

شبیه‌سازی احتراق سوخت رادیکال آزاد و اثرات آن بر روی آلاینده‌های خروجی و عملکرد موتور

کوروش عطاریان^{۱*}، حسین قماش^۲، امین میرزاحمد^۳
دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب، گروه مکانیک تبدیل انرژی
(*نویسنده مخاطب: kourosh_attarian_iust@yahoo.com)

چکیده:

امروزه قوانین سختی برای آلاینده‌های خروجی از موتورهای اعمال می‌شود. یکی از روش‌های مناسب و موثر برای تبعیت از این استانداردها و قوانین، استفاده از رادیکال سوخت و یا احتراق رادیکالی می‌باشد. از این راهکار در موتورهای احتراق تراکمی (CI) و همچنین موتورهای احتراق جرقه‌ای (SI) استفاده می‌شود. در این شیوه با وارد کردن رادیکال سوخت به فرآیند احتراق، علاوه بر کاهش مصرف سوخت، آلاینده‌های کمتری نیز تولید خواهد شد. در این پروژه احتراق رادیکالی و عادی با استفاده از نرم افزار AVL FIRE شبیه‌سازی شده و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده با استفاده از احتراق رادیکالی می‌توان علاوه بر دستیابی به فشار و توان بالاتر برخی از آلاینده‌ها مانند مونوکسید کربن (CO) و هیدروکربن‌های نسوخته (UHC) را کاهش داد اما آلاینده مونوکسید نیتروژن (NO) افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: احتراق رادیکالی، آلاینده، رادیکال سوخت، احتراق عادی

۱- مقدمه:

از اختراع موتورهای احتراق داخلی بیش از صد سال می‌گذرد. اولین موتور اشتعال تراکمی بوسیله ردلف دیزل در سال ۱۸۹۳ میلادی ساخته شد. از آن پس تکامل و بهره‌گیری از موتورهای احتراق داخلی با چنان شتابی صورت گرفته است که امروزه از مهمترین ابزارهای تولید قدرت محسوب می‌شوند. یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاری کاهش میزان آلاینده‌ها، می‌باشد. یکی از راه‌های پیشنهاد شده برای این نوع موتورها استفاده از رادیکال سوخت و یا احتراق رادیکال فعال سوخت می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تولید رادیکال سوخت وجود دارد. از جمله: تغییر شکل پیستون و تاج آن، به دام انداختن گازهای خروجی حاصل از احتراق، استفاده از میدان‌های الکترومغناطیسی و غیره. ذرات مزبور که عمر کوتاهی دارند، واکنش دهنده هستند و به عنوان ذرات میانی مطرح می‌شوند نقش مهمی را در احتراق به عهده دارند. این ذرات در تمامی مراحل واکنش-های احتراقی حضور دارند. این ذرات تعیین‌کننده فاکتورهای مهمی چون: میزان انرژی حاصل از احتراق، میزان گازهای گل-خانه‌ای و میزان آلاینده‌ها می‌باشند. تعیین کمی این واکنش‌های میانی خود یک مسأله در خور توجه می‌باشد و روش‌های منحصر به فردی را می‌طلبد. احتراق یک واکنش شیمیایی است که طی آن المان‌های مشخصی از سوخت (مانند هیدروژن و کربن) با اکسیژن ترکیب می‌شوند و موجب افزایش دما در گازها می‌شوند. از جمله واکنش‌هایی که در تمامی فرآیندهای

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، گروه مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

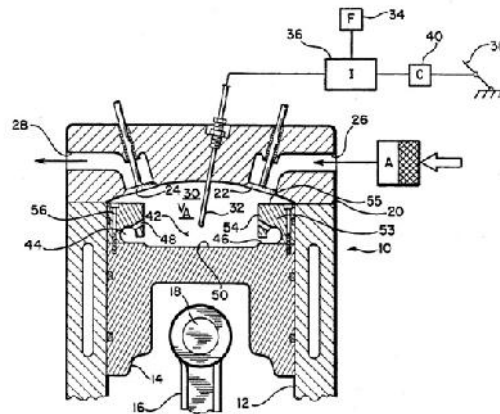
۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، گروه مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، گروه مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

احتراق به وقوع می‌پیوندد و واکنش‌های زنجیره‌ای می‌باشند. واکنش‌های زنجیره‌ای واکنش‌هایی هستند که در موتورهای احتراق داخلی انجام می‌گیرند. این واکنش‌ها مجموعه‌ای از واکنش‌های مرحله‌ای با نرخ متفاوت سرعت می‌باشند. در بسیاری از فرآیندهای احتراق نرخ (سرعت) دقیق واکنش‌ها مشخص نیست. در این فرآیندها فعال‌ترین ذره با نام رادیکال آزاد شناخته می‌شود. در مجموعه اصطلاحات علم شیمی رادیکال آزاد به الکترون‌های جفت نشده اطلاق می‌شود. در مقاله پیش رو ابتدا به معرفی کارهای گذشته پرداخته خواهد شد سپس در خصوص مدل‌های احتراق و شبیه‌سازی عددی آن بحث می‌شود و در پایان نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد. [1, 2]

۲- معرفی کارهای گذشته در خصوص استفاده از رادیکال سوخت در فرآیند احتراق:

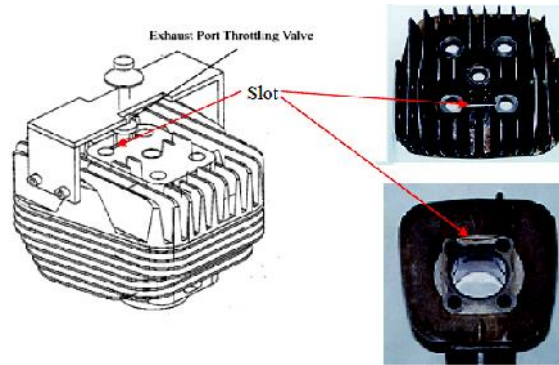
- نمونه اول: اختراع US Patent No.5322042 (Di Priolo et al) تحت عنوان محفظه احتراق برای موتورهای احتراق داخلی و فرآیند احتراق با استفاده از ذرات رادیکال سوخت- نوعی پیستون طراحی شده است که به سبب ویژگی‌های خاص آن، تولید و میزان ذرات رادیکال‌های سوخت تحت کنترل و نظارت قرار می‌گرفتند. در این پیستون که می‌توان برای موتورهای احتراق جرقه‌ای و یا احتراق تراکمی مورد استفاده قرار گیرد، فضای فرورفته‌ای (محفظه اصلی احتراق) تعبیه شده است تا حداکثر میزان مخلوط سوخت و هوا را دریافت کند. همچنین فضایی با نام محفظه واکنش (Reaction Chamber) در مجاورت محفظه اصلی احتراق قرار می‌گیرد که بخشی از سوخت و هوای وارد شده در هر سیکل احتراق به آن قسمت وارد می‌شود تا در مراحل بعدی وارد فرآیند احتراق شود. در هر سیکل احتراق بخشی از مخلوط سوخت و هوا که در محفظه واکنش می‌باشد تحت یک واکنش اکسیداسیون شعله سرد (Cool Flame Oxidation) قرار می‌گیرد و به این ترتیب ذرات رادیکال آزاد سوخت که برای سیکل بعدی احتراق استفاده می‌شوند، تولید خواهد شد. در شکل زیر تصویر اختراع مزبور نشان داده شده است. [3]



شکل شماره ۱- تصویر برش خورده از سیلندر و پیستون با شیارهای ممتد

- نمونه دوم: دستیابی به احتراق رادیکالی از طریق محبوس کردن گازهای خروجی حاصل از احتراق: دستیابی به احتراق رادیکالی در شرایط خاصی ممکن می‌شود. این شرایط به طور مستقیم با میزان گازهای خروجی حاصل از احتراق که در داخل سیلندر محبوس شده‌اند ارتباط دارد البته عوامل دیگری مانند بار روی موتور، دور موتور و تمرکز هیدروکربن‌های نسوخته و دمای گاز محبوس نیز موثر است. کنترل خروج گازهای حاصل از احتراق از محفظه احتراق و محبوس کردن بخشی

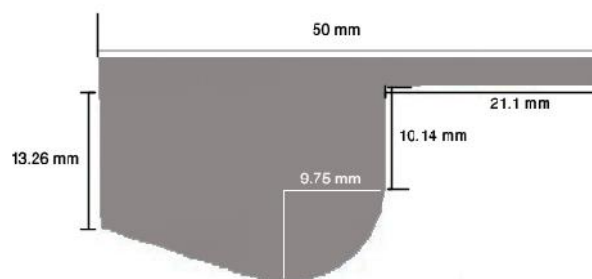
از آن گاز جهت حضور در سیکل بعدی احتراق وجود رادیکالهای OH و H را تضمین می‌کند. یک ورقه لغزنده (Sliding Plate) جهت اعمال مکانیزم خفگی (Throttling) در دهانه پورت خروجی گازها تعبیه شده است. در شکل شماره ۲ این مکانیزم واضح تر نشان داده شده است. [4-6]



شکل شماره ۲- اعمال مکانیزم خفگی [4,5]

۳- مدل سازی احتراق در موتورهای احتراق داخلی:

برای انجام مدل سازی احتراق رادیکالی در موتورهای احتراق داخلی از نرم افزار AVL FIRE استفاده شده است. در ابتدا جهت انجام شبیه سازی می‌بایست طرح دو بعدی تاج پیستون موتور Duetz در نرم افزار Gambit ترسیم شده و مش بندی انجام شود. (به علت تقارن، نیمی از پروفایل تاج و پیستون ترسیم شد.) ترسیم طرح دوبعدی با استفاده از نقشه موجود در صنایع کشور انجام شد. الگوی مش زنی مورد استفاده در نرم افزار Gambit ، Map-Quad می‌باشد. [7]



شکل شماره ۳ - تصویر نیمی از پروفیل برش خورده تاج پیستون مورد مطالعه

- مدل احتراق مورد استفاده: مدل ECFM (E مخفف کلمه Extended به معنای تعمیم یافته است) که به طور عمده جهت استفاده برای توصیف احتراق در موتورهای DI-SI بوجود آمده است، بکار گرفته شده است. این مدل با مدل پاشش توأم می‌باشد و مدل سازی احتراق چینه‌چینه شده (Stratified) را که شامل اثرات EGR و تشکیل NO می‌باشد را امکان پذیر می‌-

سازد. این مدل بر توصیف مشروط سوختن یا نسوختن خواص ترموشیمیایی گاز متکی است. مدل ECFM تمامی ویژگی‌های CFM و بهبودهای مدل MCFM را دارا می‌باشد. [8]

- مدل اشتعال: مدل کروی- از این مدل اشتعال می‌توان برای تمامی مدل‌های CFM استفاده کرد. در این مدل یک هسته شعله کروی با استفاده از موقعیت جرقه‌زنی، زمان جرقه‌زنی، شعاع هسته و طول مدت جرقه‌زنی به همراه چگالی سطحی شعله منتشر می‌شود. چگالی سطحی شعله در تمام سلول‌های اشتعالی در سراسر هسته شعله و در مدت زمان جرقه‌زنی ثابت نگهداشته می‌شود. پس از پایان اشتعال، چگالی سطحی شعله می‌بایست جهت توسعه احتراق حفظ شود. [8]

- مدل تشکیل NO_x: مدل Extended Zeldovich + Prompt + Fuel- این مکانیزم مطابق با فرض تعادل شیمیایی تعریف می‌شود، که به معنای آنست که فقط به اتم نیتروژن به عنوان ذرات میانه نیاز است. از آنجایی که غلظت آن به سینتیک شیمیایی احتراق وابسته نمی‌باشد، نیازی چندان به بررسی اکسیداسیون سوخت نمی‌باشد بلکه به جای آن می‌بایست واکنش-های شیمیایی بررسی شوند. از سوی دیگر انرژی فعال‌سازی اکسیداسیون اتم‌های N کوچک است. در نواحی احتراق با اکسیژن کافی (نواحی سوخت کم) نرخ مصرف اتم نیتروژن آزاد برابر با نرخ تشکیل آن می‌شود و بنابراین یک وضعیت شبه پایدار ایجاد می‌شود. نرخ کلی تشکیل NO برای سه واکنش حرارتی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial c_{NO}}{\partial t} = 2k_{1f}c_{O}c_{N_2} \left(\frac{1 - \frac{k_{1b}k_{2b}c_{NO}^2}{k_{1f}c_{N_2}k_{2f}c_{O_2}}}{1 + \frac{k_{1b}c_{NO}}{k_{2f}c_{O_2} + k_{3f}c_{OH}}} \right) \quad (1)$$

C_{NO}: نرخ تشکیل NO، k_f: نرخ انجام واکنش در جهت پیشرونده، k_b: نرخ انجام واکنش در جهت عکس.

نرخ تشکیل NO چنانچه دما زیر 1600°K - 1800°K باشد کم خواهد بود این قضیه برای نواحی پرسوخت نیز حاکم است و علت آن غلظت کم اتم‌های اکسیژن است. از طرفی دیگر اگر دما افزایش یابد علی‌الخصوص بالای 1800°K برسد، تشکیل NO به شدت سرعت می‌گیرد. [9,10]

- معادلات و مدل‌های حاکم بر مسأله: معادلات اساسی مومنتوم پیوستگی و انرژی برای یک سیکل بسته محاسبه می‌شود. معادلات مومنتوم و پیوستگی مربوط به محاسبه میدان‌های سرعت و فشار و معادله انرژی مربوط به محاسبه آنتالپی می‌باشد. شکل کلی معادلات بقا جرم، مومنتوم و انرژی را به ترتیب برای یک حجم کنترل می‌توان به صورت زیر نوشت:

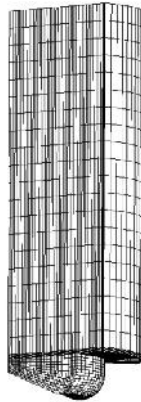
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{D U_i}{D t} &= \rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \rho g_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \\ &= \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho \frac{D H}{D t} = \rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} + U_j \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) = \rho g_j + \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} U_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

که در اینجا چگالی سیال، U سرعت سیال، g شتاب گرانشی، تانسور تنش، P فشار سیال، μ لزجت سیال، تانسور واحد، H آنتالپی سکون سیال، q چشمه حرارتی، تنش برشی سیال و ضریب هدایت حرارتی می باشد. [11,12]

- شبیه سازی عددی: نرم افزار Fire برای مدل سازی محفظه احتراق از یک مش متحرک سه بعدی استفاده می کند. روش به کار رفته برای حل معادلات کاملاً ضمنی است. به منظور ایجاد شبکه سه بعدی مدل، ابتدا شبکه دو بعدی تاج پیستون در نقطه مرگ بالا (TDC) در محیط نرم افزار Gambit ایجاد می گردد. در این مرحله هندسه تولید شده در نرم افزار Fire فراخوانی شده و فرآیند تولید شبکه بر روی آن اعمال می شود. با توجه به این موضوع که در مقاله حاضر، موتور دیزلی پاشش مستقیم Duetz مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است، شبکه دو بعدی ایجاد شده، ۶۰ درجه حول محور عمودی سیلندر نگاشته شده و شبکه سه بعدی با ساختار شش وجهی بوجود می آید. از آنجایی که نازل انژکتور در موتور مورد بررسی ۴ سوراخ دارد، با توجه به تقارن هندسی محفظه احتراق و برای کم کردن زمان محاسبات، تنها یک قطاع ۶۰ درجه از محفظه احتراق به عنوان شبکه عددی انتخاب شده است. بنابراین، ابتدا شبکه برای قطاع ۶۰ درجه محفظه در نقطه مرگ پایین ساخته می شود. (شکل شماره ۴)



شکل شماره ۴: نمایی از شبکه سه بعدی ایجاد شده در نقطه مرگ پایین

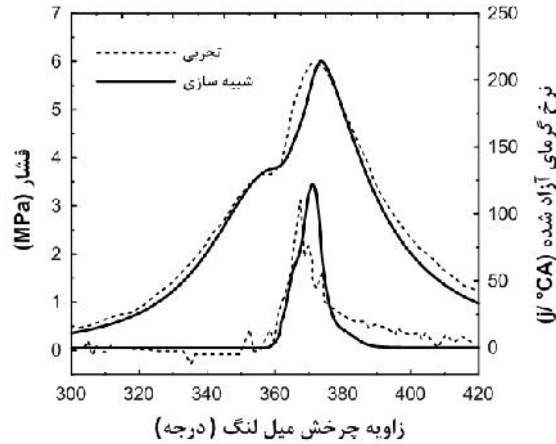
فرآیند متحرک سازی شبکه در طی مرحله اول یعنی کورس تراکم بصورت زیر اعمال می گردد:

- ۱- ایجاد شبکه متحرک از زاویه ۱۸۰ درجه میل لنگ تا زاویه ۳۲۰ درجه میل لنگ با تقسیم بندی ۲۰ درجه ای.
- ۲- ایجاد شبکه متحرک از زاویه ۳۲۰ درجه میل لنگ تا زاویه ۳۴۰ درجه میل لنگ با تقسیم بندی ۱۰ درجه ای.
- ۳- ایجاد شبکه متحرک از زاویه ۳۴۰ درجه میل لنگ تا زاویه ۳۶۰ درجه میل لنگ با تقسیم بندی ۵ درجه ای.

۴- نتایج شبیه سازی احتراق رادیکالی و عادی

۴-۱- صحنه گذاری

به منظور صحت‌گذاری الگوهای استفاده شده در این شبیه‌سازی از نتایج تجربی این موتور که در مرجع [14] نشان داده شده است، استفاده می‌شود.



شکل ۲- مقایسه تغییرات فشار و نرخ گرمای آزاد شده حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی

این نتایج تجربی برای حالت دوسوخته دیزل-گاز متان بوده، بطوریکه مقدار سوخت متان برابر ۲۷ میلی‌گرم و سوخت دیزل پاششی ۶ میلی‌گرم می‌باشد. سوخت متان بصورت همگن و با دمای K365 وارد محفظه شده و سوخت دیزل در زاویه میل لنگ ۱۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا تزریق می‌شود. در شکل (۲) نمودار فشار و نرخ حرارت آزاد شده برای داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده، با هم مقایسه شده است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که نتایج تئوری و تجربی از توافق خوبی برخوردار هستند.

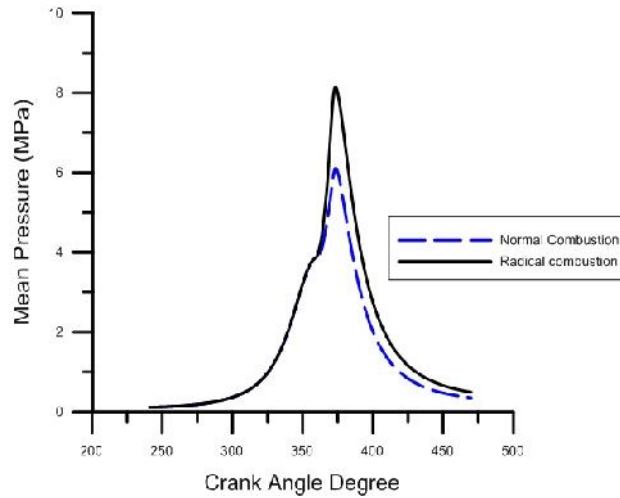
شبیه‌سازی احتراق موتور مزبور در دو حالت احتراق نرمال (عادی) و احتراق رادیکالی و در دمای ۳۶۵ درجه کلوین برای سوخت ورودی انجام گرفته است، که نتایج آن در زیر ارائه شده است:

۱- فشار: همانطور که در شکل شماره ۵ مشخص است، حداکثر فشار در احتراق رادیکالی بیش‌تر از احتراق عادی می‌باشد. دلیل این امر در سطح انرژی بالاتر سوخت رادیکالی است. جهت آنکه سوخت به حالت رادیکالی تبدیل شود می‌بایست انرژی لازم جهت یونیزه کردن و سپس جداسازی رادیکال H از CH₄ به سوخت داده شود. این کار سبب بالارفتن سطح انرژی سوخت خواهد شد. طبیعتاً به هنگام احتراق، انرژی بیشتری آزاد خواهد شد. در نتیجه فشار بیشتری نیز آزاد خواهد شد. افزایش فشار طبق رابطه [13]:

$$mep \text{ kPa} = \frac{P \text{ kW} \cdot n_R \cdot 10^3}{V_d \text{ dm}^3 \text{ N}(\text{rev}_s)} \quad (5)$$

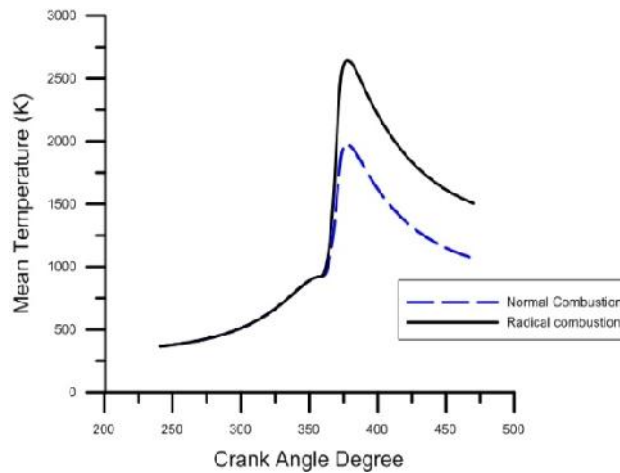
P: توان، N: دور موتور در ثانیه، V_d: حجم جابجایی دی‌سیلندر، mep: فشار میانگین موثر، n_R: ضریبی که برای موتورهای دوزمانه و چهارزمانه جداگانه تعریف می‌شود.

موجب افزایش توان موتور مورد نظر خواهد شد و افزایش توان سبب افزایش شتاب حرکتی خواهد شد.



شکل شماره ۵- نمودار فشار حاصل از احتراق عادی و رادیکالی

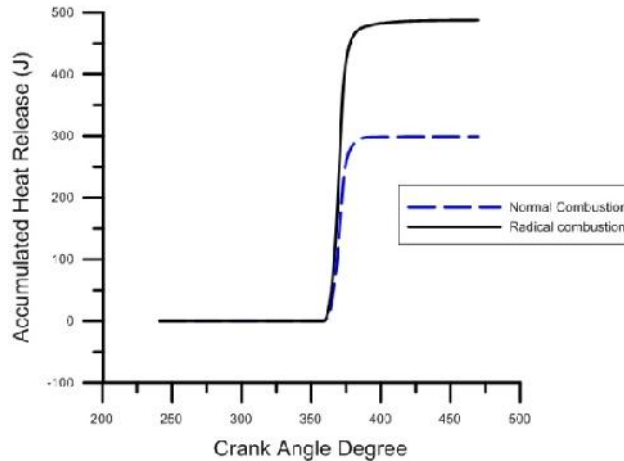
۲- دمای داخل سیلندر: با توجه به آنکه در احتراق رادیکالی انرژی بیشتری آزاد می‌شود احتراق کامل‌تری حاصل خواهد شد در نتیجه دمای داخل سیلندر در حین و پس از احتراق بالاتر از احتراق عادی خواهد بود. علت این مسأله نیز سطح بالاتر انرژی در سوخت رادیکالی می‌باشد.



شکل شماره ۶- نمودار دمای حاصل از احتراق عادی و رادیکالی

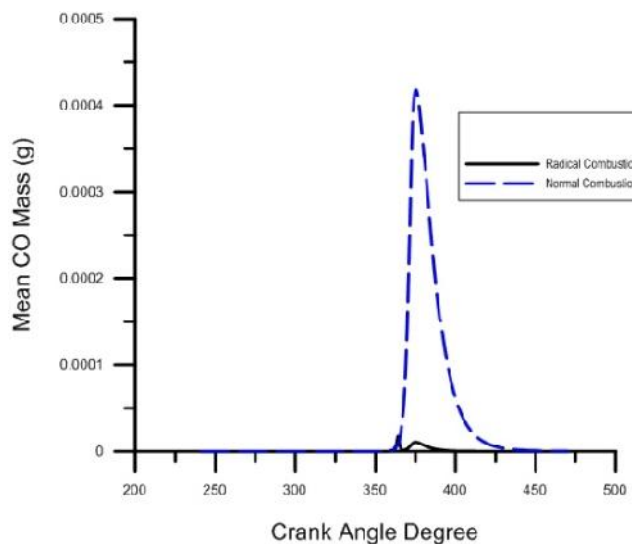
۳- گرمای آزاد شده (Accumulated heat release): با توجه به شکل شماره ۷، گرمای آزاد شده از احتراق رادیکالی بیشتر از احتراق عادی است. این مسأله بدلیل سطح بالاتر انرژی سوخت رادیکالی شده است. چراکه جهت تولید رادیکال آزاد سوخت می‌بایست انرژی در حدود ۴۳۰۹۵۰ ژول به ازای هر مول به سوخت اعمال شود که طبیعتاً در فرآیند احتراق این انرژی

اضافی به انرژی احتراق سوخت در حالت عادی اضافه می‌شود و بنابراین سطح گرمای آزاد شده بالاتر خواهد بود. این گرمای اضافه سبب بالاتر رفتن دمای داخل سیلندر و همچنین افزایش کار پیستون خواهد شد.



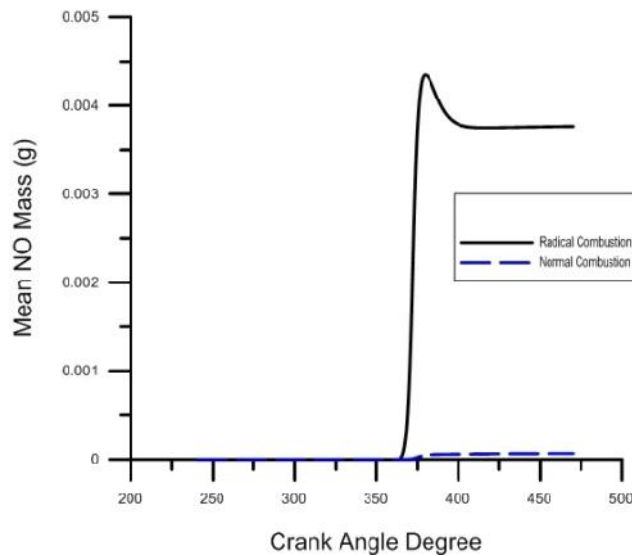
شکل شماره ۷ - نمودار مقایسه گرمای آزاد شده حاصل از احتراق عادی و رادیکالی

۴- نسبت جرمی گاز آلاینده مونوکسید کربن (CO mass fraction): همواره میزان تولید آلاینده مونوکسید کربن CO با احتراق کامل ارتباط معکوس دارد به این معنا که هرچه دمای حاصل از احتراق بیشتر باشد احتراق کامل‌تر است و میزان CO_2 تولید شده افزایش می‌یابد درحالی‌که میزان CO در گازهای حاصل از احتراق کاهش می‌یابد. در خصوص مقایسه میزان مونوکسید کربن تولیدی در احتراق رادیکالی و عادی، همانطور که در شکل شماره ۸ مشخص است، با توجه به آنکه در احتراق رادیکالی گرمای بیشتری در داخل سیلندر تولید می‌شود دما نیز به تبع آن افزایش می‌یابد و احتراق کامل‌تر خواهد بود، در نتیجه مونوکسید کربن کمتری به نسبت حالت احتراق عادی تولید خواهد شد.



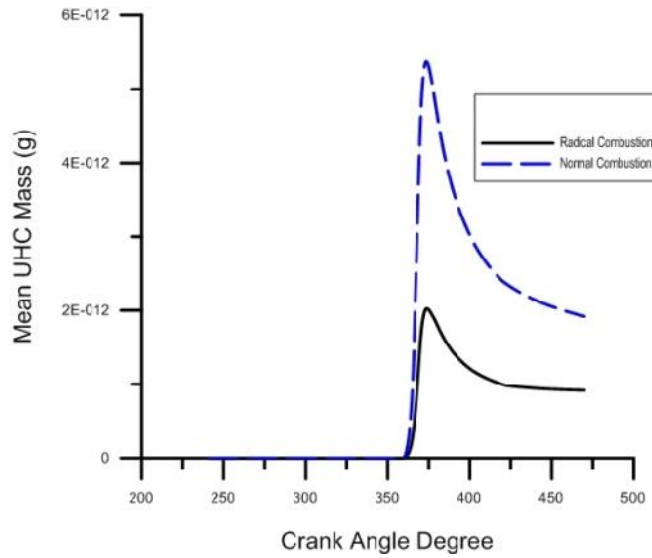
شکل شماره ۸ - نمودار مونوکسید کربن حاصل از احتراق عادی و رادیکالی

۵- نسبت جرمی گازهای آلاینده مونوکسید نیتروژن (NO mass fraction): برخلاف مونوکسید کربن، میزان تولید گاز آلاینده مونوکسید نیتروژن (NO) در دمای بالاتر بیشتر خواهد بود. در نتیجه احتراق کامل تر تولید بیشتر گاز مزبور را به همراه خواهد داشت. طبیعتاً کاهش دمای داخل سیلندر موجب کاهش میزان تولید آلاینده NO خواهد شد. همانطور که در شکل شماره ۹ نشان داده شده است، میزان تولید NO در احتراق رادیکالی بسیار بیشتر از احتراق عادی است که علت این مسأله کامل تر بودن احتراق در نوع رادیکالی و بالاتر بودن دمای داخل سیلندر می باشد که محیط و شرایط بسیار مناسبی را برای تولید آلاینده NO بوجود می آورد.



شکل شماره ۹ - نمودار مقایسه نسبت جرمی گازهای آلاینده مونوکسید نیتروژن (NO) حاصل از احتراق عادی و رادیکالی

۶- نسبت جرمی آلاینده هیدروکربن های نسوخته (UHC mass fraction): همواره میزان تولید آلاینده هیدروکربن های نسوخته با احتراق کامل ارتباط معکوس دارد به این معنا که هرچه دمای حاصل از احتراق بیشتر باشد احتراق کامل تر است و میزان هیدروکربن های نسوخته تولید شده کاهش می یابد. در خصوص مقایسه میزان هیدروکربن های نسوخته تولیدی در احتراق رادیکالی و عادی، همانطور که در شکل شماره ۱۰ مشخص است، با توجه به آنکه در احتراق رادیکالی گرمای بیشتری در داخل سیلندر تولید می شود دما نیز به تبع آن افزایش می یابد و احتراق کامل تر خواهد بود، در نتیجه هیدروکربن های نسوخته کمتری به نسبت حالت احتراق عادی تولید خواهد شد.



شکل شماره ۱۰- نمودار مقایسه نسبت جرمی آلاینده UHC حاصل از احتراق عادی و رادیکالی

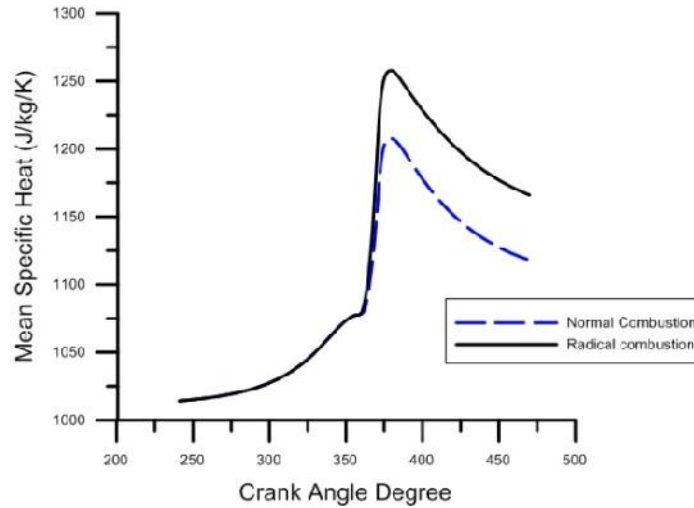
۷- گرمای ویژه (Specific heat): با توجه به اینکه در این شبیه‌سازی گاز ایده‌آل فرض شده است، گرمای ویژه در حالت فشار ثابت و حجم ثابت فقط تابع دما خواهد بود. یعنی:

$$du = c_v T dT \quad (۶)$$

$$dh = c_p T dT \quad (۷)$$

u : انرژی درونی، h : آنتالپی، c_v : مقدار گرمای ویژه در حجم ثابت، c_p : مقدار گرمای ویژه در فشار ثابت، T : دما

در نتیجه در این بخش گرمای ویژه کاملاً تابع دمای داخل سیلندر خواهد بود. با توجه به آنکه در احتراق رادیکالی انرژی بیشتری آزاد می‌شود احتراق کامل‌تری حاصل خواهد شد و دمای داخل سیلندر در حین و پس از احتراق بالاتر از احتراق عادی خواهد بود. علت این مسأله نیز سطح بالاتر انرژی در سوخت رادیکالی می‌باشد. در نتیجه گرمای ویژه نیز در احتراق رادیکالی بالاتر خواهد بود.



شکل شماره ۱۱ - نمودار مقایسه گرمای ویژه احتراق عادی و رادیکالی

۵- نتیجه گیری:

از میان پارامترهای ذکر شده در بخش ۴، افزایش فشار و توان باعث افزایش قابلیت‌های موتور خواهد شد، همچنین کاهش آلاینده‌های مونوکسید کربن (CO) و هیدروکربن‌های نسوخته (UHC) بسیار مطلوب خواهد بود.

همچنین می‌توان یک نتیجه‌گیری جانبی نیز داشت: از آنجایی که در احتراق رادیکالی در مقایسه با احتراق عادی با نسبت سوخت برابر، فشار و توان بیشتری حاصل می‌شود قطعاً این نتیجه قابل استنتاج است که چنانچه میزان سوخت در احتراق رادیکالی کمتر شود می‌توان به فشار و توانی برابر با احتراق عادی دست یافت و این به منزله صرفه‌جویی در مصرف سوخت می‌باشد که بسیار مفید خواهد بود. در نتیجه بکارگیری احتراق رادیکالی در موتورها سبب بهبود کاری آن‌ها خواهد شد.

مراجع:

- 1- Khalil, M. A. K. (1999). "NON-CO2 GREENHOUSE GASES IN THE ATMOSPHERE" Annual Review of Energy and the Environment 24 (1): 645-661.
- 2- Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types, Michael Wang et al 2007 Environ. Res. Lett. 2 024001
- 3- Di Priolo C. L. et al " Combustion Chamber for Internal Combustion Engine and Process of Combustion Using Radical Fuel" United States Patent, 1994, Sonex Research Incorporation
- 4- Alkaff S. A, Ahmed Suhimi and, Hakim A Abbass " Radical combustion. New concept for two stroke (SI) engines" ASEAN Journal On Scientific and Technology for Development Singapore 17 (2):91-99, 2000



- 5- Alkaff S. A, Khan A.Mohamed " A New Strategy to Achieve Radical Combustion Through Exhaust Port Throttling for Two Stroke Engine" International Journal of Engineering (IJE), Volume (4) : Issue(2)
- 6- J. Warnatz · U. Maas · R.W. Dibble," Combustion Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation," 4th Edition.2006.
- 7- GAMBIT software, help, 2D mesh instructions.
- 8- Help of CFD AVL FIRE Software, Part: "Equation".
- 9- Help of CFD AVL FIRE Software, Part: "combustion".
- 10- Help of CFD AVL FIRE Software, Part: "Pollutants ".
- 11- Joel H. Ferziger and Milovan Peric. Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, Berlin, third edition, 2001.
- 12- K. Hanjalic, M. Popovac, and M. Hadziabdic, "A robust near-wall elliptic relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD," International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 25, pp. 1047–1051, 2004.
- 13- Colin, O., Benkenida, A. and Angelberger, C. "3D Modeling of Mixing, Ignition and Combustion Phenomena in Highly Stratified Gasoline Engines", Oil & Gas Science and Technology - Rev IFP, 58(1), 47-62 (2003)
- 14- Zhang, Y., Kong, S., and Reitz, R., "Modeling and Simulation of a Dual Fuel (Diesel/Natural Gas) Engine With Multidimensional CFD," SAE Technical Paper 2003-01-0755, 2003, doi: 10.4271/2003-01-0755.