

بررسی تجربی تاثیر دمای EGR در فرآیند احتراق، عملکرد و آلایندگی موتورهای دوگانه سوز در بارهای جزئی

اسداله محمدی کوشا
 وهاب پیروزپناه
 رحیم خوشبختی سرای
 مصطفی سلسبیلی

دانشجوی دکترا دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز
 استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز
 استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
 دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

چکیده

موتورهای دوگانه سوز، در شرایط بارهای جزئی دارای عملکرد ضعیف و مقادیر بالای آلایندهای خروجی CO و TUHC می‌باشند. در این راستا، بازخورانی گازهای خروجی (EGR) و دمای آن می‌تواند به عنوان یک روش موثر در بهبود عملکرد و آلایندگی این موتورها در شرایط بارهای جزئی مورد استفاده قرار گیرد. به همین دلیل، به منظور بررسی تاثیر مقادیر مختلف دمای EGR بر روی فرآیند احتراق، عملکرد و آلایندگی این موتورها در شرایط بارهای جزئی، آزمایش‌های تجربی بر روی موتور دوگانه سوز از نوع پاشش غیرمستقیم انجام شد. در این کار، در شرایط بارهای جزئی با ثابت نگه داشتن دبی جرمی سوخت دیزل و سوخت گازی، بخشی از گازهای خروجی با مقدار ثابت برابر با ۱۰ درصد با مقادیر دمایی مختلف بازخورانی شده‌اند و تاثیر آنها روی فرآیند احتراق، عملکرد و آلایندهای منتشره بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دمای EGR، آلایندهای CO و TUHC کاهش یافته ولی آلاینده NOx افزایش می‌یابد. به علاوه پارامترهای عملکردی رفتار بهتری از خود نشان می‌دهند. کلمات کلیدی: موتور دوگانه سوز، احتراق، آهنگ ظاهری گرمای آزاد شده، گاز طبیعی، سوخت آتش‌زا، EGR.

Experimental Investigation of Effect of EGR Temperature on the Combustion Process, Performance and Emission of Dual-Fuel Engines at Part Loads

A. Mohammadi Kousha and V. Piroozpanah

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz

R. Khoshbakhti Saray Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology

M. Salsabili Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz

Abstract

The dual fuel engines at part loads inevitably suffer from lower thermal efficiency and higher carbon monoxide and unburned hydrocarbon emission. In this respect, exhaust gas recirculation (EGR) and its temperature can be used as an effective way to improve the performance and emission parameters of these engines at part load conditions. Therefore, experimental works conducted on an IDI dual fuel engine to investigate the effect of different amounts of EGR temperature on combustion process, performance and emissions of these engines. The amount of EGR conducted into the engine has been 10 percent and different amounts of EGR temperature have been considered. Results of this work show that CO and TUHC emissions reduce and NO_x emission increases very low. Moreover, performance parameters show better behavior in comparison with baseline dual fuel engine (without EGR).

Key words: Dual fuel engine, Combustion, Heat release rate, Natural gas, Pilot fuel, EGR.

۱- مقدمه

با توجه به اینکه در آینده قوانین محدود کننده سطح آلاینده‌ها سخت‌تر خواهد شد و این قوانین برای موتورهای دیزلی کاهش همزمان NO_x و دوده را در بر می‌گیرد. بنابراین در این موتورها برای رسیدن به سطح استانداردهای جدید و سخت‌تر، باید راه حلی پیشنهاد کرد. یکی از راه‌های مناسب و کم هزینه برای این کار، دوگانه سوز کردن موتورهای دیزلی است که توسط پژوهشگران برای جایگزینی عمده گازوئیل با گاز طبیعی و کاهش آلودگی در موتورهای دیزلی پیشنهاد شده است. موتورهای دوگانه سوز، بدون صرف هزینه اضافی انعطاف‌پذیری بهتری را در مصرف انواع سوخت‌های مایع و گازی، نسبت به موتورهای دیزلی از خود نشان می‌دهند و هم چنین آلودگی آنها نسبت به موتورهای دیزلی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱]. در این موتورها به دلیل قابلیت اشتعالی ضعیف گاز طبیعی، همواره مقداری از سوخت دیزل به عنوان منبع اشتعال برای سوخت گازی استفاده می‌شود. گاز طبیعی با هوای تازه در مجرای ورودی پیش آمیخته شده و به صورت مخلوط همگن به داخل محفظه احتراق هدایت شده و یا به کمک افشانه به داخل محفظه احتراق پاشیده می‌شود (NGDI). سپس در معرض اشتعال چند نقطه‌ای ناشی از اشتعال تراکمی سوخت آتش‌زای دیزلی قرار گرفته و نهایتاً پس از طی دوره تأخیر در اشتعال، شعله از نقاط اشتعال شروع شده و در داخل مخلوط همگن گاز طبیعی و هوا انتشار می‌یابد.

به دلیل اهمیت فوق العاده کاهش آلاینده‌ها (دوده در حد صفر) و سخت‌تر شدن قوانین مربوط به آن و هم چنین ملاحظات اقتصادی مربوط به کاهش زیاد در مصرف سوخت موتورها، سعی بر این است که مقدار سوخت دیزلی آتش‌زا در این موتورها به مقدار کمینه برسد. لازمه رسیدن به این هدف استفاده از منبع اشتعال جایگزین برای سوخت گازی می‌باشد. Karim و همکاران وی تحقیقاتی را در مورد امکان اشتعال متان در حضور گازهای باقیمانده داخل سیلندر در دو حالت موتورگردانی (Motoring) و وجود احتراق (Firing) و هم چنین در اثر باز خورانی گازهای اگزوز انجام داده و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از گونه‌های فعال موجود در گازهای

باقیمانده و گازهای اگزوز، امکان اشتعال سوخت گازی وجود دارد [۲ و ۳].

وجود سوخت آتش‌زا، حتی به میزان بسیار کم برای شروع احتراق ضروری است؛ در موتورهای دیزلی تزریق غیر مستقیم (IDI) به علت وجود محفظه احتراق ثانویه حساسیت زیادی به چگونگی پاشش سوخت آتش‌زا وجود نداشته و می‌توان با مقادیر بسیار کم سوخت آتش‌زا مخلوط هوا و سوخت بسیار همگنی ایجاد کرد [۴]. ولی به هر حال در بارهای جزئی، مخلوط هوا و سوخت گاز ورودی به سیلندر خیلی فقیر می‌باشد و از آنجا که در مخلوط‌های بسیار فقیر انتشار شعله به سختی صورت می‌گیرد احتراق دچار مشکلاتی شده و آلاینده‌های CO، TUHC شدیداً افزایش یافته و مصرف سوخت ویژه ترمزی نیز بسیار زیاد می‌شود [۵].

Selim [۶] اثر EGR سرد، بر روی عملکرد و میزان سر و صدای ناشی از موتورهای دوگانه سوز را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از این کار نشان می‌دهد که با افزایش درصد EGR، سر و صدای احتراقی موتور کاهش می‌یابد.

Abd Alla و همکاران [۷] بر روی تاثیر میزان EGR بر عملکرد و آلاینده‌های موتور دوگانه سوز تحقیقاتی انجام داده‌اند که نشان می‌دهد با افزایش رقیق‌سازهای نظیر CO_2 و N_2 و دمای مخلوط ورودی در شرایط بارهای جزئی، عملکرد موتور بهبود می‌یابد و آلاینده‌های CO و TUHC کاهش می‌یابد. استفاده از رقیق‌سازها باعث کاهش O_2 در هوای ورودی به موتور شده که آن هم منجر به افزایش ظرفیت حرارتی بار ورودی (اثر حرارتی) و CO_2 و N_2 شرکت کننده در فرآیند احتراق (اثر شیمیایی) می‌شود. هم چنین در این کار در یک سری آزمایش‌های دیگر دمای بار ورودی به تدریج افزایش داده می‌شد تا بتوانند تاثیر اختلاط EGR داغ با مخلوط سوخت گازی و هوا را مورد بررسی قرار دهند.

پیروزیپناه و خوش‌بختی‌سرای [۸]، تاثیر EGR داغ بر روی احتراق، عملکرد و آلاینده‌های موتورهای دوگانه سوز در شرایط بارهای جزئی را به صورت تئوری با استفاده از یک مدل شبه دو منطقه‌ای مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج حاکی از این است که با اعمال EGR داغ، مقدار EGR لازم برای غلبه بر عملکرد ضعیف این موتورها در شرایط بارهای جزئی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

1- Natural Gas Direct Injection

گاز CO، CO₂، O₂، TUHC و NO_x را در گازهای خروجی از موتور اندازه‌گیری نماید. در ضمن این دستگاه آلاینده Smoke را نیز با روش کدر سنجی در واحد هارتریج (Hartridge) با مقیاس ۱۰۰-۱ اندازه می‌گیرد.

جدول ۱- مشخصات موتور دو گانه سوز

نوع چرخه	چهار زمانه
تعداد سیلندر	۱
نوع پاشش	IDI
قطر سیلندر	۱۱۴/۱ mm
کورس پیستون	۱۳۹/۷ mm
نسبت طول شاتون به شعاع لنگ (L/s/2)	۴
حجم جابجایی سیلندر	۱/۴۳ Lit
نسبت تراکم	۱۷/۵ : ۱
قدرت در rpm	۸ hp
قدرت در rpm	۶ hp
فشار پاشش	۹۱/۷ Kg/cm ²
زاویه شروع پاشش	20° BTDC
زمانبندی سوپاپ‌ها	IVO = 5° BTDC
	IVC = 15° ABDC
	EVO = 55° BBDC
	EVC = 20° ATDC

دستگاه آلاینده سنج مورد استفاده گازهای CO، CO₂ و HC را از روش NDIR (آنالیز با اشعه مادون قرمز غیر پخشی) و برای اندازه‌گیری NO_x و O₂ از روش الکتروشیمیایی استفاده می‌کند. برای اندازه‌گیری فشار درون سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ از اسیلوسکوپ دیجیتالی TNM-DS20080 استفاده شده که از طریق دو کانال فشار درون محفظه احتراق را بر حسب موقعیت زاویه میل لنگ می‌خواند. خروجی ترانسدویسر فشار

از بررسی پیشینه پژوهش مشاهده می‌شود که مطالعات انجام شده در راستای بررسی تاثیر EGR سرد و گرم بر پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی این موتورها بوده است و به بررسی چگونگی فرآیند احتراق و پارامترهای مربوطه چندان پرداخته نشده است. در مطالعه تجربی حاضر تاثیر میزان EGR سرد، گرم و داغ در فرآیند احتراق، با به دست آوردن نمودار فشار اندیکاتوری درون سیلندر مورد توجه قرار گرفته است. با حصول نمودار تغییرات فشار درون سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ و به دنبال آن به دست آوردن مشتق اول و دوم فشار داخل سیلندر می‌توان تأخیر در اشتعال و طول دوره احتراق را تعیین کرد [۹ و ۱۰]. با استفاده از نمودارهای فوق‌الذکر، آهنگ گرمای آزاد شده به دست می‌آید که از این طریق می‌توان چگونگی فرآیند احتراق و تاثیر آن در عملکرد روی آلاینده‌های تولید شده را در بارهای جزئی مورد بررسی قرار داد.

۲- موتور و تجهیزات مورد استفاده

آزمایش‌ها بر روی یک موتور تک سیلندر اشتعال تراکمی با پاشش غیر مستقیم (IDI) مدل LISTER(8-1) انجام شده است. محفظه احتراق ثانوی از نوع چرخشی^۱ است. مشخصات موتور مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است. هوای ورودی به موتور با عبور از یک سوخت‌آما (کاربراتور) با گاز طبیعی به میزان دلخواه مخلوط شده و وارد سیلندر می‌شد. دبی حجمی هوای ورودی با استفاده از روش مخزن و روزنه به دست می‌آمد. دبی گاز طبیعی و سوخت دیزل در هر لحظه به صورت حجمی اندازه‌گیری می‌شد. مقدار EGR، با استفاده از اندازه‌گیری CO₂ در مخلوط ورودی و گازهای خروجی اگزوز با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردید:

$$EGR \% = \frac{CO_{2, intake}}{CO_{2, exhaust}} \times 100 \quad (1)$$

برای اندازه‌گیری میزان آلاینده‌های خروجی از دستگاه آلاینده سنج AVL مدل Dicom4000-class1 استفاده شده است. این دستگاه می‌تواند به طور همزمان غلظت حجمی پنج

1- Swirl chamber

سوپاپ خروجی برای یک سیستم بسته که شرایط آن شبه پایا است (یعنی دما و فشار در هر لحظه در تمام سیستم یکپارچه و یکسان است) رابطه زیر را برای آهنگ خالص گرمای آزاد شده داریم [۱۱].

$$\frac{dQ_n}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، γ نسبت گرمای ویژه است ($\gamma = \frac{c_p}{c_v}$). برای موتورهای دیزلی با مخلوط سوخت و هوای فقیر، Egnell [۱۲] رابطه زیر را برای نسبت گرمای ویژه پیشنهاد می‌کند.

$$\gamma = 1.38 - 0.2 \exp(-900/T(K)) \quad (3)$$

و برای موتورهای با مخلوطهای نزدیک استوکیومتریکی نیز Brunt [۱۳] رابطه زیر را پیشنهاد می‌کند.

$$\gamma = 1.338 - 6.0 \times 10^{-5} T + 1.0 \times 10^{-8} T^2 \quad (4)$$

γ خود تابعی از نسبت هم ارزی و دما می‌باشد ولی در این کار از تاثیر نسبت هم ارزی تا حدودی چشم‌پوشی شده است. چرا که با توجه به نتایج موجود در ادبیات فن مشاهده می‌شود که نسبت هم‌ارزی فقط از لحاظ مقداری بر آهنگ ظاهری آزادسازی انرژی تاثیر می‌گذارد و رفتار آنرا چندان تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. از آنجا که هدف عمده کار حاضر مطالعه رفتار آهنگ ظاهری آزاد سازی انرژی می‌باشد از اینرو، از روابطی برای توصیف γ استفاده شده است که فقط تابع دما بوده و برای دو مرتبه نسبت هم ارزی فقیر و استوکیومتریکی توسعه یافته‌اند.

برای محاسبه γ در این مقاله با استفاده از کد کامپیوتری که به زبان Fortran با فرض مدل ایده آل تک منطقه‌ای نوشته شده و برای شرایط احتراق دوگانه سوز (سوخت دیزل+گاز طبیعی) توسعه داده شده است، دمای لحظه‌ای درون سیلندر برای یک سیکل کاری موتور به دست آمده است و سپس با استفاده از رابطه (۴) برای حالت دوگانه سوز و رابطه (۳) برای حالت دیزل خالص، نسبت گرمای ویژه در هر زاویه میل لنگ برآورد شده و برای محاسبه آهنگ ظاهری گرمای آزاد شده مورد استفاده قرار گرفته است.

پیزوالکتریک و انکودر زاویه میل لنگ، پس از تقویت توسط آمپلی فایرهای مربوطه، توسط اسیلوسکوپ به شکل ولتاژ خوانده شده و به شکل داده بعد از عبور از بورد ADC^۱ به کامپیوتر برای ذخیره سازی تحویل می‌شد. برای اندازه‌گیری فشار از ترانسدوسر پیزوالکتریک Kistler-6123 استفاده شده است.

۳- روش انجام آزمون‌ها

برای انجام آزمون‌ها باید موتور به شرایط پایداری می‌رسید؛ شرایط پایداری زمانی است که دمای گازهای خروجی و غلظت آلاینده‌های خروجی ثابت شود. علاوه بر این دو مورد برای موتور دوگانه سوز دبی حجمی سوخت گازی مصرفی نیز باید به شرایط پایداری می‌رسید. تمامی آزمایش‌ها در دور ۷۳۰ rpm انجام شد زیرا در این دور، گشتاور بیشینه در حالت دیزلی پایه به دست می‌آید.

آزمون‌ها در شرایط سوخت آتش‌زا و سوخت گازی ثابت انجام می‌شد و با تنظیم دمای گرمکن نصب شده در مسیر EGR، دماهای مختلف EGR و به تبع آن دماهای مختلف مخلوط ورودی حاصل می‌شد. درصدهای مختلف EGR با باز و بسته کردن شیر نصب شده در مسیر EGR به دست می‌آمد.

۴- مدل آنالیز (Analysis Model)

برای برآورد آهنگ ظاهری گرمای آزاد شده در هر چرخه، از یک مدل صفر بعدی تک منطقه‌ای ترمودینامیکی آنالیز (مدل تشخیصی) استفاده شده است. برای این کار، با بررسی داده‌های فشار درون سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ طی مراحل تراکم، احتراق و انبساط سیکل عملکردی موتور (از ابتدای بسته شدن سوپاپ ورودی، IVC، تا باز شدن سوپاپ خروجی، EVO)، اطلاعات زیادی درباره فرآیند احتراق موتور می‌توان به دست آورد. با داشتن منحنی تغییرات فشار درون سیلندر می‌توان منحنی آهنگ ظاهری گرمای آزاد شده برای یک سیکل کاری موتور را به دست آورد. با حصول منحنی‌های مشتق اول و دوم فشار داخل سیلندر نسبت به زاویه میل لنگ نیز می‌توان شروع اشتعال، تاخیر در اشتعال و طول دوره احتراق را به دست آورد.

در مدل صفر بعدی تک منطقه‌ای با استفاده از قانون اول ترمودینامیک، از ابتدای بسته شدن سوپاپ ورودی تا باز شدن

۴-۱- هموار سازی داده‌های فشار و مشتقات آن

برای محاسبه مشتق اول و دوم فشار باید منحنی فشار هموار^۱ شود [۱۰]. در غیر این صورت خطای بسیار زیادی در محاسبه مشتقات فشار ایجاد می‌شود. با استفاده از رابطه (۵) فشار و مشتق اول را در دو مرحله هموار می‌کنیم.

$$(P_k)_{smooth} = \sum_{i=-n}^{i=n} \frac{P_{k+i}}{2n+1} \quad (5)$$

در رابطه بالا، n تعداد نقاط قبل و بعد از نقطه k ام است و n برحسب فاصله نقاط نمونه‌برداری از هم تعیین می‌شود. راکوپولس و همکاران [۱۰] برای هموارسازی ملایم، یک درجه میل لنگ قبل و بعد از هر نقطه و برای هموار سازی شدید چهار درجه میل لنگ قبل و بعد از هر نقطه را پیشنهاد می‌کند. در این مقاله، با توجه به اینکه فاصله بین نقاط ۰/۲ درجه میل لنگ است و هموارسازی بر اساس دو درجه میل لنگ قبل و بعد از هر نقطه است، لذا مقدار n برابر با ۱۰ است.

برای محاسبه حجم محفظه احتراق در هر زاویه میل لنگ از رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{S}{2}\right) \cdot \left[1 + n - (n^2 - \sin^2(\theta))^{1/2} - \cos(\theta)\right] \quad (6)$$

در رابطه بالا V_c حجم فضای مرده، D قطر سیلندر، S کورس پیستون و $n = \frac{2L}{S} = 4$ است.

برای مشتق حجم نیز از رابطه زیر استفاده شده است.

$$\frac{dV(\theta)}{d\theta} = \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{S}{2}\right) \cdot \left[\frac{1}{2} \sin(2\theta)(n^2 - \sin^2(\theta))^{-1/2} + \sin(\theta)\right] \quad (7)$$

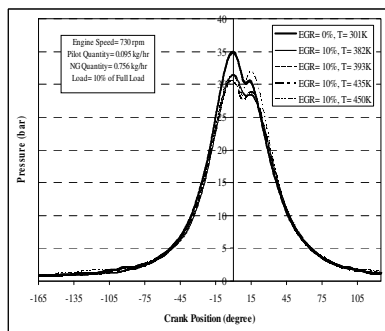
۵- نتایج و بحث بر روی آنها

موتورهای دوگانه‌سوز در شرایط بارهای جزئی، از مخلوط‌های خیلی فقیر استفاده می‌کنند. از اینرو در چنین شرایطی،

محصولات فرآیند احتراق در گازهای خروجی حاوی سوخت نسوخته و گونه‌های فعالی نظیر O.H، O و ... خواهد بود. وقتی که بخشی از این گونه‌های فعال به داخل مخلوط ورودی از طریق سیال EGR هدایت می‌شوند، اثر رقیق‌سازی و شیمیایی آن بر روی فرآیند اشتعال و احتراق قابل توجه خواهد بود. در صورتیکه از EGR داغ استفاده شود، اثر حرارتی نیز به آن دو اثر اضافه شده و تاثیر دوچندان بر روی فرآیند اشتعال و احتراق خواهد گذاشت.

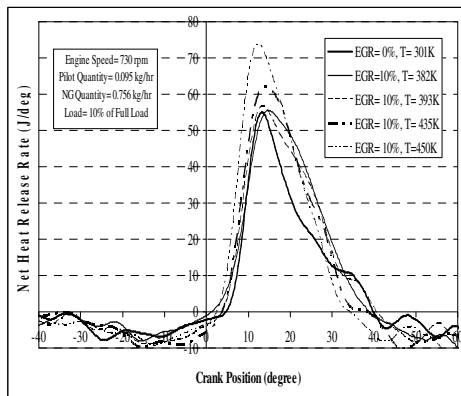
به منظور مطالعه اثر EGR بر روی فرآیند اشتعال، احتراق و به تبع آن بر روی پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی، موتور با ثابت نگه داشتن پارامترهای زیر راه‌اندازی می‌شد: دور موتور، 730 rpm ؛ زمان پاشش سوخت دیزل، 20°CABTDC ؛ مقدار سوخت آتش‌زا، 0.095 kg/hr ؛ مقدار سوخت گازی، 0.0756 kg/hr ؛ مقدار EGR اعمالی، ۱۰٪. در نهایت، با تنظیم دمای گرمکن نصب شده در مسیر EGR، دماهای مختلف EGR و به تبع آن دماهای مختلف مخلوط ورودی در محدوده ۲۹۸ الی ۵۰۰ درجه کلوین حاصل می‌شد.

شکل (۱)، تغییرات فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ به ازای اعمال EGR و دماهای مختلف مخلوط ورودی را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش دمای مخلوط سوخت گازی، هوا و EGR و به تبع آن نسبت هم ارزی، فشار داخل سیلندر افزایش می‌یابد و فشار بیشینه به سمت بعد از موقعیت نقطه مرگ بالا یعنی حصول پارامترهای عملکردی بهتر سوق پیدا می‌کند.



شکل ۱- تغییرات فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ به ازای اعمال EGR و دماهای مختلف مخلوط ورودی

شکل (۴)، تغییرات آهنگ ظاهری گرمای آزاد شده بر حسب زاویه میل لنگ به ازای اعمال EGR و دماهای مختلف مخلوط ورودی را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود با اعمال EGR و افزایش دمای مخلوط ورودی، آهنگ آزادسازی انرژی افزایش یافته و پریود احتراق نیز کوتاه‌تر می‌گردد. با توجه به این نمودار نمایان است که با افزایش بیشتر دمای EGR و غنی‌تر شدن بیشتر مخلوط در نتیجه اعمال EGR، انتشار شعله در آن بهتر انجام می‌شود. از اینرو علاوه بر افزایش میزان انرژی آزاد شده، پایان احتراق نیز زودتر رخ می‌دهد.

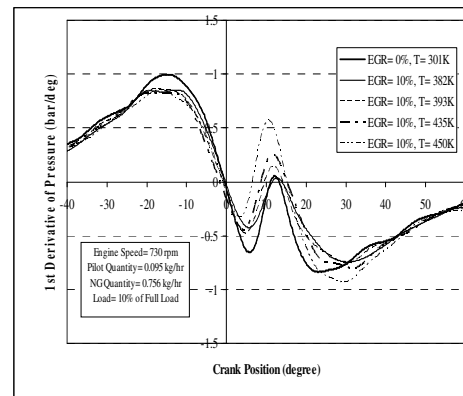


شکل ۴- آهنگ ظاهری گرمای آزاد شده در تغییرات فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ به ازای اعمال EGR و دماهای مختلف مخلوط ورودی

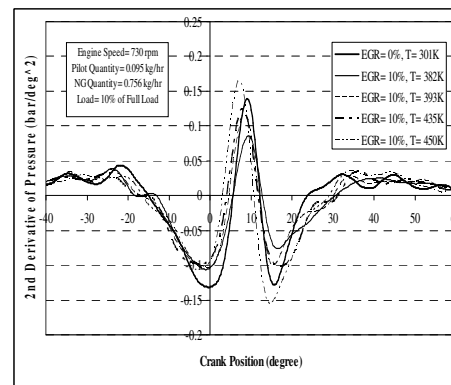
در واقع مخلوط‌های فقیرتر سوخت گازی و هوا باید توسط کشیده شدن به درون قطرات سوخت آتش‌زا محترق شوند و در این مخلوط‌ها انتشار شعله وجود ندارد ولی در مخلوط‌هایی که از حد مشخصی غنی‌تر باشند (مخلوط‌های حاوی EGR) انتشار شعله نیز وجود دارد و این امر باعث می‌شود که در مخلوط‌های ضعیف‌تر (موتور دوگانه سوز پایه)، دوره احتراق و پایان آن طولانی‌تر شود ولی در مخلوط‌های غنی، با افزایش EGR به علت سریع‌تر شدن انتشار شعله، دوره احتراق کوتاه‌تر و پایان احتراق زودتر رخ دهد.

شکل‌های (۵ تا ۷)، به ترتیب تغییرات آلاینده‌های CO، TUHC و NOx را بر حسب دماهای مختلف مخلوط ورودی به ازای اعمال EGR نشان می‌دهند. با توجه به نمودارهای تغییرات آلاینده‌ها مشاهده می‌شود که در کل با افزایش دمای مخلوط

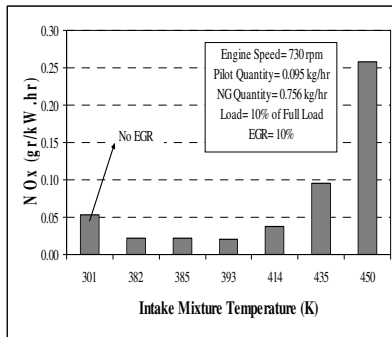
شکل‌های (۲ و ۳)، به ترتیب تغییرات مشتق اول و دوم فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ به ازای اعمال EGR و دماهای مختلف مخلوط ورودی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه موقعیت کمینه مشتق اول بعد از شروع پاشش می‌تواند شروع احتراق را نشان دهد در صورتی که در آن موقعیت کمینه، مشتق دوم فشار برابر صفر و مشتق سوم مثبت باشد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش قوت مخلوط سوخت گازی و هوا به علت غنی‌تر شدن مخلوط در نتیجه اعمال EGR و اثرات مثبت دیگر آن (شیمیایی و حرارتی)، احتراق زودتر شروع می‌شود و در مخلوط‌های فقیرتر، شروع احتراق دیرتر صورت می‌گیرد.



شکل ۲- تغییرات مشتق اول فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ به ازای اعمال EGR و دماهای مختلف مخلوط ورودی

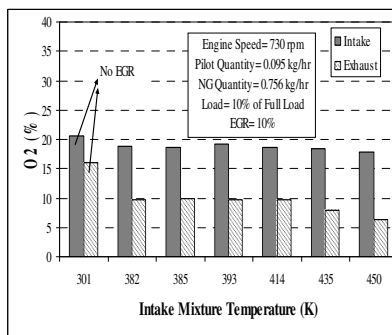


شکل ۳- تغییرات مشتق دوم فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ به ازای اعمال EGR و دماهای مختلف مخلوط ورودی



شکل ۷- تغییرات آلاینده اکسیدهای نیتروژن بر حسب دماهای مختلف مخلوط ورودی به ازای اعمال EGR

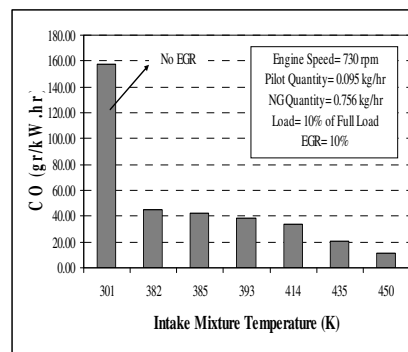
شکل (۸)، تغییرات درصد حجمی اکسیژن در مخلوط ورودی به موتور و گازهای خروجی از آن بر حسب دماهای مختلف مخلوط ورودی به ازای اعمال EGR را نشان می‌دهد.



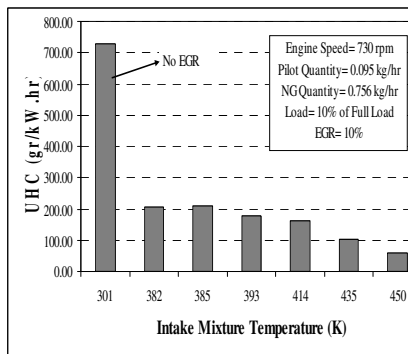
شکل ۸- تغییرات درصد حجمی اکسیژن در مخلوط ورودی به موتور و گازهای خروجی از آن بر حسب دماهای مختلف مخلوط ورودی به ازای اعمال EGR

مشاهده می‌شود که با اعمال EGR و افزایش دمای مخلوط ورودی به موتور، مقدار اندکی از اکسیژن اعمالی به موتور کاسته شده و سهم اکسیژن موجود در گازهای خروجی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در حالی که، در موتور دوگانه سوز پایه، مقدار اکسیژن موجود در گازهای خروجی قابل مقایسه با مقدار اکسیژن اعمالی به موتور می‌باشد. این رفتار بیانگر این است که با اعمال EGR و افزایش دمای مخلوط ورودی به موتور، فرآیند احتراق بهبود یافته لذا میزان مصرف اکسیژن اعمالی به موتور نیز افزایش می‌یابد.

ورودی به ازای اعمال EGR، آلاینده‌های CO و TUHC کاهش می‌یابند ولی آلاینده NOx افزایش می‌یابد. در واقع با اعمال EGR، غنی‌تر شدن مخلوط سوخت گازی و هوا فراهم شده و با افزایش دمای EGR، اثرات شیمیایی و حرارتی آن، در نتیجه حضور رادیکال‌های فعال، واکنش‌های پیش اشتعالی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. از اینرو شروع اشتعال زودتر، انتشار شعله فراگیرتر شده و احتراق کامل‌تری شکل می‌گیرد که باعث کاهش مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود. اکسیدهای نیتروژن در صورتی که هوای اضافی وجود داشته باشد با افزایش دما افزایش می‌یابند. از آنجا که در تمامی نقاط آزمایش، نسبت هم ارزی کل کمتر از حالت استوکیومتری است و هوای اضافی وجود دارد با اعمال EGR و افزایش دمای مخلوط ورودی و بهبود احتراق، دما افزایش یافته و اکسیدهای نیتروژن بیشتری تشکیل می‌شود ولی در کل میزان افزایش آن چندان قابل توجه نیست.



شکل ۵- تغییرات آلاینده مونوکسیدکربن بر حسب دماهای مختلف مخلوط ورودی به ازای اعمال EGR



شکل ۶- تغییرات آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته بر حسب دماهای مختلف مخلوط ورودی به ازای اعمال EGR

۶- نتیجه گیری

در موتورهای دوگانه سوز، بازخورانی گازهای خروجی تاثیر قابل توجهی بر فرآیند احتراق و پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی آنها در شرایط بارهای جزئی دارد. به منظور بررسی تاثیر EGR و دمای آن روی فرآیند احتراق و پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی این موتورها در شرایط بارهای جزئی، آزمایش‌های تجربی بر روی موتور LISTER(8-1) دوگانه سوز از نوع پاشش غیرمستقیم انجام شده است. نتایج حاصل از این کار نشان می‌دهند که:

۱- با اعمال EGR داغ، مقدار EGR لازم برای غلبه بر عملکرد ضعیف موتورهای دوگانه سوز در شرایط بارهای جزئی به مقدار خیلی کمتری (۱۰٪) کاهش می‌یابد.

۲- با اعمال EGR داغ و افزایش دمای مخلوط ورودی، تأخیر در اشتعال کاهش می‌یابد و دوره احتراق کوتاهتر گردیده و به مقدار مناسب خود می‌رسد. هم چنین، آهنگ ظاهری انرژی آزاد شده، افزایش می‌یابد. این رفتار می‌تواند از حضور رادیکال‌های آزاد و اثرات حرارتی و رقیق‌سازی در گازهای اگزوز بازخورانی شده به موتور ناشی شود.

۳- با اعمال EGR داغ و افزایش دمای مخلوط ورودی، آلاینده‌های CO و THC به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابند و خوشبختانه افزایش آلاینده NO_x نیز چندان چشم‌گیر نیست.

۴- پارامترهای عملکردی نظیر توان ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی نیز، با اعمال EGR داغ و افزایش دمای مخلوط ورودی، به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابند.

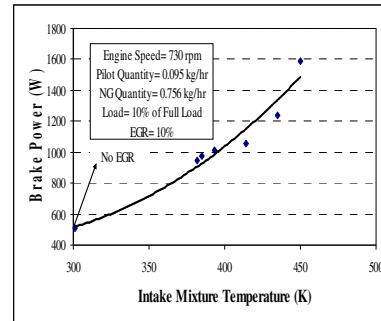
تشکر و قدردانی

از معاونت تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز به خاطر پشتیبانی از کارهای تجربی این مقاله قدردانی می‌گردد.

مراجع

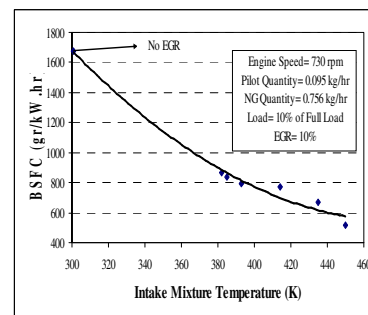
- [1] Callan.T.J. "Dual fuel operation of automotive diesel engine." M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Eng., University of Auckland, 1988.
- [2] Liu, Z. and Karim, G. A. "An Examination of the Role of Residual Gases in the Combustion Processes of Motored Engines Fuelled with Gaseous Fuels", SAE Paper No-961081, 1996.

شکل (۹)، تغییرات توان ترمزی برحسب دماهای مختلف مخلوط ورودی به ازای اعمال EGR را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با اعمال EGR و افزایش دمای مخلوط ورودی، توان ترمزی افزایش چشم‌گیری را از خود نشان می‌دهد. این رفتار در توافق با رفتار منحنی‌های فشار داخل سیلندر و آهنگ آزادسازی انرژی می‌باشد.



شکل ۹- تغییرات توان ترمزی بر حسب دماهای مختلف مخلوط ورودی به ازای اعمال EGR

شکل (۱۰)، تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی برحسب دماهای مختلف مخلوط ورودی به ازای اعمال EGR را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با اعمال EGR و افزایش دمای مخلوط ورودی، مصرف سوخت ویژه ترمزی کاهش چشم‌گیری را از خود نشان می‌دهد. از آنجا که مقادیر سوخت‌های دیزلی و گازی اعمالی به موتور در حالات پایه و اعمال EGR، ثابت نگه داشته می‌شدند لذا می‌توان نتیجه گرفت که بهبود فرآیند احتراق و به تبع آن افزایش توان ترمزی منجر به کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی به میزان قابل توجه می‌شود.



شکل ۱۰- تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی بر حسب دماهای مختلف مخلوط ورودی به ازای اعمال EGR

- [8] Pirouzpanah, V., and Khoshbakhti Saray, R. "Enhancement of combustion process in dual fuel engines at part loads using exhaust gas recirculation", Proc. Instn Mech. Engrs, Part D: J. Automobile Engineering, Vol. 221, pp. 877-888, 2007.
- [9] Stone, R. "Introduction to Internal Combustion Engines", MacMillan, London, 1999.
- [10] Rakopoulos, C.D. and Antonopoulos, K.A. "Experimental heat release analysis and emissions of a HSDI diesel engine fueled with ethanol-diesel fuel blends", Int. Journal of Energy, Vol. 32, pp. 1791-1808, 2007.
- [11] Heywood, J. B. "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1988.
- [12] Egnell R. "Combustion diagnostics by means of multi zone heat release analysis and NO calculation", SAE Paper No: 981424, 1998.
- [13] Ceviz, M.A. and Kaymaz, I. "Temperature and air-fuel ratio dependent specific heat ratio functions for lean burned and unburned mixture", Int. Journal of Energy Conversion & Management, Vol. 46, pp. 2387-2404, 2005.
- [3] Wong, Y. K. and Karim G. A. "An Analytical Examination of the Effects of Exhaust Gas Recirculation on the Compression Ignition Process of Engines Fuelled with Gaseous Fuels", SAE Paper No.961936, 1996.
- [4] Liu, C., Karim G. A., Xiao, F. and Sohrabi, A. "An Experimental and Numerical Investigation of the Combustion Characteristics of a Dual Fuel Engine with a Swirl Chamber", SAE Paper No. 2007-01-0615, 2007.
- [5] Abd Alla, G.H., Soliman, H.A., Badr, O.A. and Abd Rabbo, M.F. "Effect of pilot fuel quantity on the performance of a dual-fuel engine", Int. Journal of Energy Conversion & Management, Vol. 41, pp. 559-572, 2000.
- [6] Selim, M.Y.E. "Effect of exhaust gas recirculation on some combustion characteristics of dual fuel engine", Int. Journal of Energy Conversion & Management, Vol. 44, pp. 707-721, 2003.
- [7] Abd Alla, G. H., Soliman, H.A., Badr, O.A., and Abd Rabbo, M.F. "Effect of diluent admissions and intake air temperature in exhaust gas recirculation on the emissions of an indirect injection dual fuel engine", Int. Journal of Energy Conversion & Management, Vol. 42, pp. 1033-1045, 2001.