردیده است.

در ادامه، با استفاده از داده‌های بدست آمده از الگوی چندمنطقه‌ای، ضرایب مجهول الگوی پیش‌بینی انتگرال کوبشی اصلاح شده و سپس الگوی ۵۰ درصد سوخت سوخته شده و الگوی بازه احتراق توسط روش وراثت تعیین و بهینه گردیده و با نتایج خروجی از الگوی چندمنطقه‌ای و ۲۵ مورد از نتایج آزمون عملی مقایسه گردیده است. از اهم نتایج حاصل از این کار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- الگوی چندمنطقه‌ای توسعه یافته دارای دقت مطلوبی در شبیه‌سازی عملکرد موتور RCCI می‌باشد.
- الگوی انتگرال کوبشی بهبود یافته (برای حالت دو سوخته) دارای دقت قابل قبولی در پیش‌بینی متغیرهای احتراقی است، به گونه‌ای که میانگین خطای داده‌های پیش‌بینی شده در حالت بهینه (متغیر فرض نمودن متغیر A به ازای EGR های مختلف) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده توسط الگوی چندمنطقه‌ای و یا مقادیر تجربی برابر با ۰,۷۱ درجه میل‌لنگ است.
- الگوی تابع ویب بهبود یافته (برای حالت دو سوخته) دارای دقت قابل قبولی در پیش‌بینی CA50 است، به گونه‌ای که میانگین خطای داده‌های پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده توسط الگوی چندمنطقه‌ای و یا مقادیر تجربی برابر با ۱,۱۱ درجه میل‌لنگ است.
- الگوی بازه احتراق (برای حالت دو سوخته) دارای دقت قابل قبولی در پیش‌بینی BD است، به گونه‌ای که میانگین خطای داده‌های پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده توسط الگوی چندمنطقه‌ای و یا مقادیر تجربی برابر با ۱,۰۱ درجه میل‌لنگ است.

- [10] Sadabadi, K.K. and M. Shahbakhti. Dynamic Modelling and Controller Design of Combustion Phasing for an RCCI Engine. in ASME 2016 Dynamic Systems and Control Conference. 2016. American Society of Mechanical Engineers.
- [11] Shahbakhti, M. and C.R. Koch, Dynamic modeling of HCCI combustion timing in transient fueling operation. SAE International Journal of Engines, 2009. 2(1): p. 1098-1113.
- [12] Bettis, J.B., Thermodynamic based modeling for nonlinear control of combustion phasing in HCCI engines. Missouri University of Science and Technology, Masters thesis, 2010.
- [13] Ebrahimi, K., C. Koch, and A. Schramm, A control oriented model with variable valve timing for HCCI combustion timing control. No. 2013-01-0588. SAE Technical Paper, 2013.
- [14] Handford, D. and M. Checkel, Extending the load range of a natural gas HCCI engine using direct injected pilot charge and external EGR. No. 2009-01-1884. SAE Technical Paper, 2009.
- [6] Mikulski, M., S. Ramesh, and C.J.E. Bekdemir, Reactivity Controlled Compression Ignition for Clean and Efficient Ship Propulsion. 2019. Energy, 2019. 182: p. 1173-1192.
- [7] Neshat, E. and R.K.J.E. Saray, Development of a new multi zone model for prediction of HCCI (homogenous charge compression ignition) engine combustion, performance and emission characteristics. 2014. 73: p. 325-339.
- [8] Lashkarpour, S.M., R.K. Saray, and M.J.E. Najafi, Multi-zone model for reactivity controlled compression ignition engine based on CFD approach. 2018. 156: p. 213-228.
- [9] Swan, K., M. Shahbakhti, and C.R. Koch, Predicting start of combustion using a modified knock integral method for an HCCI engine. 2006, SAE Transactions, pp.611-620.



# The Journal of Engine Research

Journal Homepage: [www.engineersearch.ir](http://www.engineersearch.ir)



## Development of a predictive Model for start of combustion of a reactivity-controlled compression ignition engine

S. M. Lashkarpour<sup>1</sup>, R. Khoshbakhti Saray<sup>2\*</sup>, M. Najafi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanics, Electrical Power and Computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, [Lashkarpour@gmail.com](mailto:Lashkarpour@gmail.com)

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand New Town, Tabriz, Iran, [khoshbakhti@sut.ac.ir](mailto:khoshbakhti@sut.ac.ir)

<sup>3</sup> Department of Mechanics, Electrical Power and Computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, [najafi@srbiau.ac.ir](mailto:najafi@srbiau.ac.ir)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 15 January 2021

Accepted: 22 January 2021

#### Keywords:

RCCI (Reactivity controlled compression ignition) engine

CFD

(computational fluid dynamics)

MMZM

(modified multi zone model)

MKIM

(modified knock integral model)

Genetic Algorithm

### ABSTRACT

A modified multi zone model (MMZM) is developed for RCCI<sup>1</sup> engines simulation. The CFD model is used to predict the evaporated n-heptane stratification to introduce as input to the MMZM to predict the SOC (start of combustion) and CA50 with sufficient accuracy. In the next step, a physic-base model is developed for SOC prediction and parameterized with 70 multi-zone results and validated using the same results and extra 25 experimental data. The model prediction average error for 95 steady-state operating conditions is below 1.2 CAD. Also, a modified fuel burn rate model is developed for predicting 50% of fuel mass burn and burn duration. Predicted results are in good agreement with all multi-zone results and operating conditions in prediction of both CA50 and burn duration. The MMZM can predict CA50 and burn duration with acceptable accuracy as the average error are about 1 CAD and 1.2 CAD.



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

<sup>1</sup> Reactivity controlled compression ignition