

بررسی اثر نسبت هم‌آزری بر احتراق دما پایین یک موتور دیزل سنگین به وسیله مدل سه‌بعدی با در نظر گرفتن سینتیک مفصل شیمیایی

عطیه تقی زاده فیروزجایی

دانشجو کارشناسی ارشد - دانشگاه صنعتی بابل
Atie.taqizadeh@aol.com

امید جهانیان

استادیار - دانشگاه صنعتی بابل
jahanian@nit.ac.ir

سید ایمان پورموسوی کانی

دانشجو دکتری - دانشگاه بیرجند
iman.pourmousavi@yahoo.com

چکیده

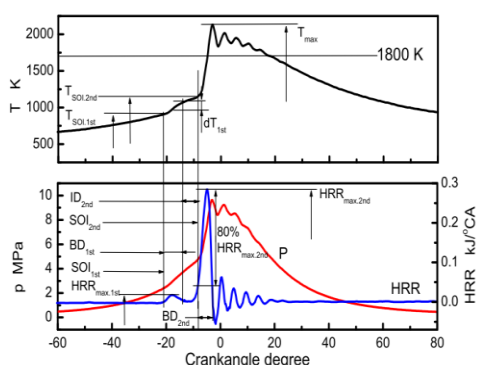
در این پژوهش به بررسی یک موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن با در نظر گرفتن مدل شبیه سازی کوپل شده با سینتیک مفصل شیمیایی پرداخته شده است. احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، فازی از احتراق است که خصوصیات احتراق موتورهای اشتعال جرقه‌ای و اشتعال تراکمی را همزمان داراست. این موتور دارای پتانسیل بالای صرفه جویی در مصرف سوخت نسبت به موتورهای دیزل است در حالی که سطح آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن پایین‌تری نسبت به موتورهای اشتعال جرقه‌ای رایج دارد. از طرف دیگر، این نوع احتراق دارای معایبی همچون آلاینده‌های بالای کربن مونوکسید و هیدروکربن‌های نسوخته، حوزه کاری محدود و مشکلات کنترل فازهای احتراق می باشد. احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن در بارهای زیاد توسط کوپش و در بارهای جزئی توسط احتراق ناقص، به دلیل کم بودن انرژی گرمایی برای شروع خود اشتعالی مخلوط سوخت و هوا، محدود می‌شود. در احتراق موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن، پارامترهای عملکردی همچون دمای اولیه احتراق، فشار اولیه احتراق و نسبت هم‌آزری مورد مطالعه قرار گرفته است. از مهمترین خروجی‌های این پژوهش می‌توان به بررسی پیدایش رادیکال هیدروکسیل و تاثیر آن بر وقوع پدیده خود اشتعالی [1] اشاره نمود. برای شبیه سازی احتراق این موتور از نرم افزار AVL FIRE کوپل با سینتیک مفصل شیمیایی استفاده شده است.

کلمات کلیدی: موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن، رادیکال هیدروکسیل، سینتیک مفصل شیمیایی، AVL FIRE.

مقدمه

احتراق^۱ اشتعال تراکمی سوخت همگن (اشتعال تراکمی مخلوط همگن) فازی از احتراق است که خصوصیات احتراق موتورهای اشتعال جرقه‌ای^۲ و اشتعال تراکمی^۳ را همزمان داراست. در یک چرخه دوگانه، بازده بالای موتورهای دیزلی همراه با مقادیر کم آلاینده‌های دوده^۴ و اکسیدهای نیتروژن قابل دسترسی است. این مهم در یک احتراق کاملاً پیش مخلوط شده و بسیار رقیق ($\lambda < 1$ یا $\Phi > 1$) که در طی آن دما پایین باقی خواهد ماند، قابل دسترسی است. بر خلاف موتورهای معمول دیزلی و بنزینی، در موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن منبع مستقیمی برای شروع احتراق وجود ندارد و فرآیند احتراق شامل خوداشتعالی همزمان هزاران نقطه در زمانی بسیار کوتاه می‌باشد. [۲]

در شکل (1) فشار داخل استوانه، منحنی آزادسازی گرما و نیز نمودار دما برای یک احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن نشان داده شده است. احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن به طور مشخص شامل آزادسازی گرمای دو مرحله‌ای است که شامل آزادسازی دما پایین^۵ (که با نام‌هایی مانند واکنش دما پایین، شعله سرد یا احتراق مرحله اول نیز شناخته می‌شود) و آزادسازی دما بالا^۶ (که با نام‌هایی مانند واکنش دما بالا، شعله گرم یا احتراق مرحله دوم نیز شناخته می‌شود) می‌باشد. [۳]



شکل ۱ خصوصیات احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن [۳]

مقایسه‌ای بین روند تغییرات فشار در موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن و بنزینی در شکل (2) آورده شده است. همان گونه که در شکل ملاحظه می‌شود روند افزایش فشار در موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن در طول احتراق نسبتاً شدید است که این امر به علت بروز پدیده خوداشتعالی صورت می‌گیرد. نکته مهم دیگری که از شکل استخراج می‌شود، کوتاه بودن دوره احتراق است که علت اصلی آن شروع احتراق در (تقریباً) سراسر محفظه احتراق به صورت همزمان و عدم وجود جبهه یا پیشروی شعله است. [۳]

¹ Homogenous Charge Compression Ignition

² Spark Ignition

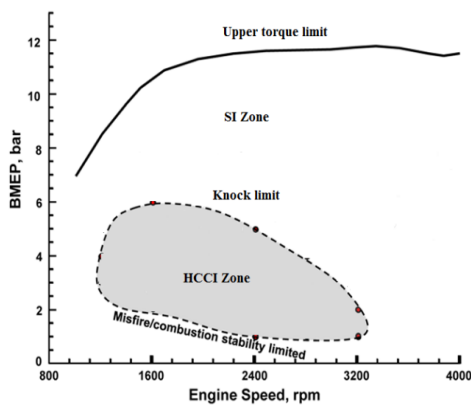
³ Compression Ignition

⁴ Particular Matter

⁵ Low Temperature Heat Release (LTHR)

⁶ High Temperature Heat Release (HTHR)

حاصل از احتراق ترکیب شده و مشکل دیگری یعنی کاهش کارایی سامانه- های تصفیه مجدد مانند مبدل های کاتالیزوری را ایجاد می کند. [۴]

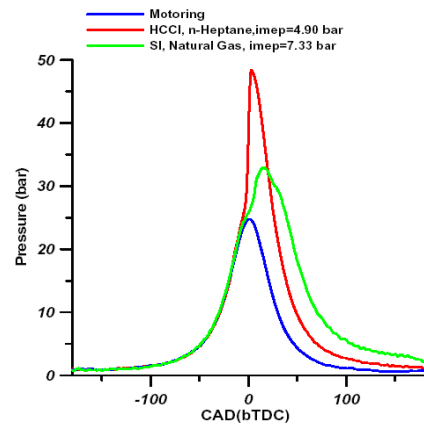


شکل ۳ محدوده عملکردی موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن [۳]

به علاوه، در بارهای ضعیف، بیشینه دمای احتراق کمتر از 1500K است، در نتیجه اکسیداسیون مونواکسید کربن به مونواکسید کربن^۲ نمی تواند صورت گیرد و بازده احتراق به شدت افت می کند. این افت راندمان احتراق با مشکلات اشتعال ترکیب شده و کاربری اشتعال تراکمی سوخت همگن را در بارهای پایین محدود می کند. در بارهای زیاد، جریان هوای ورودی موتور افزایش یافته و گازهای پسماند را از سیلندر به بیرون می راند. در نتیجه میزان رقیق بودن سوخت برای تنظیم نرخ سوختن کافی نیست. در بارهای زیاد، نرخ افزایش فشار بسیار بزرگ است و میزان آلودگی صوتی موتور به طور قابل توجهی افزایش می یابد؛ فرآیند احتراق تقریباً حجم ثابت، تنش های مکانیکی بالایی را نتیجه می دهند و اگر این امر کنترل نشود، ممکن است به موتور آسیب برسد. [۳]

تلاشهای اولیه در زمینه اشتعال تراکمی سوخت همگن روی موتورهای بنزینی انجام شده و امروزه نیز این فناوری در حد قابل قبولی است. از اواسط ۱۹۹۰ بررسی روی موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن سوخت دیزل نیز با توجه به استانداردهای روز افزون و سخت گیرانه محیط زیست آغاز شد. با توجه به مشکلاتی از قبیل روشن شدن سرد و کنترل نرخ احتراق در موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن در بارهای زیاد، استفاده از سامانه احتراق دو گانه محدود می شود. استفاده از اشتعال تراکمی سوخت همگن برای بارهای کم و متوسط بر روی موتورهای دیزل با پس پالایش^۵ همخوانی دارد. همچنین، وقتی با بارهایی بیش از حد تعیین شده در اشتعال تراکمی سوخت همگن مواجه هستیم یعنی در کامیونها و وسایل نقلیه سنگین، عمل کردن به عنوان موتور دیزل بازده و سود زیادی برای ما خواهد داشت به علاوه موتورهای دیزل از لحاظ تعمیر و نگهداری قابل اعتماد تر و با صرفه تر از موتورهای اشتعال جرقه ای هستند. [۵]

به عنوان نتیجه، هر موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن واقعی برای کاربرد در اتومبیل های سواری باید به صورت موتور چندگانه کار کند. در حالت میانی سیکل کاری موتور به صورت اشتعال تراکمی سوخت همگن کار می کند ولی در بارهای زیاد و بارهای بسیار پایین، موتور به یکی از انواع رایج دیگر اشتعال جرقه ای یا دیزل تبدیل می شود. بنابراین شاید بزرگترین مسأله موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن، کنترل فازهای احتراق در



شکل ۲ مقایسه روند تغییر فشار در یک موتور بنزینی با موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن [۳]

طبیعت بدون جهت شعله و توانایی رقیق سوزی بالای احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن منجر به احتراقی با دمای پایین می شود. در نتیجه مقدار آلایندة اکسیدهای نیتروژن بطور چشمگیری کاهش می یابد. به منظور کنترل نرخ آزاد سازی انرژی، موتور باید بسیار رقیق یعنی با درصد گازهای پسماند و بازخورانی گازهای برگشتی بالا، کار کند. میزان رقیق بودن به حدی بالاست که موتور بدون درجه گاز^۱ کار می کند. در نتیجه کار تلمبه ای به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد که موجب بهبود مصرف سوخت می شود. همچنین رقیق بودن مخلوط، به طور قابل توجهی دمای بیشینه گازهای سوخته را کاهش می دهد که در نتیجه اتلاف حرارتی سیکل بسته کاهش یافته و متعاقباً راندمان حرارتی اندیکاتوری مانند موتورهای دیزل به سطح بالایی افزایش می یابد. اما برخلاف موتورهای دیزل، احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن کم و بیش به صورت همگن صورت می گیرد. از آنجایی که سوختن انتشاری^۲ مخلوط غنی وجود ندارد، آلودگی ذرات معلق نزدیک به صفر است. با توجه به موارد ذکر شده، یک موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن دارای پتانسیل بالای صرفه جویی در مصرف سوخت نسبت به موتورهای دیزل است در حالی که سطح آلایندگی اکسیدهای نیتروژن پایین تری نسبت به موتورهای اشتعال جرقه ای رایج دارد. [۴]

از طرف دیگر، این نوع احتراق دارای معایبی مانند؛ میزان بالای آلایندگی مونواکسید کربن و هیدروکربن های نسوخته، حوزه کاری محدود و مشکلات کنترل فازهای احتراق می باشد. همانطور که در شکل (۳) دیده می شود، احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن در بارهای زیاد توسط کوبش و در بارهای جزئی توسط احتراق ناقص^۳، به دلیل کم بودن انرژی گرمایی برای شروع خود اشتعالی مخلوط سوخت و هوا، محدود می شود. در سامانه های احتراق مخلوط همگن، مانند همه سامانه ها، بخش مهمی از سوخت داخل سیلندر طی مرحله تراکم در نواحی بین رینگ ها ذخیره شده و از سوختن فرامی ماند. اما برخلاف موتورهای اشتعال جرقه ای رایج، دمای گاز سوخته بسیار پایین است و نمی تواند میزان زیادی از این مخلوط را که طی مرحله انبساط به داخل استوانه برمی گردد را بسوزاند. این امر باعث افزایش قابل توجهی در آلودگی مونواکسید کربن و هیدروکربن نسوخته نسبت به موتورهای اشتعال جرقه ای رایج می شود. این مسأله با دمای پایین گازهای

¹ Exhaust Gas Recirculation
² Throttle
³ Diffusion Combustion
⁴ Misfire

⁵ After treatment

دما و ترکیب مخلوط در لحظه بسته شدن دریچه‌های ورودی
 - سطح بالای رقیق‌سازی به‌منظور به دست آوردن دماهای بالای موردنیاز برای خودسوزی
 - اختلاط یکنواخت بین مخلوط تازه و مخلوط پسماند؛
 - روبش^۴ تکرارپذیر سیکل به سیکل.

عملکرد اشتعال تراکمی سوخت همگن نمی‌توانست در بارهای کم و بارهای زیاد به دست آید؛ اگرچه مقدار زیادی از گازهای پسماند در بارهای کم وجود دارد اما دمای گازهای خروجی به‌قدری پایین است که خود اشتعالی نمی‌تواند رخ دهد. به‌طور مشابه در بارهای زیاد مخلوط تازه گازهای پسماند را به بیرون می‌راند و مجدداً دما به‌اندازه کافی برای ایجاد خود اشتعالی بالا نیست؛ اما احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن پایدار بین این دو ناحیه در موتورهای بنزینی با نسبت تراکم 17.5:1 و محدوده دور موتور 1000-4000 rpm می‌توانست اتفاق بیافتد.[8]

ناگویی و همکاران کار آزمایشگاهی بر روی احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن را در شرکت توپوتا انجام دادند. آن‌ها دریافتند که احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن برای موتورهای دوزمانه در حالت نیمه بار^۵ بسیار مناسب است و درحالی‌که نرخ کلی سوختن بسیار سریع است، احتراق بسیار نرم صورت گرفته و موتور دارای مصرف سوخت عالی و آلایندگی پایین هست. همچنین آن‌ها نشان دادند که اشتعال در نقاط بی‌شماری از استوانه اتفاق افتاده و هیچ‌گونه جبهه شعله مشخصی طی مرحله احتراق دیده نمی‌شود. آن‌ها با استفاده از روش‌های طیف‌نگاری برای آشکارسازی گونه‌های میانی، میزان بالای H_2O ، CHO_2 و رادیکال‌های O را در داخل استوانه درست قبل از خود اشتعالی اندازه گرفتند. این گونه‌ها مشخصه شیمی احتراق دماپایین در سوخت‌های با هیدروکربن پارافینی است. بعداً این‌که اشتعال صورت گرفت آن‌ها غلظت بالای رادیکال‌های H ، CH و OH را که نشان‌دهنده شیمی احتراق دما بالا در سوختن توده‌ای است، مشاهده کردند. این‌گونه تا نسبتاً مشابه گونه‌هایی بودند که در هنگام خود اشتعالی گاز انتهایی و کوبش در موتورهای اشتعال جرقه‌ای به وجود می‌آمدند و در نتیجه شباهت بیشتری بین این نوع احتراق و خود اشتعالی در موتورهای اشتعال جرقه‌ای نشان داده شد[۹]. اولین بار نجت و فاستر در سال ۱۹۸۳ مفهوم احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن را برای موتورهای چهارزمانه تحت عنوان اشتعال تراکمی همگن مخلوط گسترش دادند و تلاش کردند که به درک بیشتری از فیزیک نهفته در احتراق اشتعال تراکمی همگن مخلوط دست یابند[۱۰]. آن‌ها آزمایش‌هایی با انواع مخلوط سوخت‌های پارافینی و آروماتیک در محدوده سرعت موتور و نسبت هوا به سوخت مختلف انجام دادند. از آنجایی‌که موتور چهار هنگامه بدون مزیت گازهای پسماند مانند آنچه در موتورهای دوزمانه وجود داشت کار می‌کرد، برای ایجاد احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن هوای ورودی باید تا دماهای بالا گرم می‌شد. با استفاده از مدل‌سازی سینتیک شیمیایی ساده‌شده و بر اساس تجزیه و تحلیل حرارت آزادشده از داده‌های فشار، آن‌ها توانستند نشان دهند که فرآیند احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن

سرعت‌ها و محدوده بارهای مختلف موتور باشد؛ زمان‌بندی خوداشتعالی توسط دما، فشار و ساختار مخلوط طی مرحله تراکم کنترل می‌شود؛ بنابراین باید به دقت کنترل شوند تا زمان‌بندی بهینه خود اشتعالی به‌دست‌آید. دست‌یافتن به سطح کنترل مورد نیاز طی کارکرد موتور در حالت گذرا بسیار مشکل است و بر خلاف احتراق اشتعال جرقه‌ای مرسوم هیچ وسیله‌ای برای جهت ایجاد احتراق به صورت مستقیم وجود ندارد. یعنی هیچ وسیله‌ای برای جلوگیری از احتراق ناقص^۱ وقتی که شرایط دمایی و ترکیب مخلوط در هنگام بسته شدن سوپاپ ورودی دلخواه نباشند، وجود ندارد. در نهایت، قابلیت کنترل فاز احتراق در بارهای کم و نرخ آزادسازی انرژی کل در بارهای زیاد، کلید موفقیت در توسعه موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن است.[۳]

بیش از ۱۰۰ سال است که اشتعال تراکمی سوخت همگن به‌عنوان کنترل‌کننده سیستم جرقه‌زنی خودکار شناخته‌شده است. اولین اختراع ثبت‌شده در این زمینه مربوط به یک موتور دو زمانه حباب داغ روغنی بوده که توسط کارل. دلبیو. وایس در سال ۱۸۹۷ به ثبت رسیده است [۶]. در موتور وایس، نفت سفید یا سوخت خام روی حباب داغ پاشیده می‌شد تا یک مخلوط همگن را در پیش‌محفظه گرمکن ایجاد کند. سپس مخلوط هوا - سوخت آماده شده از این محفظه به سیلندر وارد و مخلوط در داخل محفظه اصلی دچار خود اشتعالی می‌شد. نیکولای سیمونوف، دانشمند روسی و همکارانش اولین تحقیق تئوری و عملی را روی کنترل سینتیک شیمیایی موتورهای دیزل در سال ۱۹۳۰ انجام دادند. بعدها در ۱۹۷۰، سیمونوف و گوساک اولین موتور احتراق سیستم جرقه‌زنی خودکار را ساختند که در این موتور احتراق با استفاده از گونه‌های فعال تخلیه‌شده از احتراق جزئی مخلوط در یک پیش محفظه احتراق کنترل می‌شد [۷]. شناخته‌شده‌ترین و اولین تحقیق نظام‌مند روی سیستم جرقه‌زنی خودکار در اواخر دهه ۷۰ و توسط اونیشی و ناگوچی روی موتورهای دوزمانه انجام شد. اولین بار اصطلاح احتراق ترمو اتمسفری فعال^۲، توسط اونیشی و همکارانش در سال ۱۹۷۹ به‌عنوان روشی جایگزین برای احتراق در موتورهای دو زمانه به کار گرفته شد. اشکال موتورهای دو زمانه، سطح بالای گازهای پسماند در بارهای کم و تمایل به احتراق بعد از خاموش کردن موتور است [۸]. اونیشی و همکارانش این اشکالات را با یافتن نوعی از احتراق که هم به سطح بالای گازهای پسماند و هم به دمای بالای مخلوط اولیه تکیه دارد، به‌خوبی حل کردند. آن‌ها فهمیدند که می‌توان به میزان زیادی آلایندگی را کاهش داده و مصرف سوخت را کم کرد و این امر زمانی رخ می‌دهد که احتراق خود به خودی در مخلوط داخل استوانه اتفاق بیافتد. مشکل اساسی دیگر در موتورهای دو زمانه، این است که موتور در بارهای کم دارای نوسانات چرخه‌ای بالایی است و وقتی موتور در حالت احتراق ترمو اتمسفری فعال کار می‌کرد، از میزان نوسانات چرخه‌ای به‌طور قابل‌توجهی کاسته می‌شد. با مشاهده فرآیند احتراق در یک موتور نوری^۳، آن‌ها فهمیدند که در این نوع احتراق هیچ‌گونه پیشروی جبهه شعله قابل‌تشخیصی وجود ندارد؛ در عوض آن‌ها الگوی خوبی از تغییرات چگالی و واکنش احتراقی تدریجی در سرتاسر اتاق احتراق و در طی مرحله احتراق مشاهده کردند.

اونیشی و همکارانش، پارامترهای بحرانی برای به دست آوردن احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن را به‌صورت زیر تشخیص دادند:

¹ Misfire

² Active Thermo-Atmospheric Combustion

³ Optical Engine

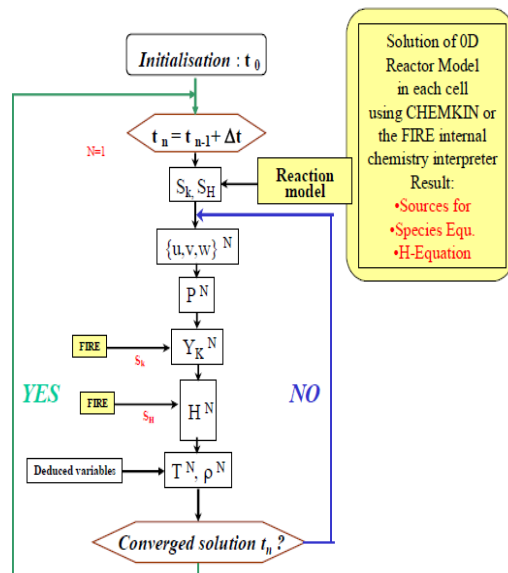
⁴ scavenging

⁵ Part Load

اعتبار سنجی مدل

در این مطالعه از یک مدل عددی یکپارچه برای شبیه سازی احتراق موتور احتراق تراکمی سوخت همگن استفاده شده است. احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن به همراه سینیتیک مفصل شیمیایی به منظور در نظر گرفتن مشخصه های احتراقی و همچنین فرایند انتشار مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا از یک مدل چند بعدی محاسبات سینیتیک شیمیایی مشخصه های جریان با استفاده از کد سه بعدی دینامیک سیالاتی محاسباتی AVL Fire کوپل شده با سینیتیک مفصل شیمیایی استفاده شده است.

این کد دینامیک سیالات محاسباتی گونه ها را برای نرم افزار CHEMKN و اطلاعات ترمودینامیکی را برای هر سلول فراهم آورده است. کد CHEMKN اطلاعات گونه های جدید و انرژی آزاد شده را بعد از حل شیمیایی مسئله فراهم می آورد. استراتژی کوپل AVL FIRE و CHEMKN در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ استراتژی کوپل Chemkin و AVL Fire [۱۲]

تأثیر شیمی به این صورت است که برای آغاز هر گام زمانی نرم افزار یک مدل واکنشگر بی بعد را برای هر سلول محاسباتی فراهم می کند. نرم افزار بر اساس نتایج این مدل ترم منبع را برای گونه های معادله های انتقال و معادله آنتالپی محاسبه می کند.

در این پایان نامه یک مکانیزم واکنش سینیتیک مفصل شیمیایی بر اساس کد GRI-MECH 3.0 برای بررسی اکسیداسیون و مشخصات احتراق سوخت متان استفاده شده است. شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی چند بعدی برای بسته شدن سوپاپ ورودی تا باز شدن سوپاپ خروجی^۲ در نظر گرفته شده و برای کاهش زمان محاسبات و به دلیل تقارن هندسی از یک برش ۴۵ درجه مش استفاده شده است.

مش محاسباتی مدل دینامیک سیالات محاسباتی در شکل (۵) نشان داده شده است.

می تواند به دو فرآیند نیمه مستقل اشتعال و آزادسازی حرارت توده ای تقسیم شود. همچنین آن ها نتیجه گرفتند که خود اشتعالی اشتعال تراکمی سوخت همگن توسط همان شیمی دمایی (کمتر از 1000K) که منجر به کوبش در موتورهای اشتعال جرقه ای می شود کنترل شده و آزادسازی انرژی حرارتی توده ای توسط شیمی درجه حرارت بالا (بیشتر از 1000K) که اکسیداسیون مونواکسید کربن بر آن تسلط دارد، اداره می شود. با تکیه بر سینیتیک شیمیایی، آن ها یک همبستگی برای نرخ آزادسازی انرژی حرارتی بسط دادند که پاسخ احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن را در مقابل تغییرات نسبت تراکم، نسبت هم ارزی هوا به سوخت، میزان رقیق بودن، سرعت موتور و نوع سوخت بیان می کند. بر اساس این نتایج و کارهای قبلی صورت گرفته توسط انیشی و ناگوچی، آن ها به این نتیجه رسیدند که احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن یک فرآیند احتراق سینیتیک شیمیایی است که توسط دما، فشار و ساختار مخلوط داخل استوانه کنترل می شود. و فاستر نتیجه گرفتند که برخلاف موتورهای اشتعال جرقه ای معمول که به پیشروی شعله متکی هستند و احتراق دیزل که به شدت وابسته اختلاط هوا و سوخت است، احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن یک فرآیند احتراق کنترل اختلاطی نیست بلکه یک موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن مانند یک واکنشگر شیمیایی احتراق داخلی پویا، رفتار می کند. همچنین آن ها دریافتند که احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن دارای عدم کنترل فرآیند اشتعال و حیطه عملکرد محدود است. این ها همان مشکلاتی بودند که توسط انیشی و ناگوچی در مورد موتورهای دوزمانه اشتعال تراکمی سوخت همگن مشخص شدند. به علاوه چون به منظور رقیق کردن مخلوط از گازهای خروجی برگشتی^۱ استفاده می شود، امکان کمی برای بازیابی رادیکال های فعال به داخل استوانه که باعث خود اشتعالی می شود وجود دارد. در حالی که رادیکال ها نقش اساسی در احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن در موتورهای دوزمانه بازی می کردند، در این کار مطالعاتی نشان داده شد که آن ها برای دستیابی به اشتعال تراکمی سوخت همگن در موتورهای چهارزمانه ضروری نیستند [۱۰].

عنوان اشتعال تراکمی سوخت همگن اولین بار توسط تیرینگ برای جمع بندی و توسعه کارهای انیشی، ناگوچی، نجت و فاستر در زمینه احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن به کار برده شد. او مفهوم اشتعال تراکمی سوخت همگن را در موتورهای چهارزمانه توسط ارزیابی عملکرد یک موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن تک استوانه که با مخلوط کامل بنزین و هوا کار می کرد، توسعه بیشتری داد. محدوده کاری موتور به عنوان تابعی از نسبت هم ارزی هوا به سوخت و میزان بازخورانی گازهای برگشتی نگاشت شد و محدودیت های کاری اشتعال تراکمی سوخت همگن مجدداً عنوان شدند: محدوده کاری موتور به ناحیه نیمه بار محدود می شود و کنترل زمان بندی خود اشتعالی با مشکل همراه است.

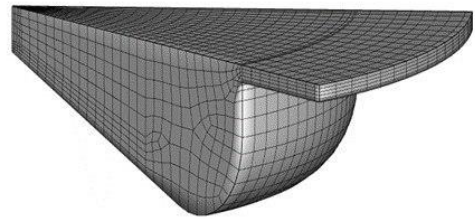
تاکنون بیش از ده عنوان مختلف برای احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن استفاده شده است. وجه مشترک تمامی این عناوین توضیح دو خصوصیت بنیادی فرآیند جدید احتراق است: (۱) مخلوط پیش آمیخته سوخت و هوا و (۲) احتراق خود اشتعالی [۱۱].

² Exhaust Valve Opening

¹ Exhaust Gas Recirculation

بحث روی نتایج

نمودار فشار و نرخ گرمای آزاد شده، در شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷)، با افزایش نسبت هم ارزی، فشار بیشینه و متعاقب آن قدرت خروجی موتور افزایش می یابد. همان طور که در شکل (۸) مشاهده می شود افزایش نسبت هم ارزی موجب به تاخیر افتادن زمان شروع احتراق می گردد. در واقع افزایش نسبت هم ارزی دو اثر متضاد روی احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن سوخت متان دارد. نخست، شدت بخشیدن به احتراق و افزایش نرخ آزادسازی انرژی، که به دلیل افزایش کسر جرمی سوخت اتفاق می افتد؛ اما تاثیر دیگر، با افزایش میزان کسر جرمی سوخت ظرفیت حرارتی آن افزایش می یابد که در نتیجه فشار و دمای انتهای مرحله تراکم کاهش می یابد و موجب می شود دمای مخلوط دیرتر به دمای نقطه خود اشتعالی برسد. تاخیر در اشتعال در حوالی نقطه مرگ بالا نکته مثبتی است که موجب افزایش کار و فشار موثر متوسط اندیکاتوری می شود، اما افزایش بیش از حد نسبت هم ارزی موجب می شود مقداری از کار تولیدی در مرحله انبساط تلف شود.

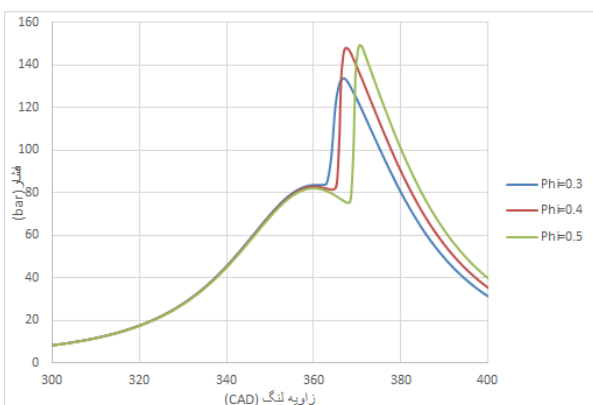


شکل ۵ مش محاسباتی در نقطه مرگ بالا

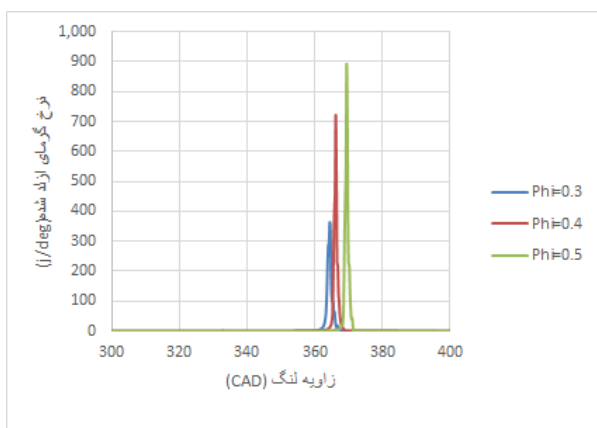
مدل با استفاده از داده های تجربی منتشر شده ی موتور اشتعال تراکمی- سوخت همگن کترپیلار ۳۵۰۰ با سوخت گاز طبیعی اعتبارسنجی شده است. آزمایش های تجربی شامل مطالعات فایولند و همکاران [۱۳] می باشد. مشخصات موتور و شرایط شبیه سازی در جدول (۱) بیان شده است.

CAT 3500	موتور
170 mm	قطر سیلندر
190 mm	طول کورس
17	نسبت تراکم
1500 rpm	سرعت موتور
20 (ABDC)	زمان بسته شدن سوپاپ ورودی
40 (BBDC)	زمان باز شدن سوپاپ خروجی
NG	سوخت
2.1 bar	P بسته شدن سوپاپ ورودی
430 k	T بسته شدن سوپاپ ورودی

جدول ۱ مشخصات موتور کترپیلار ۳۵۰۰



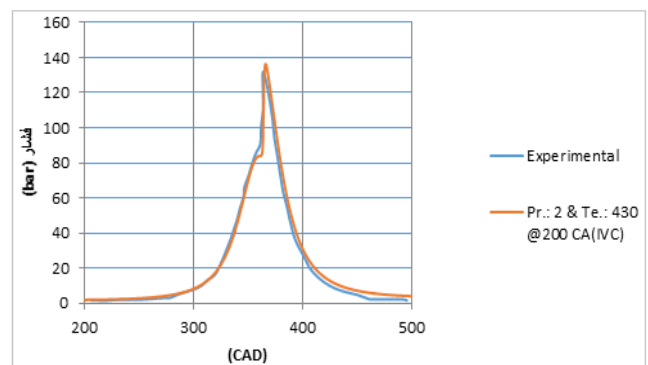
شکل ۷ اثرات تغییر نسبت هم ارزی روی فشار برحسب زاویه لنگ (T_{ivc}=430K, P_{ivc}=2.1bar, N=1500rpm)



شکل ۸ اثرات دمای اولیه مختلف بر تغییرات نرخ آزادسازی انرژی برحسب زاویه ی لنگ

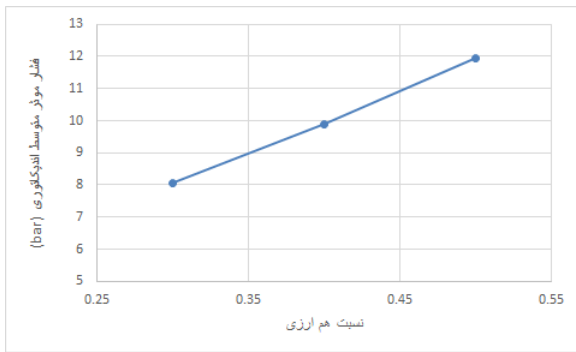
(T_{ivc}=430K, P_{ivc}=2.1bar, N=1500rpm)

با توجه به شکل (۶) منحنی فشار داخل سیلندر به دست آمده از شبیه سازی، تطابق خوبی را با داده های تجربی نشان می دهد. مشاهده می شود که تخمین محل بیشینه فشار و نیز بزرگی آن تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد.



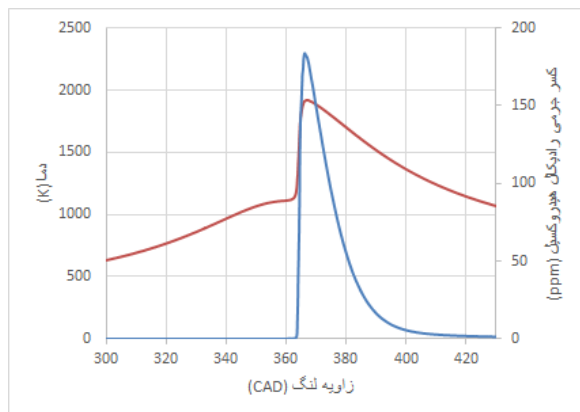
شکل ۶ اعتبار سنجی منحنی فشار داخل سیلندر با داده های آزمایشگاهی

(T_{ivc}=430K, P_{ivc}=2.1bar, N=1500rpm)



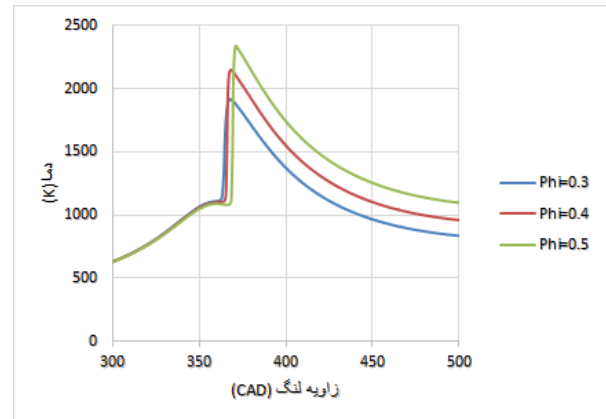
شکل ۱۱ فشار موثر متوسط اندیکاتوری در نسبت های هم ارزی مختلف

ایجاد رادیکال های آزاد همچون رادیکال هیدروکسیل و گسترش آنها ، نقش ویژه ای در فرایند خود اشتعالی مخلوط سوخت و هوا در موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن ایفا میکند. این اهمیت می تواند بعنوان ابزاری برای تعیین کمی زمان شروع احتراق در این نوع موتورها ، مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، می توان زمان شروع احتراق را در نقطه ای تعریف کرد که شیب نمودار غلظت هیدروکسیل به مقدار ، بیشینه خود برسد. شکل (۱۲)، تاییدی بر اهمیت و تاثیر رادیکال هیدروکسیل بر شروع فرایند خود اشتعالی را نشان می دهد. [1]



شکل ۱۲ منحنی دما و کسر جرمی رادیکال هیدروکسیل بر حسب زاویه لنگ

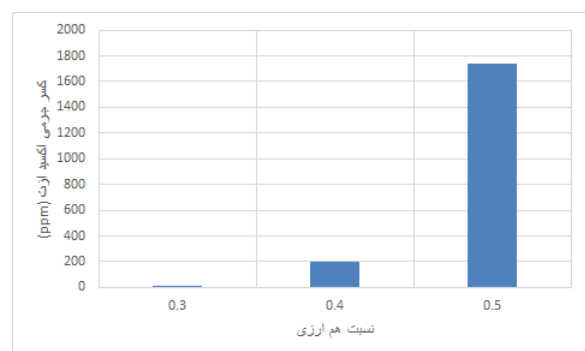
شکل (۱۳) تغییرات کسر جرمی رادیکال هیدروکسیل در نسبت هم ارزی های مختلف را نشان می دهد. با افزایش نسبت هم ارزی، مدت زمان احتراق بیشتر می شود، که به معنای کمتر بودن سرعت واکنش است و در نتیجه مقدار رادیکال هیدروکسیل بیشتری تولید می شود و احتمال پدیده ی کوبش بیشتر خواهد شد.



شکل ۹ اثرات تغییر نسبت هم ارزی روی دما برحسب زاویه لنگ
(T_{ivc}=430K, P_{ivc}=2.1bar, N=1500rpm)

با توجه به شکل (۹) مشاهده می شود که در انتهای مرحله ی تراکم بیشینه دمای ناشی از تراکم با افزایش نسبت هم ارزی کاهش می یابد و موجب جدایش منحنی ها از یکدیگر می شود. با افزایش نسبت هم ارزی و مقدار متان ظرفیت حرارتی این سوخت افزایش می یابد که عاملی برای کاهش دما و در پی آن به تعویق افتادن شروع احتراق، می باشد.

کسر جرمی اکسید ازت در نسبت های هم ارزی مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به افزایش بیشینه دما داخل محفظه احتراق ، با افزایش نسبت هم ارزی ، و همچنین تاثیر پذیری مستقیم اکسید ازت از دما ، کسر جرمی اکسید ازت با افزایش نسبت هم ارزی ، افزایش می یابد. در شکل (۱۱) روند افزایش فشار موثر متوسط اندیکاتوری با افزایش نسبت هم ارزی ، نشان داده شده است.



شکل ۱۰ کسر جرمی اکسید ازت در نسبت های هم ارزی مختلف
(T_{ivc}=430K, P_{ivc}=2.1bar, N=1500rpm)

3- Lu, X., Han, D., Huang, Z., 2011, "Fuel design and management for the control of advanced compression-ignition combustion modes", *Progress in Energy and Combustion Science*, 37: 741e783.

4- Neely, G.D., Sasaki, S., Huang, Y., Leet, J.A., Stewart, D.W., 2005, "New diesel emission control strategy to meet US Tier 2 emissions regulations", *Society of Automotive Engineers*, 2005-01-1091.

5- Hu, G.D., Xu, F., Song, Z.H., 1992, "Premix film type compression ignition combustion", *Society of Automotive Engineers*, 920694.

6- Erlandsson, O., 2002, "Early Swedish Hot-Bulb Engines-Efficiency and Performance Compared to Contemporary Gasoline and Diesel Engines", *SAE Technical Paper*.

7- Gussak, L., Turkish, M.C., Siegla, D.C., 1975, "High chemical activity of incomplete combustion products and a method of prechamber torch ignition for avalanche activation of combustion in internal combustion engines", *SAE Technical Paper*.

8- Onishi, S., et al., 1979, "Active thermo-atmosphere combustion (ATAC)-a new combustion process for internal combustion engines", *SAE Technical paper*.

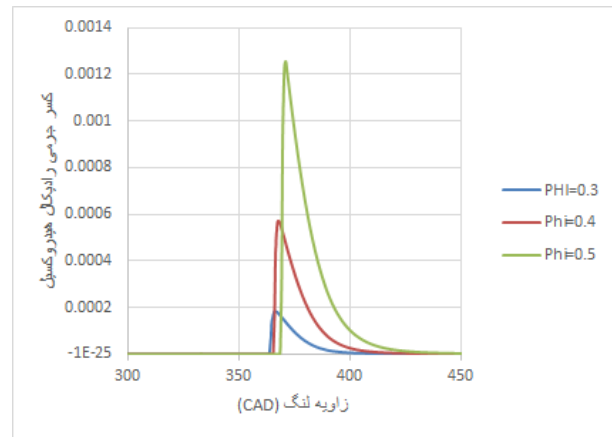
9- Noguchi, M., et al., 1979, "A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion", *SAE Technical Paper*.

10- Najt, P.M., Foster, D.E., 1983, "Compression-ignited homogeneous charge combustion", *SAE Technical paper*.

11- Thring, R.H., 1989, "Homogeneous-charge compression-ignition (HCCI) engines", *SAE Technical paper*.

12- www.cfd-online.com.

13- Fiveland, S. B., Dennis N. Assanis, 2002, "Development and Validation of a Quasi Dimensional Model for HCCI Engine Performance and Emissions Studies under Turbocharged Conditions", *SAE Technical Paper Series*, -01-1757.



شکل ۱۳ اثرات تغییر نسبت هم ارزی روی کسر جرمی رادیکال هیدروکسیل بر حسب زاویه لنگ (T_{ivc}=430K, P_{ivc}=2.1bar, N=1500rpm)

نتیجه گیری

این مطالعه، به بررسی اثر نسبت هم ارزی بر موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن، با استفاده از نرم افزار شبیه سازی AVL FIRE، پرداخته است. کسر جرمی اکسید ازت، فشار موثر متوسط اندیکاتوری و تاثیر رادیکال هیدروکسیل بر فرایند احتراق بعنوان مهم ترین خروجی های این شبیه سازی ارائه شده است.

از اهم نتایج حاصل می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. روش مورد استفاده (استفاده از روش دینامیک سیالات

محاسباتی کوپل با سینتیک مفصل شیمیایی) تطابق خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد؛

۲. در دما و فشار ورودی ثابت، با افزایش نسبت هم ارزی:

- زمان اشتعال به عقب می افتد؛
- دمای بیشینه حاصل از احتراق افزایش می یابد و در پی آن کسر جرمی اکسید ازت به دلیل بالا رفتن دما زیاد می شود؛
- فشار موثر متوسط اندیکاتوری افزایش می یابد.

۳. تولید رادیکال هیدروکسیل، بر کنترل شروع فرایند خوداشتعالی موثر بوده و اهمیت بسزایی دارد.

مراجع

1- Jahanian O., 2011, "Thermodynamic Modeling of Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines Considering Detailed Chemical Kinetics and Controlling Combustion Phenomena with Fuel Blending" PhD Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology.

2- Najt, P.M., Foster, D.E., 1983, "Compression-ignited homogeneous charge combustion", *Society of Automotive Engineers*, 830264.