**توسعه مدل پيش­بيني کننده زمان شروع احتراق در موتور اشتعال تراکمي کنترل شونده**

**واکنشي**

سيد مهدي لشکرپور1، رحیم خوشبختی سرای2\*، محمد نجفی3

|  |  |
| --- | --- |
| 1دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران | Lashkarpour@gmail.com |
| 2\*استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، شهر جدید سهند، تبریز، ایران | khoshbakhti@sut.ac.ir |
| 3دانشیار، دانشکده مکانیک برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران | najafi@srbiau.ac.ir |

**چکیده**

در اين تحقیق، یک کد چندمنطقه اي بهبود یافته براي مدل سازي احتراق موتور اشتعال تراکمي کنترل شونده واکنشي توسعه يافته است. از تابع بدست آمده از مدل­سازی دینامیک سیالات محاسباتی براي توزيع سوخت هپتان نرمال به عنوان ورودي کد چندمنطقه اي استفاده و صحه گذاری گرديده است. بعد از صحه گذاری نتایج و با استفاده از داده­هاي بدست آمده از مدل چندمنطقه­اي، ضرايب مجهول مدل انتگرال کوبشي اصلاح شده و سپس مدل50 درصد سوخت سوخته شده و مدل بازه احتراق توسط الگوريتم ژنتيک تعيين و بهينه گرديده و با 70 مورد از نتايج خروجي مدل چندمنطقه اي و 25 مورد از نتايج آزمون عملي مقايسه گرديده است. نتايج نشان دهنده بيشينه خطاي 2/1 درجه ميل­لنگ براي پيش بيني زمان شروع احتراق مي باشد. همچنين، دو مدل دیگر پارامترهاي 50 درصد سوخت سوخته شده و بازه احتراق را به ترتيب با خطاهاي متوسط 1 و 2/1 درجه ميل لنگ پيش­بيني مي­نمایند.

**کلمات کلیدی:** موتور اشتعال تراكمي کنترل شونده واکنشي، ديناميک سيالات محاسباتي، مدل چندمنطقه اي، مدل انتگرال کوبشي اصلاح شده، الگوريتم ژنتيک.

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

**S. Mehdi Lashkarpour1, Rahim Khoshbakhti Saray2\*, Mohammad Najafi3**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1 Department of Mechanics, Electrical Power and Computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran | Lashkarpour@gmail.com |  |
| 2\* Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand New Town, Tabriz, Iran | khoshbakhti@sut.ac.ir |  |
| 3 Department of Mechanics, Electrical Power and Computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran | najafi@srbiau.ac.ir |  |

**Abstract**

A MMZM (modified multi zone model) is developed for RCCI[[1]](#footnote-2) 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.

Keywords: RCCI (Reactivity controlled compression ignition) engine, CFD (computational fluid dynamics), MMZM (modified multi zone model), MKIM (modified knock integral model), genetic algorithm.

# مقدمه

RCCI فناوری احتراق يک موتور دو سوخته مي­باشد که از ترکيب سوخت در داخل محفظه احتراق بهره برده و حداقل داراي دو سوخت با واکنش­پذيري­هاي متفاوت بوده و مي­تواند از پاشش چند­مرحله اي براي کنترل ميزان واکنش­پذيري سوخت، زمان شروع و شدت احتراق استفاده نماید. در اين نوع احتراق، سوخت با واکنش­پذيري پايين به همراه هوا به داخل محفظه احتراق هدايت مي­گردد. اين سوخت مي­تواند در راهگاه ورودي توسط انژکتور پاشيده شده و قبل از باز شدن سوپاپ هوا با هوا ترکيب گردد. سوخت داراي واکنش­پذيري بالا قبل از احتراق سوخت پيش­آميخته توسط پاشش يک يا چند­مرحله­اي به داخل محفظه احتراق وارد مي­گردد. مفهوم RCCI کنترل احتراق بهتري را نسبت به موتورهاي HCCI دو سوخته و PCCI ارائه مي­دهد. همچنين، با استفاده از اين فناوری احتراقی، بازده حرارتي موتور تا حدود 60% افزايش پيدا مي­کند ]1[. اگوز و همکارانش در سال 2013، جهت مدلسازي موتور دوسوخته در حالت کارکرد RCCI و همچنين بدست آوردن پارامترهاي شروع احتراق و نرخ آزاد سازي انرژي از يک مدل چندمنطقه اي[[2]](#footnote-3) به نام XCCI استفاده نموده اند ]2[. در اين تحقيق یک مدل 10 منطقه­اي توسعه داده شده است و از سينتيک شيميايي براي اکسیداسیون ترکيب سوخت ديزل و بنزين (ايزو اکتان به عنوان نماينده سوخت بنزين و هپتان نرمال به عنوان نماينده سوخت ديزل) استفاده شده است که داراي 137 گونه و 633 واکنش شيميايي مي­باشد. به منظور مدل­سازي پاشش سوخت و بدست آوردن توزيع سوخت در هر يک از مناطق، از مدل­سازي CFD[[3]](#footnote-4) استفاده گرديده است. در ادامه، توزيع سوخت بدست آمده توسط نرم افزار CFD، به هر يک از مناطق مدل چندمنطقه اي اعمال مي­گردد. تحقيق صورت پذيرفته نشان دهنده قابليت بالاي مدل چندمنطقه اي در مدل­سازي زمان شروع احتراق و نرخ آزادسازي انرژي احتراق RCCI مي باشد. ناظمي و همکارانش ]3[، تحقيقاتي بر روي فرايندهاي احتراقي يک موتور RCCI نمونه انجام داده­اند. در اين تحقيق، يک مدل ديناميک سيالات محاسباتي به همراه مکانيزم سينتيک شيميايي با استفاده از نرم­افزار Converge توسعه داده شده است و نتايج توسط مقادير بدست آمده از آزمون عملي صحه­گذاري شده است. بعد از اطمينان از صحت نتايج بدست آمده توسط مدل مذکور، پارامترهاي احتراقي همانند زمان شروع احتراق و زمان 50 درصد سوخت سوخته شده به همراه مقادير آلايندگي براي حالت­هاي مختلف استخراج شده است. همچنين، در اين تحقيق پارامترهاي مهمي همانند زمان شروع احتراق، فشار پاشش و زواياي نازل انژکتور تغيير داده شده و تاثير آن بر روي احتراق و آلايندگي مورد بررسي قرار گرفته است. در اين تحقيق نشان داده شده است که کاهش فشار پاشش سوخت با واکنش­پذیری بالا می­تواند افزايش فشار داخل محفظه را محدود کرده و همچنین بصورت همزمان آوانس پاشش سوخت با واکنش­پذیری بالا به داخل محفظه مي­تواند موجب کاهش چشمگير آلاينده­هاي کربن مونواکسيد و هيدروکربن­هاي نسوخته گردد. همچنين، براي بازه عملکردي موتور بهترين زاويه پاشش و زاويه سوراخ­هاي نازل و فشار پاشش بهينه­سازي گرديده است. ميکولسکي و همکارانش ]6-4[، مدل چندمنطقه اي براي پيش بيني پارامترهاي احتراقي و آلايندگي يک موتور RCCI را ارائه داده اند. در مدل مذکور، سوخت متان به عنوان سوختي با ميزان واکنش پذيري کم در نظر گرفته شده است. اين مدل همان مدل مورد استفاده توسط اگوز مي­باشد که با XCCI نام گذاري گرديده است. با بررسي هاي صورت گرفته مشخص مي­شود که با افزايش گراديان ميزان سوخت نسوخته در مناطق محاسباتی تقسیم بندی شده در داخل محفظه احتراق به نسبت ميزان سوخت متان موجود، بازده حرارتي افزايش و ميزان آلاينده کربن­مونواکسيد کاهش پيدا مي­کند. تاثير اين بهبود در شرايط کارکردی موتور با بار کم[[4]](#footnote-5) بيشتر مشاهده مي­شود.

هدف کلي کار حاضر، پيش‌بيني مهمترين پارامترهاي احتراقي از جمله زمان شروع احتراق، زمان 50 درصد سوخت سوخته شده، و بازه احتراق يک موتور RCCI دوسوخته با سوخت هپتان نرمال و متان مي­باشد. واضح است که براي نيل به هدف کلي فوق، بايستی مراحل زیر در انجام این کار مدنظر قرار گیرند:

* ارائه يک مدل CFD مناسب و دقيق جهت شبيه‌سازي عملکرد موتورهاي RCCI و تعيين ميزان سوخت تبخير شده در نواحي مختلف محفظه احتراق به عنوان ورودي مدل چند منطقه‌اي.
* ارائه يک مدل چند منطقه‌اي مناسب و دقيق جهت شبيه سازي عملکرد موتورهاي RCCI با استفاده از نتايج بدست آمده از مدل CFD.
* ارائه مدل هاي پايه فيزيکي براي پيش بيني پارامترهاي احتراقي موتور RCCI از جمله زمان شروع احتراق، زمان50 درصد سوخت سوخته شده، و بازه احتراق.

# مدل‌سازی

به منظور توسعه مدل­های پیش­بینی کننده شروع احتراق (SOC)، زمان 50 درصد سوخت سوخته شده (CA50) و بازه احتراق (BD) يک موتور RCCI دوسوخته با سوخت هپتان نرمال و متان، توسعه مدل احتراقی چندمنطقه­ای ضرورت می­یابد که در ذیل به توصیف آن پرداخته می­شود.

## مدل چند منطقه‌ای

در کار حاضر، براي شبيه­سازي چرخه بسته موتورهاي RCCI، يک مدل چندمنطقه­اي توسعه يافته است. توضیح مربوط به مدل، فرضيات به کار رفته، معادلات حاکم و روش حل در مراجع ]7[ و ]8[ به صورت کامل اشاره و بررسی گردیده است.

## مدل پايه فيزيکي انتگرال کوبشي اصلاح شده

از داده­هاي خروجي مدل چندمنطقه ای توسعه داده شده که همان پارامترهاي احتراقي مي­باشد، جهت بهينه سازي ضرايب در مدل پیش­بین استفاده خواهد گرديد. خروجي­هاي مدل ترموشيميايي را مي­توان پارامترهاي احتراقي همچون زمان شروع احتراق، مدت احتراق، زاويه 50% آزادسازي انرژی و نيز پارامترهاي عملکردي موتور تعيين کرد. رابطه­ي مربوط به مدل انتگرال کوبشي اصلاح شده (از اين پس به اختصار MKIM ناميده مي شود) که­ عملاً با سه فرض پلي­تروپيک بودن فرآيند تراکم، استفاده از نسبت هوا به سوخت[[5]](#footnote-6) بجاي غلظت لحظه­اي هوا (اکسيژن) و سوخت و اعمال تأثير EGR، از رابطه 1 حاصل مي­شود که همان رابطه معروف آرنيوس و کار ليونگوود و وُو مي باشد، و عبارت است از ]9[:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

که درآن  نسبت هم ارزي (در حالت تک سوخته)، N سرعت موتور برحسب دور در دقيقه،  و  بترتيب فشار و دما در لحظه بسته شدن سوپاپ ورودي و برحسب کيلوپاسکال و کلوين،  ضريب پلي­تروپيک فرايند تراکم،  حجم محفظه­ي احتراق در لحظه بسته شدن سوپاپ ورودي،  حجم محفظه احتراق در هر گام زماني و EGR بازخوراني گازهاي خروجي مي­باشد. B، C وD نيز ضرايب ثابتي مي­باشند که براي استفاده از مدل مي­بايست تعيين گردند. و A و بر طبق روابط 2 و 3 عبارت است از ]9[:

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |
| (3) |  |

CR نسبت تراکم، حجم لقي و R نسبت طول دسته پيستون به شعاع لنگ مي‌باشد. به زبان ساده­تر، رابطه­ي انتگرال کوبشي اصلاح شده نشان مي­دهد که با اعمال ورودي­هاي ذکر شده و شروع از زاويه ميل‌لنگ در لحظه IVC، زماني­که انتگرال تعريف شده برابر 0/1 شود، آن زاويه بعنوان زاويه ميل‌لنگ براي SOC تعيين مي­گردد. پس مي‌توان با معلوم بودن ضرايب A، B، C و D با اِعمال ورودي­هاي اشاره شده، زاويه ميل­لنگ براي SOC را تعيين کرد. در واقع، توسعه­ي مدل MKIM را مي‌توان در تعيين و بهينه‌سازي اين ضرايب خلاصه کرد. براي حل اين انتگرال و تعيين و بهينه‌سازي ضرايب A، B، C و D، نياز به طيف گسترده­اي از داده­هاي تجربي لازم بنظر مي­رسد که زمان شروع احتراق آن‌ها نيز مشخص باشد. چرا که در اين مرحله نياز است با معلوم بودن ، ، ، ، ، ، ،  و  مجهولات رابطه­ي MKIM، يعني ضرايب A، B، C و D را محاسبه نمود. در اين مرحله با توجه به اينکه به داده­هاي تجربي زيادي نياز مي­باشد ضروري است از روش جايگزين بهره جُست که همان نتايج بدست آمده براي زمان شروع احتراق (SOC) و ساير خصوصيات احتراقي از مدل ترموشيميايي مي­باشد. شايان ذکر است نتايج خروجي از مدل ترموشيميايي چندمنطقه­اي براي پارامترهاي احتراقي از دقت بالايي برخوردار خواهد بود.

**مدل پيش بيني کننده زمان شروع احتراق در موتور RCCI**

براي بررسي و بدست آوردن زمان شروع احتراق در موتورهاي RCCI، زمان پاشش سوخت با واکنش­پذيري بالا و همچنين پارامتري براي مشخص نمودن نوع و تاثير سوخت ها بايد در معادله اصلي لحاظ گردد. يکي از مزيت هاي موتورهاي RCCI نسبت به HCCI اضافه شدن پارامتر کنترلي پاشش مستقيم سوخت با واکنش­پذيري بالا به داخل محفظه احتراق مي­باشد. بر خلاف موتورهاي HCCI که بعد از بسته شدن سوپاپ هوا پارامتري براي کنترل زمان­بندي احتراق وجود ندارد، موتورهاي RCCI داراي يک پارامتر مناسب براي کنترل زمان شروع احترق مي­باشند. به منظور لحاظ نمودن پاشش سوخت در معادله MKIM، ضريبي به نام  مطابق با شکل 2 تعريف مي­­گردد.

|  |
| --- |
|  |
| شكل 2: ضريب جهت لحاظ نمودن پاشش سوخت به داخل محفظه ( براي حالت 20 CA BTDC) |

مدت زمان 6/0 ميلي ثانيه، زمان شروع پاشش تا لحظه باز شدن کامل انژکتور در آزمون­هاي عملي مي­باشد. همچنين، واکنش­پذيري سوخت­هاي يک موتور دو سوخته با عدد ستان[[6]](#footnote-7) مجموع دو سوخت مشخص مي­گردد. عدد ستان مخلوط دو سوخت تابعي از نسبت هم ارزي دو سوخت بوده که در معادله 4 نشان داده شده است ]10[.

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

در معادله 4، FAR نسبت سوخت به هوا، CN عدد ستان، انديس mix نشان دهنده مخلوط سوخت هپتان نرمال و متان، st بيانگر حالت استوکيومتريک، methane سوخت متان، n-hept سوخت هپتان نرمال، DI سوخت پاشش مستقيم و PFI[[7]](#footnote-8) بيانگر سوخت همگن مي­باشند. مطابق تحقيقات صورت گرفته، ثابت *C* در معادله 1 را مي­توان به صورت انرژي اکتيواسيون مخلوط سوخت تقسيم بر ثابت جهاني گازها تعريف نمود، همچنين انرژي اکتيواسيون سوخت به عدد ستاني آن سوخت مطابق با معادله 5 وابسته مي­باشد ]10[.

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |

همچنين بايد توجه داشت که در معادله 4، عدد ستان سوخت متان برابر با صفر در نظر گرفته شده است. همچنين ضرايب a و b در معادله 5 مي بايست تعيين گردند. باید این نکته را در نظر گرفت که در صورت تغییر نوع سوخت ها، اعداد ستان مورد استفاده در معادله 4 تغییر خواهند کرد. همچنین، در صورت استفاده از سوخت­های دیگر و یا موتور با هندسه متفاوت، مقادیر تجربی پارامترهای احتراقی که با آن ضرایب بهینه خواهند گردید تغییر یافته و تغییر آنها مستقیما بر روی ضرایب ثابت تاثیر خواهد گذاشت. براي محاسبه مقدار ضريب پلي تروپيک مربوط به معادله 1 مي­توان از داده­هاي خروجي مدل ترموشيميايي چندمنطقه­اي استفاده کرد. بدين­صورت که مي­توان تمامي پارامترهاي ، ، و را که از مدل ترموشيميايي استحصال شده است، در معادله 6 قرار داد.

|  |  |
| --- | --- |
| (6) |  |

در معادله 6، فرايند تراکم داخل محفظه احتراق از لحظه IVC تا لحظه SOC، پلي­تروپيک فرض شده است. با در نظر گرفتن گراديان واکنش­پذيري و ضريب α تعريف شده و جايگزيني در معادله 1 و جداسازي نسبت هاي هم ارزي با توجه به دو نوع سوخت متان و هپتان نرمال به ترتيب با نام گذاري هاي  و ، فرم نهايي معادله MKIM براي استفاده در موتور RCCI به شکل زير مي­باشد (معادله 7).

|  |  |
| --- | --- |
| (7) |  |

جهت مشخص شدن زمان شروع احتراق، شش ضريب مجهول A، B، C، D، E و F مي­بايست از طریق بهينه­سازي با در نظر گرفتن شرایط کارکردی مختلف موتور تعيين گردند.

**مدل پیش‌بینی کننده CA50 و BD**

همانطور که از رابطه 7 مشخص است، اين مدل تنها قادر به پيش‌بيني زمان شروع احتراق مي‌باشد. براي پيش‌بيني ساير پارامترهاي احتراقي از جمله CA50 و BD در وهله­ي اول از تابع ويب استفاده مي­گردد که بصورت زير تعريف مي‌شود ( روابط 8 تا 10) ]11[.

|  |  |
| --- | --- |
| (8) |  |
| (9) |  |
| (10) |  |

در اين روابط، کسر جرمي مخلوط سوخته شده،  زاويه ميل­لنگ در لحظه شروع احتراق،  زاويه ميل‌لنگ مربوط به کسر جرمي مخلوط سوخته شده، نسبت هم ارزي،  کسر جرمي گازهاي باقي­مانده از چرخه قبل، EGR بازخوراني گازهاي خروجي و A، B، C، D و E ضرايب ثابتي مي­باشند که مي­بايست مقادير آن­ها براي استفاده از اين تابع جهت پيش‌بيني ساير پارامترهاي احتراقي شامل CA50 و مدت زمان احتراق تعيين گردد. با توجه به اينکه در فرضيات حاکم بر مدل ترموشيميايي فرض بر اين است که از چرخه اول و فقط با اعمال EGR، شبيه­سازي انجام مي­گيرد. بنابراين مقدار  برابر صفر خواهد بود و عملاً  همان مقدار EGR خواهد بود. واضح است که براي محاسبه CA50 کافيست Xb برابر 5/0 و براي محاسبه BD، فقط کافيست θd محاسبه گردد. در واقع در تابع ويب برطبق رابطه 11 مي­توان نوشت:

|  |  |
| --- | --- |
| (11) |  |

با توسعه کد مربوط به تابع ويب در نرم افزار متلب و با اعمال ورودي‌هاي  و EGR و همچنين نتايج استخراج شده از مدل ترموشيميايي براي هر بيست حالت عملکردي مختلف و لينک اين کد به کد الگوريتم ژنتيک موجود در نرم افزار متلب، ضرايب A، B، C، D و E بهينه‌سازي شدند. با تعيين مقادير A، B، C، D و E کد مربوط به تابع ويب در محيط برنامه­نويسي فرترن و متلب توسعه داده شد تا از آن براي پيش‌بيني CA50 و BD استفاده گردد. مدل­ ديگر نيز مد نظر قرار گرفته است که در بخش بعدي توضيحات مبسوط ارائه شده است. همچنين جهت بدست آوردن بازه احتراق مي­توان از روابط دقيقتر (12 به همراه 13) استفاده نمود. در تحقيق کنوني از اين روابط به عنوان رابطه نهايي و مناسب براي تخمين بازه احتراق و CA50 استفاده گرديده است. با اين توضيح، تابع دومي که در مرجع ]12[ معرفي و در مرجع ]13[ نيز استفاده شده، مورد بررسي قرار گرفته است. در حالت استفاده از رابطه 12 به جاي رابطه 11 در معادله 7 مي­بايست ضرايب A، B، ، ، ،  و  از طریق بهينه‌سازي مشخص گردند.

|  |  |
| --- | --- |
| (12) |  |
| (13) |  |

**روند بهينه­سازي مدل­هاي پيش­بيني کننده**

روند بدست آوردن ضرايب بهينه مدل MKIM بهبود يافته به شکل خلاصه به صورت زير مي­باشد:

1- جمع آوري ورودي هاي مدل چند منطقه اي اعتباردهي شده براي حالت­هاي کارکردي مختلف موتور از جمله دبي جرمي هپتان نرمال، دبي جرمي هوا، دبي جرمي متان، زمان پاشش سوخت، درصد بازخوراني گازهاي خروجي، فشار در لحظه بسته شدن سوپاپ هوا، دور موتور، زاويه بسته شدن سوپاپ هوا و زاويه باز شدن سوپاپ دود.

2- حل مدل چند منطقه اي براي هر حالت کارکردی و بدست آوردن مقادير ، و  با استفاده از تحليل نمودار آزادسازي انرژي، بدست آوردن مقادير،  و محاسبه از معادله 6.

3- جمع­آوري ورودي هاي مدل MKIM براي حالت هاي کارکردي مختلف از جمله، ، ، ، ، ، ، و تشکيل معادله انتگرالي 7 براي هر حالت.

4- حل همزمان معادلات MKIM براي تمامي حالات با استفاده از الگوريتم ژنتيک و بدست آوردن شش ضريب مجهول A، B، C، D، E و F.

5- جداسازي تمامي آزمون هاي مورد استفاده در قسمت قبل بر حسب درصد EGR، ثابت فرض کردن ضرايب B، C، D، E و F و حل مجدد آزمون ها براي درصد هاي مشابه EGR و بدست آوردن منحني تغييرات ضريب A.

6- محاسبه اين­بار با دانستن ضرايب معلوم A تا F براي هر حالت و مقايسه با مقدار اوليه.

ب) روند بدست آوردن ضرايب بهينه مدل CA50 و BD به شکل خلاصه به صورت زير مي­باشد:

1- مرحله اول و دوم دقيقا همانند مرحله يک و دو قسمت قبل مي­باشد.

2- جمع آوري ورودي هاي مدل CA50 براي حالت هاي کاري مختلف از جمله ، ، ، ، ، ، و تشکيل معادله 8 با استفاده از معادله 12 براي هر حالت.

3- حل همزمان معادلات براي تمامي حالات با استفاده از الگوريتم ژنتيک و بدست آوردن ضرايب مجهول A، B، ، ، ،  و .

4- محاسبه و  اين­بار با دانستن ضرايب معلوم براي هر حالت و مقايسه با مقدار اوليه.

## تجهيزات آزمايشگاهي

داده هاي تجربي مورد استفاده در مطالعه حاضر از فعاليت هاي آزمايشگاهي انجام يافته در دانشگاه آلبرتاي کانادا حاصل شده است ]14[. موتور مورد استفاده در دانشگاه مزبور يک موتور تک سيلندر CFR[[8]](#footnote-9) مي­باشد که به يک دينامومتر الکتريکي متصل است. اهم ويژگي­هاي موتور مورد استفاده در جدول 1 ذکر شده است. موتور مورد استفاده مي تواند با دو سرعت مختلف 700 و 800 دور بر دقيقه مورد استفاده قرار بگيرد که در تحقيق بر روي دور 700 به عنوان مبنا مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول 1: ويژگي­هاي موتور مورد استفاده در آزمايش­ها ]14[

|  |  |
| --- | --- |
| Waukesha | Engine name |
| 612 | Displacement (cm3) |
| 8.25 | Bore (cm) |
| 11.4 | Stroke (cm) |
| 10 | IVO (aTDC) |
| 214 | IVC (aTDC) |
| 500 | EVO (aTDC) |
| 15 | EVC (aTDC) |

روش و تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمون­ها در مرجع ]14[ بیان گردیده است.

# نتایج

## صحه گذاری نتایج MMZM

قابليت مدل چندمنطقه ای در پيش­بيني عملکرد موتور RCCI، دقت مدل در پيش­بيني فشار داخل محفظه، و نرخ آزاد­سازي حرارت و پارامترهای احتراقی، دقت مدل در پيش­بيني آلاينده­هاي خروجي از موتور به ويژه UHC، CO، و NOx بررسي و تاثير تعداد مناطق تعيين شده بر نتايج در مرجع ]8[ به شکل کامل بررسی گرديده است.

## پيش بيني پارامترهاي احتراقي موتور RCCI با استفاده از مدل توسعه يافته پايه فيزيکي

**پيش بيني زمان شروع احتراق (SOC)**

رابطه اصلاح شده MKIM (معادله 7) شامل شش ضريب مجهول بوده که جهت تعيين زمان شروع احتراق مي­بايست مشخص گردند. جهت کمينه نمودن فاصله نتايج عددي (و يا تجربي) با نتايج حاصل از مدل­سازي رياضي ضرايب مجهول مدل MKIM مي­بايست بهينه­سازي گردند. از آنجاييکه، هدف اصلي اين تحقيق، بهينه­سازي عددي ضرايب مجهول مي­باشد، از روش مرسوم الگوريتم ژنتيک توسعه يافته در متلب جهت تعيين ضرايب استفاده خواهد شد. جهت تعيين ضرايب، نياز به طيف داده­هاي وسيعي خواهد بود که به همين منظور از 70 نمونه از نتايج مدل­سازي عددي به روش چندمنطقه اي استفاده خواهد شد. 70 حالت بررسي شده در بازه آزمون­هاي عملي صورت گرفته انتخاب شده­اند. بعد از بهينه­سازي و تعيين ضرايب، نتايج بدست آمده براي زاويه شروع احتراق با 70 مورد از نتايج عددي (که براي بهينه­سازي استفاده گرديده بود) به علاوه 25 مورد نتايح آزمون تجربي مقايسه خواهد گرديد.

شرايط کاري مورد استفاده براي بدست آوردن پارامترهاي مجهول مدل­هاي MKIM و آهنگ سوختن در جدول 3 نشان داده شده است.

مقادير ، ، ، ، ،  و  براي هر حالت آزمايش، از نتايج آزمون تجربي در دسترس بدست آمده است. پارامتر  با استفاده از منحنی فشار آزمون­های عملی در هر حالت مشخص مي گردد. همچنين، مقادير ،  و  براي هر حالت از نتايج حاصل از مدل چندمنطقه اي بدست مي­آيند. با مشخص شدن فشار و دماي لحظه شروع احتراق، ضريب پلي تروپيک  نيز از معادله 6 براي هر حالت محاسبه مي گردد. معادله پلي تروپيک براي ارتباط مابين فشار لحظه شروع احتراق و فشار لحظه بسته شدن سوپاپ هواي ورودي مي­باشد. در ابتدا، با استفاده از 70 مورد از نتايج مدل چندمنطقه اي (شامل درصد EGR از 0 تا 40 درصد) پارامترهاي A، B، C، D، E و F از مدل MKIM بهينه مي­گردند. در گام دوم، با اِعمال جواب هاي داراي EGR يکسان (به پنج گروه داراي درصد EGR برابر با 0، 10، 20، 30 و 40 تقسيم مي­گردند) در کد الگوريتم ژنتيک و با ثابت نگه داشتن ضرايب B، C ،D، E و F ضريب A که در نسبت تراکم ثابت تابعي از EGR تعريف شده بود، براي اين حالات تنظيم می­گردد. هدف اصلي در بهينه­سازي، بدست آوردن ضرايب مناسب به عنوان تابعي از يک يا چند ورودي ، ، φ ، EGR% و N مي­باشد. بايد به اين نکته توجه داشت که به دليل بالا بردن دقت در معادله 6 مقدار متغير در نظر گرفته شود (براي هر يک از 70 حالت جداگانه محاسبه شده و به صورت يک ماتريس مجزا با پسوند mat به عنوان ورودي در نظر گرفته شده است). ذکر اين نکته ضروريست که در صورت نياز به ساده­سازي مي توان از مقدار متوسط اين پارامتر استفاده نمود. پارامترهاي ، ، φ و N به طور مستقيم در معادله 7 وارد مي­شوند. بنابراين مي­توان به راحتي اين پارامترها را با اعمال اصلاحيه­ي ذکر شده به عنوان ورودي به مدل نهايي وارد کرد. تاثير پارامتر EGR را بايد در يک يا چند ضريب مجهولA ، B، C ،D، E يا F اعمال کرد. جهت دستيابي به مدل پيش­بيني کننده ساده و دقيق مي­بايست حساسيت خاصي را معطوف به نحوه­ي بهينه­سازي داشت. بدين­صورت که از ضرايب A، B، C ،D، E و F ضريب يا ضرايبي را مي­بايست انتخاب کرد که در نهايت رفتار مدل را نسبت به پارامتر درصد EGR به رفتار خطي نزديک­تر کند. به عبارت ديگر، در صورت تعيين­کردن ضرايب B، C ،D، E و F به صورت تابعي از پارامتر درصد EGR، بدليل اينکه اين ضرايب به عنوان توان و يا در عبارت نمايي قرار دارند، رفتار مدل نهايي را پيچيده­تر مي­سازند. بنابراين بهتر است راهکاري سنجيده شود که تاثير پارامتر درصد EGR فقط بر ضريب A اعمال گردد. بنابراين در ابتدا براي هر 70 حالت مشخص شده، ضرايب بهينه شده و سپس با دسته­بندي مقادير EGR براي هر نسبت تراکم، ضريب A بهينه خواهد شد و در انتها از مقادير بهينه شده به صورت تابعي بر حسب درصد EGR استفاده خواهد گرديد. در ابتدا به ازاي 70 نتيجه حل عددي مدل چندمنطقه اي و با اعمال کد الگوريتم ژنتيک و بدون دسته بندي نتايج بر حسب درصد EGR، ضرايب A تا F بهينه گرديده که در جدول 4 نشان داده شده است.

|  |
| --- |
| جدول 3: شرايط کاري مورد استفاده براي بدست آوردن پارامترهاي مجهول مدل­هاي 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 | |

|  |
| --- |
| جدول 4: پارامترهاي بهينه شده معادله MKIM جهت پيش بيني زمان شروع احتراق |
| |  |  |  | | --- | --- | --- | | **A** | **B** | **C** | | 0.0334 | 0.0732 | 717.9255 | | **D** | **E** | **F** | | -4.3868 | 0.4588 | 56.0194 | |

جدول 4 نشان دهنده ضرايب بدست آمده براي پيش­بيني زمان شروع احتراق توسط مدل MKIM (معادله 7) بدون در نظر گرفتن تغييرات ضريب A (ثابت در نظر گرفتن ضريب A به ازاي تمامي حالات EGR) مي­باشد. زمان شروع احتراق در70 مورد اول با نتايج بدست آمده از مدل چندمنطقه اي (که در بهينه سازي ضرايب استفاده گرديده) مقايسه شده و 25 مورد بعدي با نتايج تجربي مقايسه گرديده است.

|  |
| --- |
|  |
|  |

شکل 4: مقايسه نتايج پيش­بيني شده توسط مدل MKIM و 70 مورد از نتايج مدل چندمنطقه اي و 25 مورد از نتايج آزمون تجربي

با توجه به نتايج نشان داده شده در شکل 4، مدل مذکور با در نظر گرفتن مقدار ثابت براي ضريب A و بدون در نظر گرفتن تاثير درصد EGR، قادر به پيش بيني زمان شروع احتراق با دقت نه چندان مناسبي مي­باشد. متوسط اختلاف زمان شروع احتراق بدست آمده از مدل MKIM با تعداد 70 مورد از نتايج مدل چند منطقه اي برابر با 31/1 درجه ميل لنگ و متوسط اختلاف نتايج بدست آمده با نتايج آزمون عملي برابر با 38/1 درجه ميل لنگ مي­باشد. همچنين، براي کليه داده­هاي مقايسه­اي، مدل مذکور مي­تواند با بيشينه 2 درجه ميل لنگ لحظه شروع احتراق را پيش­بيني نمايد. حال در اين مرحله مي­بايست تغييرات ضريب A را بر حسب EGR مشخص و در محاسبه زمان شروع احتراق لحاظ نمود. به همين منظور، همانگونه که قبلا اشاره شد، نتايج با ميزان EGR ثابت (مابين 0 تا 40 درصد) را طبقه بندي نموده و با ثابت نگه داشتن ضرايب B تا F، ضريب A بر حسب درصد EGR محاسبه مي­شود. روند تغييرات ضريب A به ازاي درصدهاي مختلف EGR در شکل 5 نشان داده شده است. مقادير بهينه شده ضرايب مجهول معادله MKIM در جدول 5 نشان داده شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شكل 5: تغییرات پارامتر A بر حسب درصد EGR |

جدول 5: پارامترهاي بهينه شده معادله MKIM جهت پيش بيني زمان شروع احتراق

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **A** | **B** | **C** |
| Figure 5 | 0.0732 | 717.9255 |
| **D** | **E** | **F** |
| -4.3868 | 0.4588 | 56.0194 |

شکل 6 نشان دهنده نتايج بدست آمده براي زمان شروع احتراق با استفاده از مدل MKIM (معادله 7) و مقايسه آن با مقادير تجربي با استفاده از ضرايب جدول 5 مي­باشد. 70 مورد اول با نتايج بدست آمده از مدل چندمنطقه اي مقايسه گرديده و 25 مورد بعدي با نتايج تجربي مقايسه شده است.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| |  | | --- | |  | |  | |
| شکل 6 : مقايسه نتايج پيش­بيني شده توسط مدل MKIM و 70 مورد از نتايج مدل چند منطقه اي و 25 مورد از نتايج آزمون تجربي |

دقت مدل مذکور با اعمال ضريب متغير A افزايش مي­يابد به گونه اي که مدل مذکور قادر به پيش­بيني زمان شروع احتراق با دقت بالاتري مي­باشد. در اين حالت، متوسط اختلاف با نتايج مدل چند منطقه­اي برابر با 71/0 درجه ميل لنگ و متوسط اختلاف با نتايج آزمون عملي برابر با 15/1 درجه مي­باشد. همچنين، براي کليه داده­هاي مقايسه­اي، مدل مذکور مي­تواند با بيشينه 2 درجه ميل لنگ لحظه شروع احتراق را پيش­بيني نمايد.

**پيش بيني CA50 و بازه احتراق**

مطابق تابع ويب، رفتار نمايي کسر جرمي سوخته شده (رابطه­ي 8) توانايي خوبي جهت پيش­بيني زمان CA50 دارد در حالي که رابطه­ 9 با ورودي­هاي %EGR و نسبت هم ارزي نمي­تواند به خوبي تغييرات را دنبال کند. به همين منظور، از روابط 12 و 13 جهت پيش­بيني بازه احتراق و در نهايت CA50 استفاده خواهد شد. مقادير بهينه شده ضرايب مجهول معادله همزمان CA50 و بازه احتراق در جدول 6 نشان داده شده است.

جدول 6: پارامترهاي بهينه شده معادله CA50 و بازه احتراق

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **A** | **B** | **a1** | **a2** |
| -7.6782 | 8.8280 | 812656.5026 | 3.7404 |
| **a3** | **a4** | **a5** |
| 0.0015 | 0.9975 | 0.9754 |

شکل 7 نشان دهنده نتايج پيش­بيني شده بازه احتراق و اختلاف آن با داده­هاي ورودي و مقايسه کليه نتايج ورودي با خروجي مدل توسط مدل BD و با استفاده از ضرايب جدول 6 مي باشد. 70 مورد اول با نتايج بدست آمده از مدل چندمنطقه­اي مقايسه گرديده و 25 مورد بعدي با نتايج تجربي مقايسه گرديده است.

|  |
| --- |
|  |
|  |

شکل 7: مقايسه نتايج پيش­بيني شده توسط مدل BD و 70 مورد از نتايج مدل چندمنطقه­اي و 25 مورد از نتايج آزمون تجربي

بر اساس نتايج بدست آمده، متوسط اختلاف بازه احتراق بدست آمده از مدل نرخ سوختن با تعداد 70 مورد از نتايج مدل چندمنطقه­اي برابر با 11/1 درجه ميل لنگ و متوسط اختلاف نتايج بدست آمده با نتايج آزمون عملي برابر با 29/1 درجه مي باشد. همچنين، براي کليه داده­هاي مقايسه­اي، مدل مذکور مي­تواند با بيشينه 2/2 درجه ميل لنگ بازه احتراق را پيش بيني نمايد. همچنين، شکل 8 نشان دهنده نتايج پيش­بيني شده CA50، اختلاف آن با داده­هاي ورودي در مقايسه کليه نتايج ورودي با خروجي مدل توسط مدل CA50 (معادله 8) و با استفاده از ضرايب جدول 6 مي­باشد.

|  |
| --- |
|  |
|  |

شکل 8: مقايسه نتايج پيش­بيني شده توسط مدل CA50 و 70 مورد از نتايج مدل چندمنطقه­اي و 25 مورد از نتايج آزمون تجربي

با توجه به نتايج نشان داده شده در شکل 8، مدل مذکور با در نظر گرفتن ضرايب بهينه شده جدول 6 قادر به پيش­بيني زمان CA50 با دقت مناسبي مي­باشد. متوسط اختلاف بدست آمده از مدل نرخ سوختن با تعداد 70 مورد از نتايج مدل چندمنطقه­اي برابر با 01/1 درجه ميل لنگ و متوسط اختلاف نتايج بدست آمده با نتايج آزمون عملي برابر با 02/1 درجه مي­باشد. همچنين، براي کليه داده­هاي مقايسه­اي، مدل مذکور مي­تواند با بيشينه 3/2 درجه ميل لنگ بازه احتراق را پيش­بيني نمايد. جدول 7 متوسط اختلاف نتایج پیش­بینی پارامترهای احتراق برای هر سه مدل فیزیکی مورد بررسی را نشان می دهد.

جدول 7: متوسط اختلاف با نتایج آزمون عملی و مدل چند منطقه ای

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | متوسط اختلاف با نتايج مدل چند منطقه اي | متوسط اختلاف با نتايج آزمون عملي |
| پارامتر SOC | ضریب A ثابت | 31/1 | 38/1 |
| ضریب A متغیر | 71/0 | 15/1 |
| پارامتر BD |  | 11/1 | 29/1 |
| پارامتر CA50 |  | 01/1 | 02/1 |

# نتیجه‌گیری

در کار حاضر، کد چندمنطقه­اي بهبود یافته براي مدل سازي احتراق RCCI توسعه يافته است. از تابع بدست آمده از مدل­سازی CFD براي توزيع سوخت هپتان نرمال به عنوان ورودي کد چندمنطقه اي استفاده گرديده است. در ادامه، با استفاده از داده­هاي بدست آمده از مدل چندمنطقه‌اي، ضرايب مجهول مدل پيش­بيني انتگرال کوبشي اصلاح شده و سپس مدل50 درصد سوخت سوخته شده و مدل بازه احتراق توسط الگوريتم ژنتيک تعيين و بهينه گرديده و با نتايج خروجي از مدل چندمنطقه اي و 25 مورد از نتايج آزمون عملي مقايسه گرديده است. از اهم نتایج حاصل از این کار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

* مدل چندمنطقه­اي توسعه یافته داراي دقت مطلوبي در شبيه­سازي عملکرد موتور RCCI می‌باشد.
* مدل انتگرال کوبشي بهبود يافته (براي حالت دو سوخته) داراي دقت قابل قبولي در پيش بيني پارامترهاي احتراقي مي‌باشد، به گونه­اي که ميانگين خطاي داده­هاي پيش­بيني شده در حالت بهينه ( متغير فرض نمودن پارامتر A به ازاي EGR هاي مختلف) نسبت به مقادير پیش بيني شده توسط مدل چندمنطقه اي و يا مقادير تجربي برابر با 71/0 درجه ميل­لنگ مي‌باشد.
* مدل تابع ويب بهبود يافته (براي حالت دو سوخته) داراي دقت قابل قبولي در پيش بيني CA50 مي‌باشد، به گونه اي که ميانگين خطاي داده هاي پيش‌بيني شده نسبت به مقادير پيش‌بيني شده توسط مدل چندمنطقه‌اي و يا مقادير تجربي برابر با 11/1 درجه ميل لنگ مي‌باشد.
* مدل بازه احتراق (براي حالت دو سوخته) داراي دقت قابل قبولي در پيش‌بيني BD مي‌باشد، به گونه اي که ميانگين خطاي داده هاي پيش‌بيني شده نسبت به مقادير پيش‌بيني شده توسط مدل چندمنطقه‌اي و يا مقادير تجربي برابر با 01/1 درجه ميل لنگ مي‌باشد.

**فهرست علائم**

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

# 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.

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.

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.

1. Reactivity controlled compression ignition [↑](#footnote-ref-2)
2. Multi zone Model [↑](#footnote-ref-3)
3. Computational fluid dynamic [↑](#footnote-ref-4)
4. Part load condition [↑](#footnote-ref-5)
5. Air Fuel Ratio (AFR) [↑](#footnote-ref-6)
6. Cetane number [↑](#footnote-ref-7)
7. Port fuel injection [↑](#footnote-ref-8)
8. Cooperative Fuel Research [↑](#footnote-ref-9)