

بررسی تجربی احتراق و آلاینده های خروجی از یک موتور اشتعال تراکمی راهبرد احتراقی نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی

سعید عبدالملکی^{*۱}

تهران- کیلومتر ۷ جاده مخصوص کرج- شرکت تحقیق طراحی و تولید موتور ایران خودرو

(نویسنده مخاطب: S_abdolmaleki@ip-co.com)

چکیده

احتراق نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی (PCCI) عبارت است از احتراق در موتور اشتعال تراکمی با افزایش مقدار پیش آمیختگی هوا و سوخت به نحوی که مهار احتراق با تنظیم زمان بندی پاشش سوخت انجام می شود. بر اساس کارهای مشابه قبلی، اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق دوده در یک شرایط معین و خاصی از غنا و دما تولید خواهد شد. اگر از این نواحی دور شویم مقدار ذرات معلق دوده و اکسیدهای نیتروژن کاهش خواهد یافت.

در تحقیق حاضر، عملکرد و آلاینده های یک موتور دیزل سواری دور تند که مجهز به سامانه سوخت رسانی فشار بالا، هندسه متغیر پرخوران و سامانه بازگردانی گازهای خروجی بوده است با یک سوخت نفت گاز معمولی از راهبرد احتراقی نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی (PCCI) مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفته است. در این مرحله زمان بندی شروع پاشش (SOI)، فشار مسیر سوخت رسانی، و نرخ EGR برای دست یابی به احتراق PCCI تغییر داده شده است. زمان بندی شروع پاشش اصلی از ۱۰ درجه قبل از نقطه مکث بالا تا ۳ درجه بعد از نقطه مکث بالا تغییر می کند، و مقدار EGR از ۲۰٪ تا ۶۵٪ بررسی شده است. نتیجه ی آزمایش های انجام شده نشان می دهد که با استفاده از این راهبرد احتراقی می توان میزان آلاینده های دوده و اکسیدهای نیتروژن خروجی از موتور را کاهش داد در حالی که مصرف سوخت و آلاینده های مونوکسید کربن و هیدرو کربن های نسوخته افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: دور تند، نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی، بازگردش گازهای خروجی سوخت رسانی پرفشار

۱- مقدمه

به دلیل تغییرات اقلیمی ناشی از ازدیاد آلاینده ها، استفاده از راهبرد احتراقی نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی به دلیل کاهش آلاینده های خروجی بسیار مورد توجه واقع شده است. [۱]

در سال های اخیر استانداردهای آلاینده های خودرو روز به روز سخت گیرانه تر شده اند. استانداردهای آلاینده های اروپا نمونه ای از این استانداردها هستند که در هر مرحله سخت تر شده است. در سال ۲۰۰۵ یورو ۴E.۴ و از سال ۲۰۰۹ استاندارد یورو ۵E.۵ اجباری شده است. [۲]

احتراق نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی (PCCI) عبارت است از احتراق در موتور اشتعال تراکمی با افزایش مقدار پیش آمیختگی هوا و سوخت به نحوی که مهار احتراق با تنظیم زمان بندی پاشش سوخت انجام می شود. آمیختگی هوا و سوخت

- کارشناس ارشد توسعه صحنه گذاری شرکت تحقیق طراحی و تولید موتور ایران خودرو

²Partially Premixed Charge Compression Ignition

³Start of Injection

⁴Euro 4

⁵Euro 5

⁶Partially Premixed Charge Compression Ignition

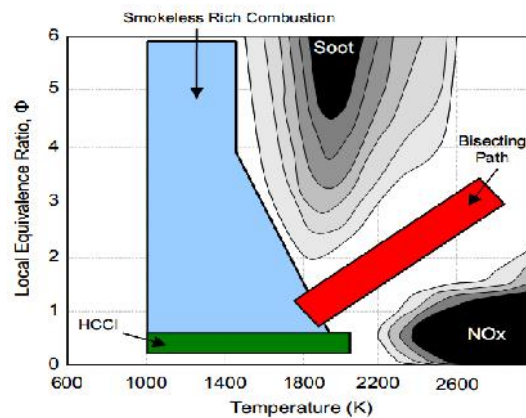
در شعله نفوذی در احتراق معمول موتور دیزل به کندی صورت می گیرد، بنا بر این پیش مخلوط شدن سوخت و هوا قبل از احتراق نفوذی و در زمان شروع احتراق باعث خواهد شد مقدار سوخت سوخته شده در احتراق پیش مخلوط بیشتر از سوخت سوخته شده در احتراق نفوذی باشد و همین مسأله احتراق نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی^۱ را از احتراق معمولی دیزل متمایز می کند. همان طور که در ادامه بحث خواهد شد دست یابی به دمای احتراق خنک تر و مخلوط بهتر، برتری های احتراق نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی است که توانایی زیادی در کاهش همزمان آلاینده های دوده و اکسیدهای نیتروژن دارد. آلاینده های خروجی، مصرف سوخت و صدای حاصل از احتراق مسائلی هستند که در بکارگیری راهبرد نیمه پیش آمیخته در موتور چند استوانه پاشش مستقیم بررسی می شوند.

هدف اصلی در استفاده از راهبرد احتراق نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی کاهش همزمان آلاینده های دوده و اکسیدهای نیتروژن است به گونه ای که بتواند استانداردهای سخت گیرانه آلاینده را که از سال ۱۹۹۲ به بعد وضع شده اند را طی نماید.

در سال ۱۹۵۵ آقایان کیماموتو^۲ و بائه^۳ [۳] یک نقشه ارائه کردند (غنا^۴ در مقابل دما) [-T] که اصول اساسی احتراق پیش مخلوط و دما پایین را شرح خواهد داد. نویسندگان مقاله فوق بیان می دارند که اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق دوده در یک شرایط معین و خاصی از غنا و دما تولید خواهد شد (البته این شرایط، شرایط محلی و نقطه هستند). اعداد بالاتر از یک نشان دهنده غنی بودن سوخت و اعداد کمتر از یک نشان دهنده رقیق بودن مخلوط است. این نقشه در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این تحقیق از نقشه های دیگری که آقای کیمامورا^۱ و دیگران [۴] ارائه کرده اند استفاده شده است. آقای کیمامورا تأثیر ترکیبات سوخت بر جاری شدن ذرات معلق دوده را بررسی نموده است.

ذرات معلق دوده در نواحی تشکیل خواهند شد که نسبت هم ارزی بیشتر از ۲ باشد (نواحی که غنا از سوخت است) و دما نیز باید بین 1600 K تا 2500 K باشد. در مقابل اکسیدهای نیتروژن در دماهای بالاتر از 2200 K و غنا کمتر از ۲ (< 2) تشکیل می شود. اگر از این ناحیه دور شویم مقدار ذرات معلق دوده و اکسیدهای نیتروژن کاهش خواهد یافت. یک ویرایش جدیدتر از نقشه [-T] توسط آکیهاما^۲ ارائه شده است. [۵] این نقشه در شکل ۲ نشان داده شده است.

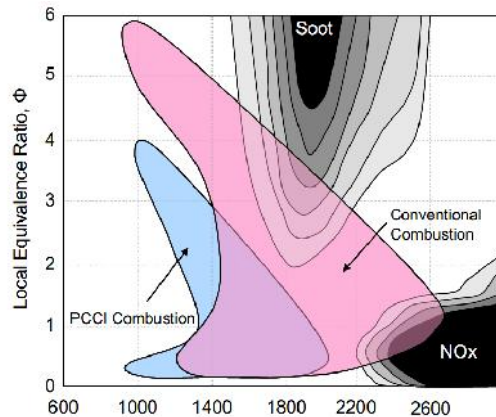


شکل ۱- نواحی تشکیل ذرات معلق دوده و اکسیدهای نیتروژن در نمودار [-T]. [۵]

¹ PCCI
² Kimamoto
³ Bae
⁴ Equivalence ratio
¹ Kimamura
² Akihama

در سال های اخیر احتراق دما پایین دیزل مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است، تا از پتانسیل بالای این سامانه احتراقی در جهت کاهش اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق دوده استفاده شود. بهبود احتراق پیش مخلوط و کم کردن احتراق مهار شونده مخلوطی (MCC) که باعث کم شدن ذرات معلق دوده می شود که معمولاً در نقاط غنی از سوخت و در مرکز اسپری تشکیل می شوند. [۶]

در موتورهای با احتراق نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی ($PCCI$) مهار احتراق با راهبردهای مختلف پاشش مهار می شود. این راهبرد همانند احتراق دیزل است. با این تفاوت که درصد بیشتری از مخلوط ورودی قبل از اشتعال پیش مخلوط می شود. راهبردهای مختلفی برای پاشش در موتورهای $PCCI$ است ولی اغلب از راهبرد پیش انداختن زمان بندی پاشش و نرخ بالای گازهای برگشتی مورد استفاده قرار می گیرد تا اکسیدهای نیتروژن را کاهش و همچنین تأخیر در اشتعال را افزایش دهد.



شکل ۲ نمودار $[T -]$ که به صورت ساده نشان می دهد که احتراق در موتور دیزل معمولی و $PCCI$ در چه نواحی رخ می دهد. این نمودار اثر افزایش بازگردانی گاز خروجی و همچنین اثر افزایش پیش مخلوط شدن هوا و سوخت را بر احتراق $PCCI$ بوضوح نشان می دهد [۷]

همان طور که در شکل های ۱ و ۲ مشاهده می شود، راه حل های مختلفی برای جلوگیری از تشکیل ذرات معلق دوده و اکسیدهای نیتروژن وجود دارد. احتراق $PCCI$ عبارت است از افزایش مقدار پیش آمیختگی مخلوط سوخت و هوا در مقایسه با احتراق معمولی بیشتر است و مهار احتراق با استفاده از راهبردهای مختلف پاشش انجام می شود.

در شکل ۲ نواحی احتراق معمولی دیزل و احتراق $PCCI$ مشخص شده است. در این شکل اثر افزایش EGR و همچنین بهبود مخلوط شدن هوا و سوخت نقطه ای یکنواخت تر است و دماها نسبت به احتراق موتور دیزل پایین تر است. اگرچه مطالعات بسیاری بر روی احتراق پیش مخلوط انجام شده است ولیکن فقط تعداد محدودی از این پژوهش به صورت عملی و بر روی یک موتور واقعی انجام شده است. [۹]

در زیر سه راهبرد پیشنهادی برای دست یابی به احتراق $PCCI$ بررسی می شود:

- ۱- روش سینتیک تعدیل شده^۱ را که به صورت مفهومی کیمامورا و دیگران [۷ و ۹] برای اولین بار ارائه کرده اند که در این نوع احتراق اثر افزایش نرخ گازهای برگشتی، افزایش فشار پاشش، نرخ گردباده^۲ شدید و همچنین به تأخیر انداختن زمان بندی پاشش سوخت (نزدیک به نقطه مکث بالا، و یا حتی بعد از آن) جهت دستیابی به دمای احتراق خنک تر و محدود کردن تشکیل اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق دوده تشکیل شده است.
- به دلیل به تأخیر انداختن احتراق، دمای گازهای داخل استوانه پایین است و سعی شده است از تجزیه حرارتی سوخت جلوگیری شود و این مسأله باعث کاهش دوده می شود.

¹ Modulated Kinetics

² Swirl

نکته کلیدی در اصول اولیه سینتیک تعدیل شده بر این اساس است که مهلت اشتعال بیشتر از مدت زمان پاشش سوخت می شود، به گونه ای که تمامی سوخت با هوا قبل از اشتعال بخوبی مخلوط می شود. البته این مسأله باعث محدود کردن مقدار پاشش سوخت می شود و در نتیجه فشار معین مسیروسخت و در نتیجه محدود کردن بار موتور خواهد شد.

البته نسل سامانه های سنتیک تعدیل شده در یک بازه بزرگتر از نقاط عملکرد موتور قابل اجراست و حتی ۱۰ الی ۱۵ قسمت از چرخه استانداردهای رانندگی شهری ژاپن را در بر می گیرد. [۵]

متأسفانه همه موتورهای تولید شده قادر نیستند که نسبت گردباده مورد نیاز را تأمین کنند و موتوری که در این آزمون مورد استفاده قرار گرفته دارای راهکارهایی که بتواند چنین گردبادهی را ایجاد کند نیست. از محدودیت های دیگر این سامانه کی این است که دمای گازهای برگشتی و هوای ورودی باید تا حد امکان پایین باشد و همچنین نسبت تراکم موتور آنقدر زیاد باشد که از تزریق زود هنگام سوخت جلوگیری کند.

۲- سامانه احتراقی توده یکنواخت (UNIBUS) ^۳ که توسط شرکت تویوتا پیشنهاد شده که در آن از راهبرد زیر استفاده شده است.

پیش انداختن زمان پاشش سوخت (به طور مثال از ۳۶ درجه قبل از نقطه مکث بالا تا ۵۴ درجه قبل از نقطه مکث بالا) که در ادامه آن یک تزریق تأخیری محرک ^۴ (به طور مثال ۵ درجه بعد از نقطه مکث بالا) جهت ایجاد شعله سرد. آن گونه که در مقالات ذکر شده در این احتراق آلاینده اکسیدهای نیتروژن به کمتر از ۷۰ ppm می رسد و ذرات معلق دوده تقریباً صفر خواهد شد. [۱۱]

تزریق سوخت به یک شعله سرد باعث تبخیر سوخت می شود ولی دما آنقدر نیست که شکافت حرارتی سوخت ^۱ سبب افزایش مقدار ذرات معلق دوده می شود. [۹] مد احتراقی UNIBUS تقریباً نیمی از نقشه دوبعدی دور موتور- بار را پوشاند. [۱۱]

ولیکن اگر دمای هوای ورودی افزایش یابد و یا اینکه نسبت تراکم موتور نامناسب باشد نمی تواند باعث جلوگیری از فرآیند احتراق با مهار اختلاط شود. [۱۲]

همچنین یک سامانه مهاری بسیار دقیق لازم است تا زمان بندی تزریق سوخت را به گونه ای تنظیم کند تا از تماس سوخت با دیواره استوانه جلوگیری کند و همچنین فشار پرخورانی باید به قدری زیاد باشد که از نرخ افزایش سریع فشار داخل استوانه جلوگیری کند. [۱۱]

۳- آقای آکیاهاما و دیگران [۶]، احتراق بی دوده ^۲ را ارائه کردند که محدود به غنا نیست. آن ها در مقالاتشان یک نمودار جدید [T-] ارائه نمودند که با دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی محاسبه شده است و دقیق تر نواحی تولید دوده و اکسیدهای نیتروژن را مشخص می کنند که در شکل ۲ ارائه شده است.

احتراق پیش آمیخته همگن اشتعال تراکمی (HCCI) فقط محدوده اندکی از نقاط عملکرد موتور را در بر می گیرد. امکان عملکرد موتور با غنا نقطه ای بسیار بالا نیز امکان پذیر است به شرط اینکه دما گازهای احتراق زیر $1600^{\circ}K$ باشد. مشکل اصلی این موتور احتراقی، محدودیت بار موتور است که به محدودیت رقیق سازی سوخت، محدودیت دمایی و صدای موتور مربوط است. [۶]

سازوکاز اصلی کاهش دوده خروجی در راهبرد احتراقی نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی، کاهش تشکیل دوده است. برای جلوگیری از تشکیل دوده، در نقشه [T-] یک جزیره مشخص شده و فقط برخی از راهبردهای احتراقی قادرند در این جزیره

³ UNI Bulk System

⁴ Later trigger

¹ Thermal Cracking

² Smokeless Combustion

حرکت کنند. استفاده از بازگردانی گازهای خروجی جهت کاهش دما برای دستیابی به راهبرد احتراقی نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی بسیار لازم است.

۲- آزمون های عملی انجام شده

آزمون های موتوری در اتاق آزمون شماره ۳ شرکت ایپکو انجام شده که مجهز به لگام ترمز AC بوده و همچنین فشار داخل استوانه، آلاینده ها و ذرات معلق خروجی از موتور با دقت بسیار خوبی اندازه گیری شده است. شرایط آزمون ها مطابق با استاندارد ISO1585 بوده و مقادیر آلاینده ها و ذرات معلق دوده بر اساس استاندارد ISO8178 تصحیح شده است.

نرخ رهاسازی گرما از داده های فشار داخل استوانه در نرم افزار GT-POWER6.1 محاسبه شده است. چون امکان دسترسی به داده های رایانه موتور فراهم بوده، مراحل پاشش سوخت، فشار پاشش، زمان بندی پاشش سوخت و مقدار گازهای برگشتی بر حسب نیاز تغییر داده شده است.

این آزمون ها در شرایط بار جزئی انجام شده است. در هر مرحله داده های فشار داخل استوانه، مقدار آلاینده های خروجی از موتور اندازه گیری شده است. همچنین مقدار گاز دی اکسید کربن موجود در هوای ورودی موتور اندازه گیری شده و با استفاده از مقدار گاز دی اکسید کربن موجود در هوای ورودی در صد گازهای برگشتی محاسبه می شود. چون که امکان دسترسی به داده های رایانه موتور فراهم بوده، مراحل پاشش سوخت، فشار پاشش، زمان بندی پاشش سوخت و مقدار گازهای برگشتی بر حسب نیاز تغییر داده شده است.

جدول ۱. مشخصات موتور تحت آزمون

سامانه احتراق	اشتعال تراکمی	
تعداد استوانه	۴	عدد
حجم نامی	۱.۵	لیتر
سامانه پاشش	مستقیم	
قطر استوانه	۷۶	میلی متر
طول جایجایی	۸۲.۵	میلی متر
سامانه تنفسی	پرخوران	
سامانه سوخت رسانی	تغذیه از یک ریل	
گشتاور کمینه تمام بار	۱۰۸ (۱۰۰۰ ددد)	نیوتن متر
گشتاور بیشینه تمام بار	۲۵۶ (۱۷۵۰-۲۵۰۰)	نیوتن متر
حداکثر توان	۹۰ (۴۰۰ ددد)	کیلووات
حداکثر فشار داخل استوانه	۱۶۵	بار

همچنین اثر تغییر مقدار گردباده هوای ورودی و کاهش سوراخ های افشانه سوخت در جهت دست یابی به راهبرد احتراقی نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی بررسی شده است.

این آزمون ها شامل سه مرحله است و در هر مرحله برای دست یابی به راهبرد احتراقی نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی اشتعال تراکمی با استفاده از روش سینتیک تعدیل شده استفاده شده است و تلاش شده در هر مرحله با تغییر میزان پارامترهای موثر از جمله تغییر مقدار هوای ورودی، مقدار بازگردش گازهای خروجی، فشار پاشش و ... میزان پیش آمیختگی مخلوط افزایش یابد.

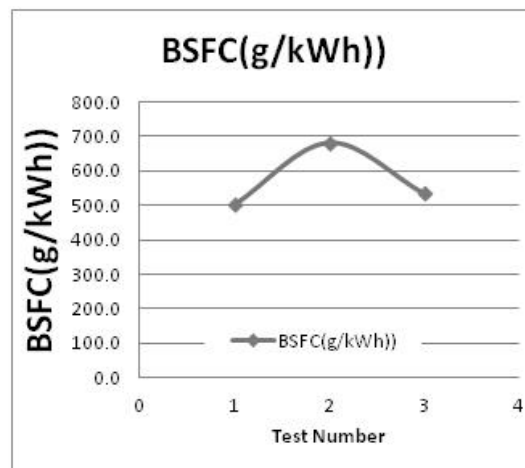
شایان ذکر است در همه نقاط تلاش شده دور موتور و توان خروجی موتور ثابت بماند لذا از آنجا که با تغییر مقدار و زمان بندی پاشش سوخت توان خروجی موتور تغییر می کند پس با تغییر موقعیت پرخوران بازده تنفسی تغییر داده شده تا توان خروجی موتور ثابت بماند.

در همه نقاط با قرار دادن یک سیم پیچ در اطراف افشانه سوخت، زمان دقیق تحریک برقی افشانه نشان داده شده است (این نمودارها فقط زمان تحریک برقی افشانه را نشان می دهد و درباره مقدار سوخت پاشش شده اطلاعاتی نمی دهد). میزان غلظت اکسیژن در هوای ورودی با استفاده از درصد بازگردش گازهای خروجی و میزان غلظت اکسیژن در گازهای خروجی محاسبه شده است.

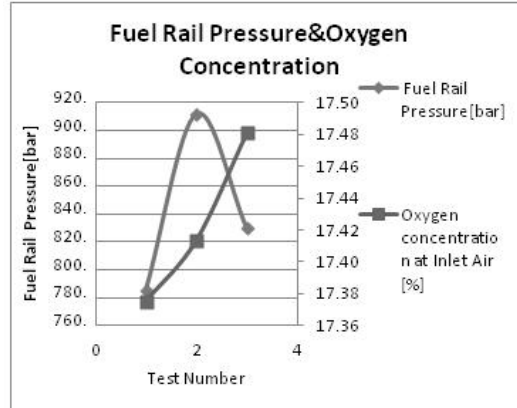
جدول ۲. دور و بار موتور و میزان سوخت پاشش شده در هر مرحله و گردباده هوای ورودی

TEST	Swirl Level	Fuel injected at pilot injection [mg/hub]	Fuel injected at Main injection [mg/hub]	Engine Speed [1/min]	BMEP(kPa)
1	1.8	1.12	2.97	1668	86.3
2	1.8	1.04	5.59	1668	84.27
3	1.55	1.04	3.45	1668	77.43

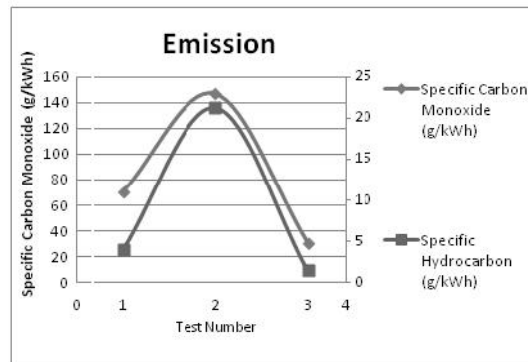
۳- نتایج و بحث



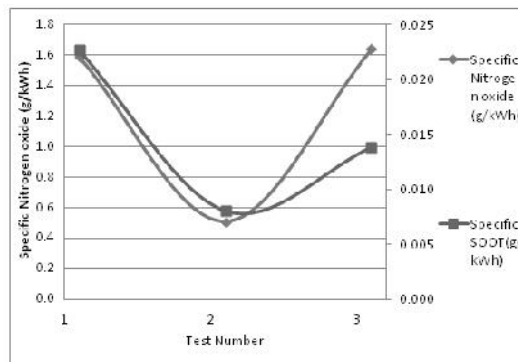
شکل ۳- مصرف ویژه سوخت ترمزی



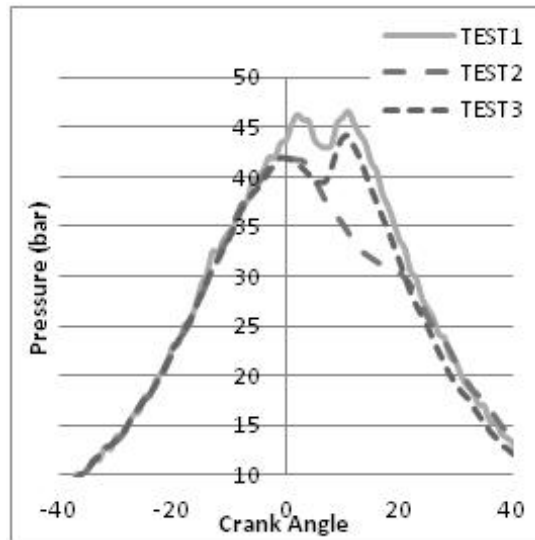
شکل ۴- فشار پشت افشانه سوخت- غلظت اکسیژن در هوای ورودی



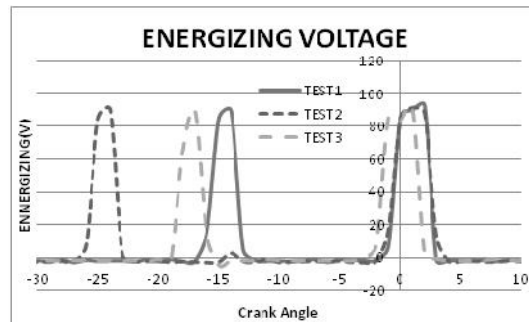
شکل ۵- مقدار آلاینده های خروجی از موتور (مونوکسید کربن و هیدروکربن های نسوخته)



شکل ۶- مقدار آلاینده های خروجی از موتور (اکسیدهای نیتروژن و دوده)



شکل ۷- داده های فشار داخل استوانه

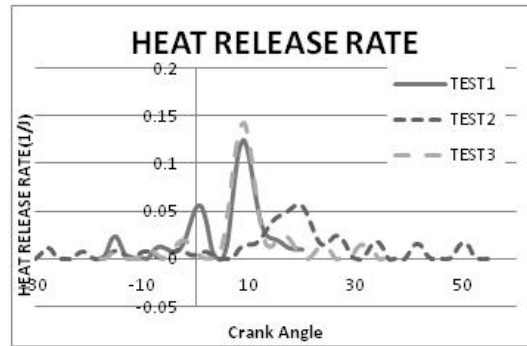


شکل ۸- زمان آغاز و انتهای تحریک برقی افشانه سوخت جهت پاشش سوخت

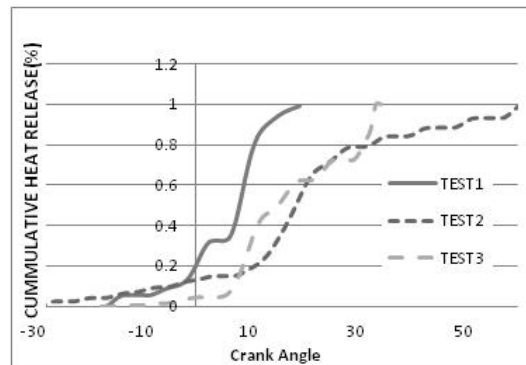
همان طور که در شکل های ۶ و ۷ دیده می شود، اشتعال سوخت در هر سه آزمون بعد از انتهای پاشش شروع شده است ولی در آزمون شماره ۲ در مقایسه با آزمون شماره ۱، مقدار پیش آمیختگی سوخت و هوا بیشتر است چرا که نرخ آزاد سازی گرما آهسته تر است و احتراق به سمت احتراق نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی پیش می رود و مقدار دوده و اکسیدهای نیتروژن به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. البته این موضوع سبب خواهد شد که مقدار مصرف سوخت و آلاینده های هیدروکربن های نسوخته و مونوکسید کربن افزایش یابد که به وسیله واکنشگر شیمیایی دومانظوره به آسانی حذف خواهد شد. در آزمون شماره ۲ نرخ آزادسازی گرما نیز کمتر خواهد شد که به پیش مخلوط شدن هوا و سوخت کمک خواهد کرد. همچنین حداکثر فشار و در نتیجه حداکثر دمای گازهای داخل استوانه کاهش خواهد یافت و همین موضوع سبب کاهش اکسیدهای نیتروژن می شود.

در آزمون شماره ۱ گرما دیرتر آزاد شده و زمان ماندگاری در دماهای بالا زیاد است و همین موضوع سبب شده مقدار دوده و اکسیدهای نیتروژن افزایش یابد.

در آزمون شماره ۳ به دلیل تاخیر بیش از حد، احتمال برخورد فواره سرد سوخت با پیستون وجود دارد که همین عامل سبب افزایش دوده شده است.



شکل ۹- مقایسه نرخ آزاد سازی گرما



شکل ۱۰- مقایسه آزاد سازی گرما

۴- نتیجه گیری

از مجموع نمودارهای بالا نکات زیر برداشت می شود:

با تغییر زمان بندی پاشش در دور های مختلف حداکثر فشار گازهای داخل استوانه، حداکثر نرخ رهاسازی گرما بیشتر شده و تاخیر اشتعال کمتر می شود که در دست یابی به راهکار احتراقی نیمه پیش آمیخته اشتعال ترکیبی به عنوان یک ابزار در اختیار ما قرار خواهد گرفت ولی همانطور که در آزمون شماره ۱ نقطه پنجم دیدیم تغییر زمان بندی پاشش و به تاخیر انداختن فاز احتراق کمک چندانی به ما نخواهد کرد. همچنین در آزمون شماره ۳ به دلیل کم شدن گردباده ورودی نرخ آزاد سازی گرما شدید تر شده و همین عامل سبب شده تمایل به احتراق نیمه پیش آمیخته کمتر خواهد شد.

لیست علائم و نشانه های اختصاری

مخفف	فارسی
CI	اشتعال تراکمی
DI	پاشش مستقیم
DOC	واکنشگر اکساینده دیزلی
DPF	فیلترهای ذرات معلق دیزلی
EGR	سامانه بازگردانی گازهای خروجی
EOC	انتهای احتراق



پنجمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - بهمن ماه ۱۳۹۲



HCCI	احتراق اشتعال تراکمی پیش آمیخته همگن
HPCR	سامانه سوخت رسانی مسیروپرفشار
IC	احتراق داخلی
LNT	تله حبس اکسیدهای نیتروژن
LTC	احتراق دما پایین
MCC	احتراق با مهار اختلاط
MFB	نسبت جرمی سوخته شده
NEDC	چرخه رانندگی اروپایی
PCCI	احتراق نیمه پیش آمیخته اشتعال تراکمی
PM	ذرات معلق
rpm	دور در دقیقه
VGT	هندسه متغیر توربین

۷- منابع

- [1] B. Keeler. Constraints on the Operation of a DI Diesel Engine in Partially-premixed Combustion Mode. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, 2009
- [2] DieselNet: Diesel Emissions Online. Emission Standards: Europe: Cars and Light Trucks. <http://www.dieselnet.com>
- [3] T. Kamimoto and M.-H. Bae. High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines. SAE Paper 880423. Society of Automotive Engineers. 1988
- [4] T. Kitamura, T. Ito, J. Senda and H. Fujimoto. Mechanism of Smokeless Diesel Combustion with Oxygenated Fuels Based on the Dependence of the Equivalence Ratio and Temperature on Soot Particle Formation. International Journal of Engine Research. 3 (4). 223-248. 2002
- [5] K. Akihama, Y. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki and A. Dean. Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature. SAE Paper 2001-01-0655. Society of Automotive Engineers. 2001
- [6] S. Kook, C. Bae, P. C. Miles, D. Choi and L. M. Pickett. The Influence of Charge Dilution and Injection Timing on Low-Temperature Diesel Combustion and Emissions. SAE Paper 2005-01-3837. Society of Automotive Engineers. 2005
- [7] S. Kimura, O. Aoki, Y. Kitahara and E. Aiyoshizawa. Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards. SAE Paper 2001-01-0200. Society of Automotive Engineers. 2001
- [8] S. Kimura, H. Ogawa, Y. Matsui and Y. Enomoto. An Experimental Analysis of Low-Temperature and Premixed Combustion for Simultaneous Reduction of Nitrogen Oxides and Particulate Emissions in Direct Injection Diesel Engines. International Journal of Engine Research. 3 (4). 249-259. 2002
- [9] T. Fang, R. E. Coverdill, F. Chia-fon and R. A. White. Combustion and Soot Visualization of Low Temperature Combustion within an HSDI Diesel Engine Using Multiple Injection Strategy. SAE Paper 2006-01-0078. Society of Automotive Engineers. 2006
- [10] S. Kimura, O. Aoki, H. Ogawa, S. Muranaka and Y. Enomoto. New Combustion Concept for Ultra-Clean and High-Efficiency Small DI Diesel Engines. SAE Paper 1999-01-3681. Society of Automotive Engineers. 1999
- [11] R. Hasegawa and H. Yanagihara. HCCI Combustion in DI Diesel Engine. SAE Paper 2003-01-0745. Society of Automotive Engineers. 2003
- [12] W. L. Hardy and R. D. Reitz. A Study of the Effects of High EGR, High Equivalence Ratio, and Mixing Time on Emissions Levels in a Heavy-Duty Diesel Engine for PCCI Combustion. SAE Paper 2006-01-0026. Society of Automotive Engineers. 2006