

بررسی آزمایشگاهی اثر بازخورانی گاز اگزوز و افزودن گاز طبیعی بر آلاینده دوده در موتور دیزل تزریق غیر مستقیم در گشتاور بالا

غلامرضا گوجه حصاری

دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک - دانشگاه فردوسی

gh.gojehhesari@mail.um.ac.ir

محسن قاضی خانی

استاد گروه مکانیک - دانشگاه فردوسی

Ghazikhani@ferdowsi.um.ac.ir

یونس بیات

دانشجوی دکتری مکانیک - دانشگاه فردوسی

yoonesbayat@yahoo.com

چکیده

در این کار، به صورت آزمایشگاهی اثر افزودن گاز طبیعی بر آلاینده دوده و مصرف مخصوص سوخت، در یک موتور دیزل تزریق غیر مستقیم مجهز به بازخورانی بررسی می شود. بازخورانی گاز اگزوز یک روش مرسوم برای کاهش اکسیدهای نیتروژن در موتور است. استفاده از این روش به دلیل ایجاد کاهش در دمای سیلندر و همچنین مقدار هوای وارد شده به آن، ممکن است آثار نامطلوبی بر مقدار آلاینده دوده داشته باشد. لذا در این تحقیق به منظور ایجاد کاهش در دوده، از گاز طبیعی به عنوان یک سوخت کمکی استفاده شده است. آزمایش ها برای سرعت های ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و در حالت ۷۵ درصد گشتاور کامل در هر سرعت انجام گرفته است. نتایج حاکی از کاهش آلاینده دوده، در تمامی سرعت ها و نسبت های مختلف بازخورانی است که در بهترین حالت برای سرعت ۱۲۰۰ استفاده از ۴۰ درصد گاز طبیعی، مقدار دوده را ۸۰ درصد کاهش می دهد. مصرف مخصوص سوخت نیز با افزودن سوخت گاز طبیعی، افزایش چندانی ندارد و حتی در بعضی حالت ها کاهش در این پارامتر نیز مشهود است که برای بهترین حالت در سرعت ۱۲۰۰ و بازخورانی ۱۵ درصد، مصرف مخصوص، ۹ درصد کاهش دارد. اما افزایش در مصرف مخصوص نیز در بعضی حالت ها ایجاد می شود که بیشترین مقدار آن ۱۱ درصد و در سرعت ۳۰۰۰ و بازخورانی ۱۵ درصد اتفاق می افتد.

کلیدواژه ها: گاز طبیعی، بازخورانی گازهای اگزوز، موتور دیزل تزریق غیر مستقیم، آلاینده دوده.

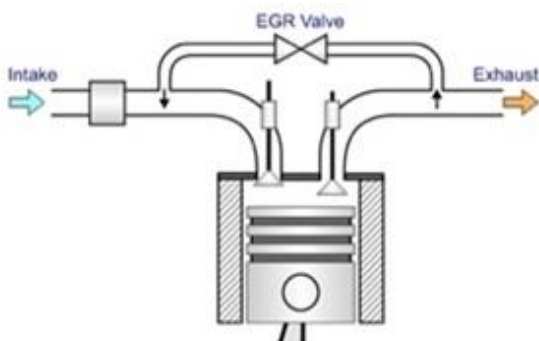
مقدمه

استفاده از روش بازخورانی گازهای اگزوز^۱ به منظور کاهش آلاینده اکسیدهای نیتروژن^۲ روشی مرسوم است و در خیلی از موتورهای احتراق تراکمی مورد استفاده قرار می گیرد. اما استفاده از این روش تبعاتی نیز دارد که کاهش در میزان هوای ورودی به موتور از جمله این اثرات است. کم شدن هوای وارد شده به موتور و همچنین اثری که این روش روی دما محفظه احتراق می گذارد، به علت ایجاد فاصله بین مولکول های سوخت و

هوا، نتیجه ی نامطلوبی ممکن است برای آلاینده دوده^۳ ایجاد کند [۱]. از طرفی هم در کارهای متعددی از گاز طبیعی و بعضی سوخت های سبک دیگر، در موتور دیزل به منظور کاهش آلاینده دوده استفاده شده است که بخشی از آن ها معرفی می شوند. در ادامه، توضیح خلاصه ای در مورد روش بازخورانی ارائه می شود و پس از آن به کارهای مربوط به افزودن سوخت های جایگزین پرداخته خواهد شد.

بازخورانی گاز اگزوز

همانگونه که اشاره شد روش بازخورانی گازهای اگزوز به عنوان یک روش شناخته شده به منظور کاهش آلاینده های اکسید نیتروژن در موتورهای احتراق تراکمی و اشتعال جرقه ای به کار می رود. بازخورانی گازهای اگزوز در عمل به این معنی است که مقداری از گازهای خروجی که غالباً بخار آب و دی اکسید کربن است به ورودی موتور منتقل شود. علت استفاده از گازهای اگزوز خنثی بودن آن ها و همچنین اینکه آن ها یکبار در واکنش شرکت کرده اند، و باعث رقیق شدن مخلوط سوخت و هوای ورودی می شوند. رقیق شدن به این معنی است که مقدار اکسیژن وارد شده، جهت انجام واکنش احتراق را کاهش می دهد. از آنجایی که اکسیدهای نیتروژن در دماهای بالا در داخل موتور تولید می شود، لذا این رقیق سازی به نوعی باعث کاهش دمای موتور و در نتیجه کاهش این آلاینده در موتور می شود [۲]. در شکل ۱ نحوه بازخورانی گازهای اگزوز نشان داده شده است.



شکل ۱: بازخورانی گاز اگزوز

بازخورانی گاز اگزوز، با انتقال مخلوط گرم به ورودی موتور، باعث افزایش دمای هوای ورودی به موتور می شود که افزایش حجم مخصوص و کاهش

¹ Exhaust gas recirculation

² Nitrogen oxide (NO_x)

³ Soot

کاهش دوده و به صرفه بودن از لحاظ اقتصادی، باعث کاهش کارایی موتور در مقایسه با دیزل خالص می شود [۵]. البته این نکته نیز باید در نظر گرفته شود که در این زمینه کارهایی انجام شده است که نشان می دهد موتورهای دیزل با سوخت دوگانه هم می توانند در برخی حالت ها راندمان حرارتی مشابه با دیزل خالص داشته باشند [۶].

قابل ذکر است که تنها از سوخت گاز طبیعی به عنوان سوخت جایگزین و یا مکمل استفاده نمی شود بلکه سوخت های دیگری نیز از قبیل، بیودیزل^۷ های مختلف، بیوگاز، متانول، اتانول و هیدروژن نیز مورد استفاده قرار می گیرند [۷]. در کارهای مختلفی اثرات استفاده از این سوخت ها مورد بررسی قرار گرفته است در ادامه تعدادی از این کارها معرفی می شوند لی^۸ و همکاران [۸] در آزمایشی که روی موتور اشتعال تراکمی تزریق مستقیم انجام دادند، از سوخت دی اتیل اتر به عنوان سوخت جایگزین استفاده کردند و توانستند به راندمان تبدیل سوخت مشابه با سوخت دیزل خالص برسند. همچنین نشان دادند که در صورت استفاده ترکیبی از دو سوخت، می توان به کاهش آلاینده هایی نظیر هیدروکربن های نسوخته، مونوکسید کربن و ذرات معلق کمک کرد.

در بین سوخت های مختلفی که به عنوان سوخت جایگزین استفاده شده اند، هیدروژن نیز به چشم می خورد. این سوخت، هم در موتورهای اشتعال تراکمی و هم در موتورهای اشتعال جرقه ای مورد استفاده قرار گرفته است. ژانگ^۹ و همکاران [۹] بر روی موتورهای دیزل سنگین، افزودن گاز هیدروژن را بررسی کردند که نتایج امیدبخشی در مورد مصرف مخصوص سوخت و راندمان موتور و همچنین برخی آلاینده ها بدست آوردند. در مورد استفاده از سوخت های جایگزین کارهای زیادی انجام گرفته است که برای مطالعه بیشتر می توان به مراجع [۱۴-۱۰] رجوع کرد.

تجهیزات و روش انجام آزمایش

موتور مورد آزمایش، موتور پرکینز مدل ۴/۱۰۸ است. این موتور چهار سیلندر و چهارزمانه و از نوع تزریق غیرمستقیم است. مشخصات فنی موتور در جدول ۱ نمایش داده شده است. برای موتور علاوه بر سیستم سوخت رسانی دیزل معمول، از یک منبع سوخت گاز طبیعی نیز استفاده شده است که گاز طبیعی به ورودی هوا تزریق می شود.

در شکل ۲ نمایی شماتیک از موتور مورد استفاده نشان داده شده است. در بین تجهیزات موتور یک منبع هوا نیز به چشم می خورد، می دانیم که مکش هوا در موتورهای احتراق داخلی به صورت نوسانی انجام می شود و یک جریان هوای یکنواخت در ورودی موتور نداریم، بنابراین از منبع به منظور مستهلک کردن نوسانات، در محل ورودی هوا به موتور استفاده می شود. مستهلک کردن نوسانات به این دلیل انجام می شود که در اندازه گیری دبی هوا که بوسیله اریفیس و مانومتر انجام می شود دچار مشکل نشویم. سایر بخش های موتور مورد استفاده در آزمایش، در توضیحاتی که در زیر شکل قرار دارد معرفی شده اند.

راندمان حجمی^۴ را به دنبال دارد. کاهش راندمان حجمی موجب افت توان موتور به علت ایجاد اختلال در احتراق می شود. برای رفع این مشکل در موتورهای مختلف از یک خنک کن، بر سر راه جریان برگشتی از اگزوز، به منظور کاهش دمای مخلوط برگشتی، استفاده می شود. در این آزمایش نیز برای کاهش دمای مخلوط برگشتی، از یک خنک کن استفاده شده است که در بخش های بعد بیشتر به توضیح موتور و تجهیزات آن پرداخته می شود [۱۱].

استفاده از روش بازخورانی گازهای اگزوز، محدود به موتورهای اشتعال تراکمی نمی شود بلکه در موتورهای اشتعال جرقه ای نیز مورد استفاده قرار گرفته است. لوجان^۵ و همکاران [۳] بازخورانی گاز اگزوز را برای یک موتور اشتعال جرقه ای بررسی کردند. آزمایش آنها برای دو حالت بار کم و بار کامل انجام شد که از جمله نتایج مهم آن ها می توان به کاهش اکسیدهای نیتروژن و کاهش مصرف مخصوص سوخت در هر دو حالت بار جزئی و کامل اشاره کرد. آن ها همچنین مقاومت در برابر ایجاد ضربه را برای هر دو حالت کاری بررسی کردند و نتایج، مشخص کرد که در دو حالت کاری مذکور، استفاده از بازخورانی مقاومت در برابر ضربه را افزایش می دهد.

استفاده از بازخورانی علاوه بر تاثیر روی کاهش آلاینده اکسید نیتروژن، در بعضی حالت ها باعث کاهش مصرف مخصوص سوخت ترمزی نیز می شود. در کار لوجان و همکاران، اشاره شد که برای موتور اشتعال جرقه ای این اتفاق می افتد و برای موتور دیزل هم در کاری که زامبونی^۶ و همکاران [۴] انجام دادند، در حالت بازخورانی فشار بالا، کاهش مصرف مخصوص سوخت مشهود است. لذا استفاده از بازخورانی گازهای اگزوز علاوه بر تاثیر روی اکسیدهای نیتروژن، ممکن است باعث کاهش مصرف مخصوص سوخت نیز شود.

استفاده از گاز طبیعی

از میان آلاینده هایی که توسط موتورهای احتراق داخلی تولید می شود، موتور دیزل سهم زیادی در تولید دوده دارد. دوده ها عموماً به صورت توده های بزرگ تشکیل شده از ذرات کروی کوچک تر کربن و دارای خواص ساختاری مشخص هستند. ریزساختار دوده به شدت به ماهیت سوخت ورودی و شرایط اختلاط، مثل دمای اشتعال، جزئیات سوخت و نسبت سوخت به هوا بستگی دارد.

استفاده از سوخت های گازی به علت طبیعت پاکی که در مقایسه با سوخت های مایع دارند و همچنین در دسترس بودن و قیمت پایین تر آن ها، همیشه مورد توجه قرار گرفته اند. گاز طبیعی یکی از این سوخت های گازی است که گازهای گلخانه ای کمی تولید می کند و ارزان و به صرفه است. این گاز با توجه به نسبت کربن به هیدروژن پایینی که دارد می تواند در موتورهای مختلف به عنوان یک سوخت جایگزین و یا یک سوخت مکمل معرفی شود که از نتایج آن می تواند کاهش در برخی آلاینده های تولید شده مانند آلاینده دوده، در موتور باشد. در این تحقیق نیز از سوخت گاز طبیعی به عنوان مکمل سوخت دیزل، در موتور اشتعال تراکمی تزریق غیرمستقیم استفاده شده است.

بر اساس کارهای انجام شده می توان گفت که استفاده از گاز طبیعی در موتور اشتعال تراکمی به عنوان سوخت جایگزین، با وجود مزایایی از قبیل

⁷ biodiesel

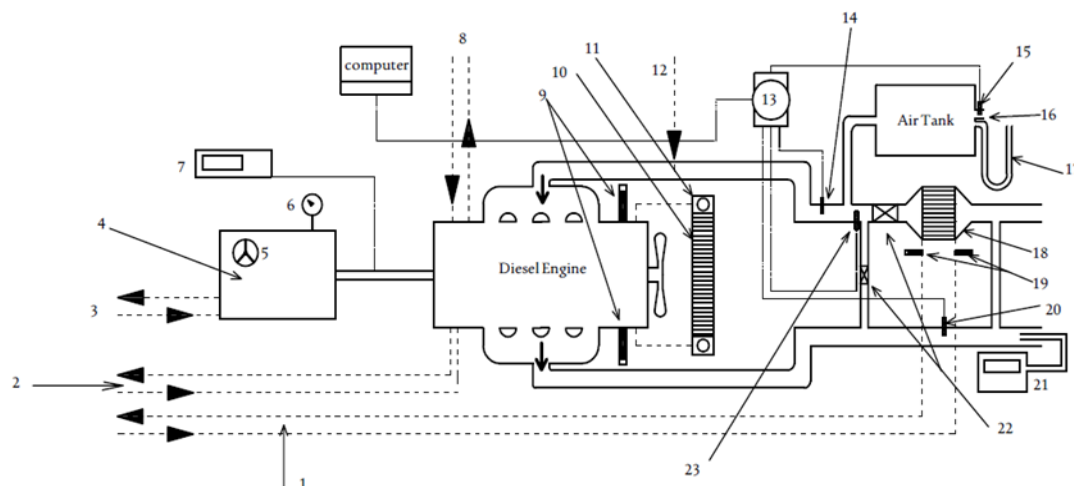
⁸ Lee

⁹ Jhang

⁴ Volumetric efficiency

⁵ Lujan

⁶ Zamboni



شکل ۲: نمایی شماتیک از موتور

(۱) - ورود و خروج آب مبدل ۲- ورود و خروج آب رادیاتور ۳- ورود و خروج آب دینامومتر ۴- دینامومتر ۵- محور باگذاری دینامومتر ۶- نمایشگر گشتاور ۷- نمایشگر دورسنج ۸- ورود و خروج سوخت ۹- دماسنج آب رادیاتور ۱۰- رادیاتور ۱۱- روتامتر ۱۲- محل تزریق گاز به مخلوط ورود ۱۳- برد اینترفیس ۱۴- ترموکوپل مخلوط ورودی ۱۵- ترموکوپل هوای ورودی ۱۶- اوریفیس ۱۷- مانومتر ۱۸- مبدل ۱۹- دما سنسور ورود و خروج مبدل ۲۰- ترموکوپل دمای اگزوز ۲۱- دودسنج ۲۲- شیرهای بازخورانی ۲۳- ترموکوپل بازخورانی

جدول ۱: مشخصات موتور

موتور پرکینز تنفس طبیعی ۴.۱۰۸

۴	تعداد سیلندر
۷۹/۷ (mm)	قطر سیلندر
۸۸/۹ (mm)	کورس پیستون
۱۷۶۰ (cm ³)	حجم جابجایی
۲۲:۱	نسبت تراکم
۲۸ (kW)	قدرت ماکزیمم
۸۹ (N.m)	گشتاور ماکزیمم
۴۵۰۰ (rpm)	سرعت ماکزیمم
۲۰۰ (bar)	فشار تزریق سوخت

برای محاسبه نسبت بازخورانی از رابطه زیر استفاده شده است:

$$EGR_{ratio} = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{tot, in}} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{tot, in} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{EGR} + \dot{m}_{gas} \quad (2)$$

گاز طبیعی در مخزنی با قابلیت تحمل ۲۰۰ بار^۱، قرار دارد و پس از عبور از تنظیم کننده فشار و رسیدن به فشار محیط، بوسیله مجرای به ورودی موتور اضافه شده و همراه با هوا وارد موتور می‌شود. قبل از اتصال مجرای گاز به ورودی موتور از یک دماسنج و دبی سنسور به منظور اندازه‌گیری مقدار جریان و دمای گاز اضافه شده استفاده شده است. مقدار گاز اضافه شده به موتور از طریق شیر نصب شده بر سر راه مخزن و همچنین به کمک فلومتر اندازه‌گیری می‌شود. برای بدست آوردن درصد گاز اضافه شده از رابطه ۳ استفاده شده است.

¹ Bar

$$gfr = \frac{\dot{m}_{gas}}{\dot{m}_{gas} + \dot{m}_{diesel}} \times 100 \quad (3)$$

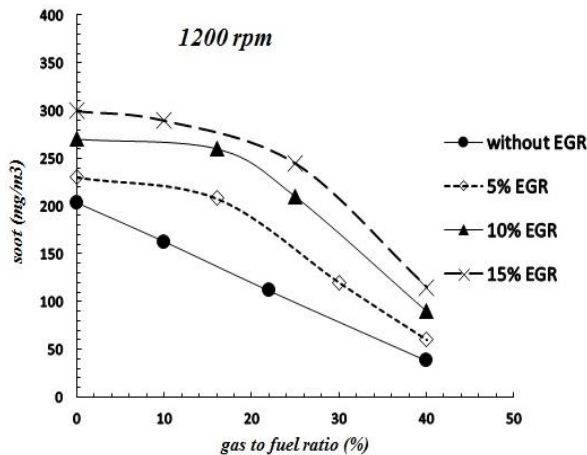
برای به دست آوردن دوده در هر مرحله، از دستگاه AVL-۴۱۵ soot analyzer استفاده می‌کنیم. که در هر مرحله میزان دوده را برحسب میلی‌گرم بر مترمکعب به ما می‌دهد. به منظور اندازه‌گیری میزان دوده از خروجی اگزوز موتور، یک ورودی برای این دستگاه در نظر می‌گیریم و در هر زمان با فشار دادن یک دکمه، دستگاه پس از گرفتن حجم ثابت و مشخصی از گازهای اگزوز و آنالیز کردن آن، مقدار و دوده را برحسب میلی‌گرم بر مترمکعب، نمایش می‌دهد.

از دیگر پارامترهایی که شدیداً بر کار موتور تأثیر می‌گذارند شرایط محیطی است. این پارامترها شامل دما، فشار محیط و رطوبت نسبی است. برای اندازه‌گیری این پارامترها از یک دماسنج، یک فشارسنج و یک رطوبت‌سنج استفاده شده است که از آن‌ها به منظور استفاده برای به‌دست آوردن ضرایب تصحیح استفاده می‌شود. تجهیزات دیگری نیز برای اندازه‌گیری دما، فشار، دبی جریان، زمان و... به کار گرفته شده است که در جدول شماره ۲ این تجهیزات و میزان دقت آن‌ها آورده شده است.

جدول ۲: دقت وسایل اندازه‌گیری

دقت وسایل اندازه‌گیری	
۵ (mm Hg)	فشارسنج اگزوز
۰/۱ (°C)	ترموکوپل
۰/۰۱ (s)	کرنومتر
۱ (%)	رطوبت‌سنج
۱ (mm Hg)	فشارسنج محیط
۱ (N.m)	دینامومتر
۱ (rpm)	دورسنج
۱ (l/min)	دبی سنسور (روتامتر)

بازخوران شده باعث کم تر شدن هوای ورودی موتور می شوند و نتیجه آن افزایش دوده می شود. این افزایش دوده با افزودن گازهای بازخورانی در مرجع ۳ و نیز در کار هونتالاس^۲ و همکاران [۱۵] گزارش شده است. اما مشاهده می شود که با جایگزین کردن سوخت گازی و افزایش نسبت آن، دوده به حد مناسبی کاهش می یابد بطوری که دیگر مقدار آلایند دوده بصورت غیر عادی بالا نبوده و تعدیل می شود. کاهش دوده با افزودن سوخت گاز طبیعی و با سایر سوخت های سبک دیگر در مراجع ۵ و ۶، هوانگ^۳ و همکاران [۱۶] و همچنین پاپاجیاناکیس^۴ و همکاران [۱۷] اشاره شده است.



شکل ۳: تغییرات آلایند دوده با تغییر درصد گاز طبیعی و بازخورانی برای ۷۵ درصد گشتاور کامل

در شکل ۴، تغییرات نسبت هم آری با تغییرات درصد گاز از صفر تا ۴۰ درصد و تغییرات بازخورانی مشاهده می شود. در تغییرات نسبت هم آری، مخرج رابطه که همان نسبت سوخت به هوای استوکیومتری است، ثابت است. لذا زمانی که نسبت هم آری افزایش دارد، به این معنی است که یا هوا کاهش داشته و یا مقدار سوخت افزایش دارد. از طرفی افزایش مقدار سوخت گازی با توجه به اینکه این سوخت در ورودی هوا تزریق می شود، باعث کاهش هوای وارد شده می گردد. پس هر افزایش و کاهش در نسبت هم آری در طول تغییرات گاز، به مقدار سوخت مصرف شده مربوط می شود.

با توجه به شکل ۴، مشخص است که با افزودن بازخورانی، به علت کاهش مقدار هوای وارد شده، نسبت سوخت به هوا افزایش دارد. اما در طول تغییرات نسبت های مختلف گاز طبیعی، برای درصدهای بازخورانی ۱۰ و ۱۵ درصد، نسبت هم آری کاهش می یابد که این به علت تاثیر سوخت گازی و کاهش بیشتر سوخت دیزل در این حالت ها است.

همانگونه که قبلا ذکر شد شرایط محیطی می تواند بر روی توان خروجی تاثیر گذار باشد به همین منظور ضرایب تصحیحی برای تطبیق شرایط آزمایشگاه با شرایط استاندارد استفاده می شود. طبق تعریف برای ضریب تصحیح قدرت داریم:

$$C_f = \frac{P_{s,d}}{P_m - P_{v,m}} \times \left(\frac{T_m}{T_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

در جدول ۳ مشخصات استاندارد هوا آورده شده است.
جدول ۳: مشخصات استاندارد هوا

دما	فشار بخار آب	فشار هوای خشک
۲۹/۴ (c)	۹/۶۵ (mmHg)	۷۳۶/۶ (mmHg)

بحث بر روی نتایج

آزمایش حاضر برای سرعت های ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ دور در دقیقه انجام گرفته است. گشتاوری که مورد آزمایش قرار گرفته است، ۷۵ درصد بیشینه گشتاوری است که در هر دور قابل استحصال است.

پارامترهایی که در هریک از حالت ها، مورد بررسی گرفتند شامل نسبت هم آری، مصرف مخصوص سوخت و آلایند دوده است. نسبت هم آری که با علامت ϕ نمایش داده می شود عبارت است از تقسیم نسبت سوخت به هوا در حالت واقعی بر نسبت سوخت به هوا در حالت استوکیومتری که در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$\phi = \frac{\left(\dot{m}_f / \dot{m}_{air} \right)_a}{\left(\dot{m}_f / \dot{m}_{air} \right)_s} \quad (5)$$

مصرف مخصوص در واقع مقدار سوخت مصرف شده به ازای واحد توان است. و این پارامتر گزینه خوبی برای مقایسه موتورهای مختلف به شمار می رود. مصرف مخصوص سوخت را می توان هم بر اساس توان تولیدی داخل موتور و هم بر اساس توان خروجی از موتور بیان کرد. البته در نظر گرفتن رابطه بر اساس قدرت خروجی برای مقایسه عملکرد دو موتور مختلف، منطقی تر به نظر می رسد. در این آزمایش نیز، مصرف مخصوص ترمزی در نظر گرفته شده است. در این کار با توجه به اینکه از دو سوخت گاز طبیعی و دیزل استفاده شده است، رابطه مصرف مخصوص سوخت ترمزی^۱ بدون در نظر گرفتن ارزش حرارتی، بصورت زیر خواهد شد.

$$bsfc = \frac{\dot{m}_{diesel} + \dot{m}_{gas}}{P_b} \quad (6)$$

نسبت سوخت گاز طبیعی از صفر تا ۴۰ درصد تغییر می کند. و نتایج برای این نسبت های گاز طبیعی و حالت های بدون بازخورانی، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بازخورانی، ارائه می شوند. ابتدا نتایج برای سرعت ۱۲۰۰ و پس از آن به ترتیب برای سرعت های ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ دور در دقیقه بررسی خواهد شد.

بررسی نتایج برای سرعت ۱۲۰۰

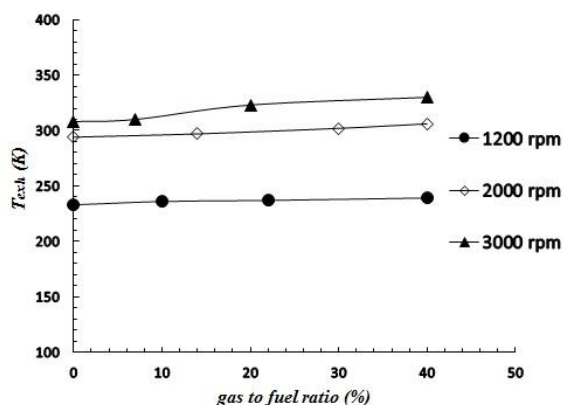
در شکل ۳ تغییرات مقدار آلایند دوده بر حسب میلی گرم بر متر مکعب نشان داده شده است. در این حالت با توجه به گشتاور بالای اعمال شده به موتور و نسبت سوخت به هوای بالا در موتور (شکل ۳) مقدار آلایند دوده، مقدار زیادی است و مشاهده می شود با اضافه شدن بازخورانی، مقدار آلایند دوده افزایش پیدا می کند. این افزایش به این علت است که گازهای

² Hountalas

³ Huang

⁴ Papagiannakis

¹ Brake specific fuel consumption



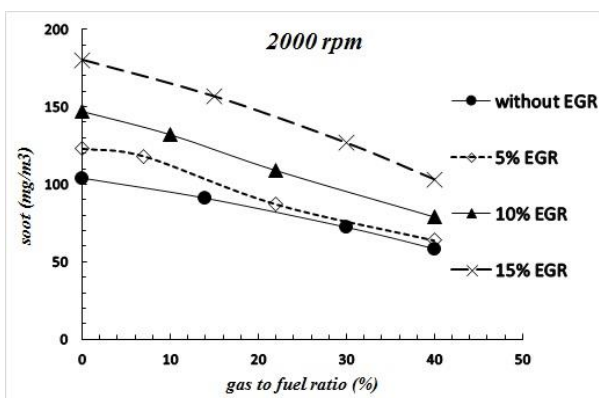
شکل ۶: تغییرات دمای آگزوز با تغییرات سرعت و گاز طبیعی برای ۷۵ درصد گشتاور کامل

در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت، دمای احتراق افزایش دارد که دلیل این امر کاهش در حرارت تلف شده، به علت افزایش سرعت و کاهش زمان تبادل حرارت است.

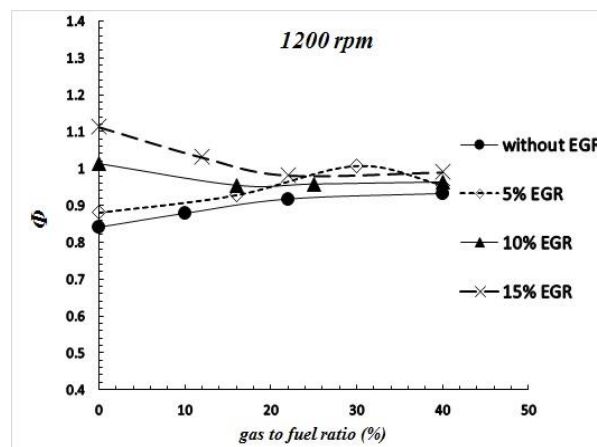
با زیاد شدن نسبت سوخت گاز طبیعی نیز به مقدار کمی افزایش در دمای آگزوز مشاهده می‌شود.

بررسی نتایج برای سرعت ۲۰۰۰

در شکل ۷ تغییرات آلاینده دوده نشان داده شده است. مشابه حالت قبل با افزایش بازخورانی این آلاینده افزایش دارد و با افزایش نسبت سوخت گاز طبیعی، کاهش دارد. مقدار دوده در سرعت ۲۰۰۰، در مقایسه با سرعت ۱۲۰۰ برای تمامی حالت‌ها کاهش داشته‌است. دلیل این امر این است که بالا رفتن سرعت، باعث کم‌تر شدن اتلاف حرارت از سیلندر به بیرون از آن می‌شود. این را باید به‌عنوان اثری مثبت در این موتورها در نظر گرفت. اثری که این کاهش اتلاف حرارت می‌گذارد، این است که دمای داخل سیلندر را افزایش می‌دهد (شکل) و باعث طولانی‌تر شدن فرآیند احتراق دیر هنگام یا نهایی می‌شود. طولانی شدن این فرآیند نتیجه‌اش کاهش مقدار دوده است.



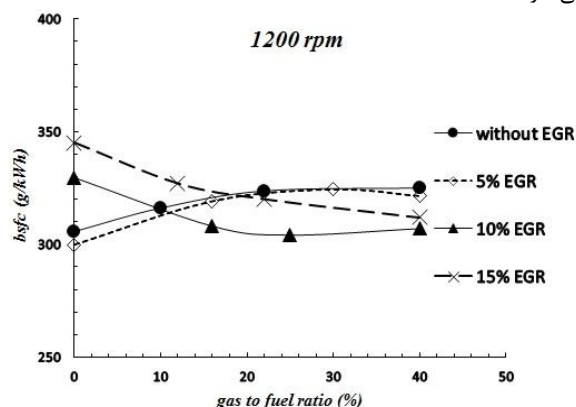
شکل ۷: تغییرات آلاینده دوده با تغییر درصد گاز طبیعی و بازخورانی برای ۷۵ درصد گشتاور کامل



شکل ۸: تغییرات نسبت هم‌ارزی با تغییر درصد گاز طبیعی و بازخورانی برای ۷۵ درصد گشتاور کامل

در شکل ۸ تغییرات مصرف مخصوص سوخت نشان داده شده است. با توجه به توضیحات داده شده در مورد نسبت هم‌ارزی، برای ۱۰ و ۱۵ درصد انتظار کاهش در مصرف مخصوص می‌رفت که به همین صورت هم هست و با توجه به شکل برای حالت‌های ۱۰ و ۱۵ درصد بازخورانی، کاهش در مصرف مخصوص با افزودن گاز طبیعی داریم. کاهش در مصرف مخصوص سوخت دربار بالا در کاری که دوکسر^۱ و همکاران [۱۸] انجام داده‌اند نشان داده شده است.

افزایش نسبت بازخورانی، با توجه به تاثیر مثبتی که روی افزایش فشار ورودی و کاهش تلفات اصطکاکی دارد، ممکن است باعث کاهش مصرف مخصوص شود اما اگر نسبت بازخورانی زیاد نیز افزایش پیدا کند، به علت کاهش هوای ورودی و مشکل در احتراق باعث افزایش در مصرف مخصوص می‌شود.

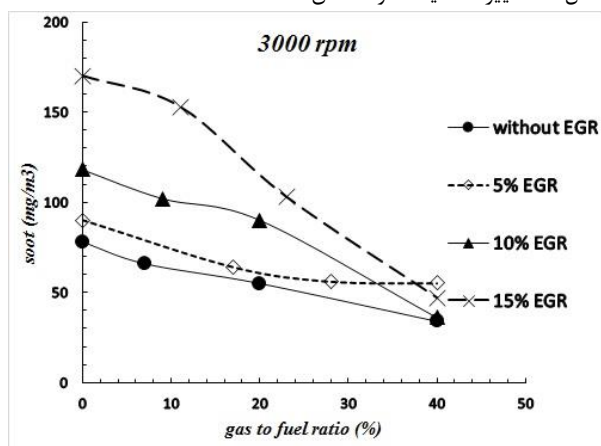


شکل ۹: تغییرات مصرف مخصوص سوخت با تغییر درصد گاز طبیعی و بازخورانی برای ۷۵ درصد گشتاور کامل

در ادامه و در شکل ۹ به‌منظور بررسی تغییرات آلاینده دوده و شرایط موتور، دمای خروجی موتور به‌عنوان نماینده‌ای از دمای احتراق در گشتاورها و دورهای مختلف با تغییرات گاز نشان داده شده است.

¹ Daukšys

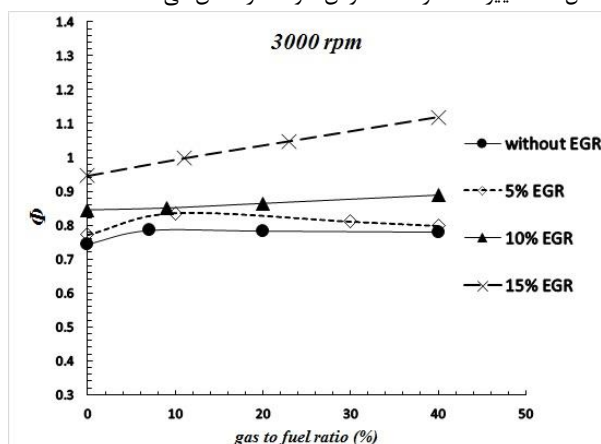
طبیعی نیز مشابه حالت‌های قبل باعث کاهش در آلاینده دوده می‌شود. در شکل ۱۰ تغییرات آلاینده دوده نشان داده شده است.



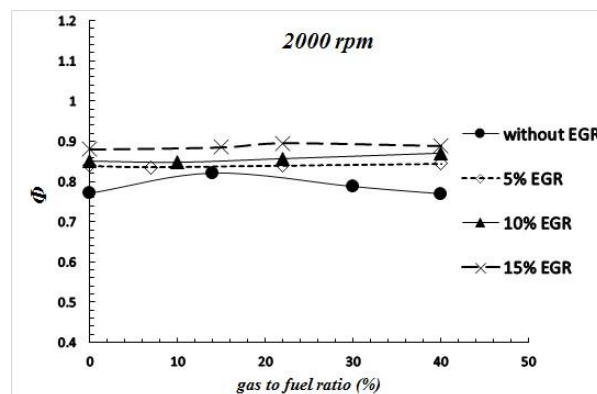
شکل ۱۰: تغییرات آلاینده دوده با تغییر درصد گاز طبیعی و بازخورانی برای ۷۵ درصد گشتاور کامل

در شکل ۱۱ با توجه به تغییرات نسبت هم‌ارزی، مشخص است که برای درصد‌های بازخورانی ۵ و ۱۰ و همچنین حالت بدون بازخورانی، نسبت هم‌ارزی تغییرات کمی دارد. با توجه به مشخصات موتور که در حدود سرعت ۲۰۰۰ بیشترین حجم هوا را دریافت می‌کند، بنابراین با افزایش سرعت به ۳۰۰۰ کمی مقدار هوای وارد شده کاهش می‌یابد. این کاهش مقدار هوا باعث می‌شود که برای حالت ۱۵ درصد بازخورانی هوای لازم موجود نباشد و همانگونه که در شکل ۱۱ مشخص است، این حالت، نسبت هم‌ارزی بالایی دارد و با افزایش گاز طبیعی نیز افزایش می‌یابد. برای نسبت‌های بازخورانی صفر و ۵ درصد، نسبت هم‌ارزی ابتدا قدری افزایش، و پس از آن کاهش دارد که این اثر در شکل ۱۲ و روی مصرف مخصوص نیز مشخص است.

مصرف مخصوص سوخت نیز برای حالت ۱۵ درصد بازخورانی افزایش محسوس دارد و برای سایر حالت‌ها بصورت میانگین تغییرات کمی دارد. شکل ۱۲ تغییرات مصرف مخصوص سوخت را نشان می‌دهد.



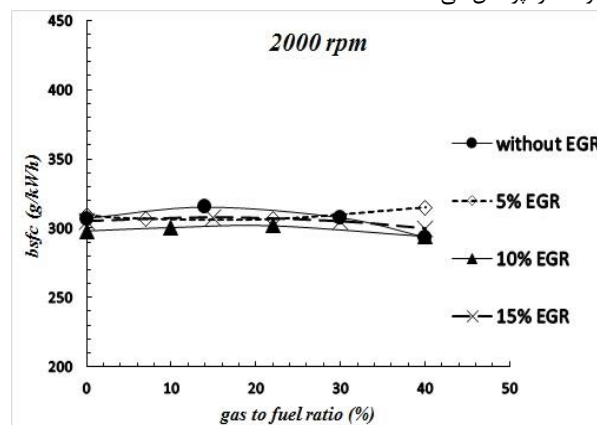
شکل ۱۱: تغییرات نسبت هم‌ارزی با تغییر درصد گاز طبیعی و بازخورانی برای ۷۵ درصد گشتاور کامل



شکل ۸: تغییرات نسبت هم‌ارزی با تغییر درصد گاز طبیعی و بازخورانی برای ۷۵ درصد گشتاور کامل

شکل ۸ تغییرات نسبت هم‌ارزی را نشان می‌دهد که تقریباً بطور میانگین در همه حالت‌های بازخورانی در طول تغییر گاز طبیعی، ثابت است. در شکل ۹ تغییرات مصرف مخصوص نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که تغییرات بازخورانی تاثیر زیادی روی تغییرات مصرف مخصوص ندارد. باید توضیح داده شود که موتور مورد استفاده در این آزمایش در محدوده دور ۲۰۰۰ بیشترین حجم هوا را دریافت می‌کند، لذا برای درصد‌های بالای بازخورانی هم مشاهده می‌شود که مشکل خاصی برای موتور ایجاد نمی‌شود. با افزایش گاز طبیعی به غیر از حالت بدون بازخورانی که در آن مصرف مخصوص کاهش دارد، برای سایر حالت‌ها تغییری در این پارامتر نداریم.

با افزایش سرعت از ۱۲۰۰ به ۲۰۰۰ تلفات مربوط به اصطکاک تر افزایش دارد اما با مقایسه شکل ۹ و شکل ۵ مشاهده می‌شود که تغییر زیادی در مصرف مخصوص، ایجاد نشده است و حتی سرعت ۲۰۰۰ وضعیت بهتری دارد که به علت میزان هوای بیشتر وارد شده در این سرعت است. و همچنین اینکه افزایش توان ناشی از افزایش سرعت، اثر اضافه شدن مقدار سوخت را پوشش می‌دهد.



شکل ۹: تغییرات مصرف مخصوص سوخت با تغییر درصد گاز طبیعی و بازخورانی برای ۷۵ درصد گشتاور کامل

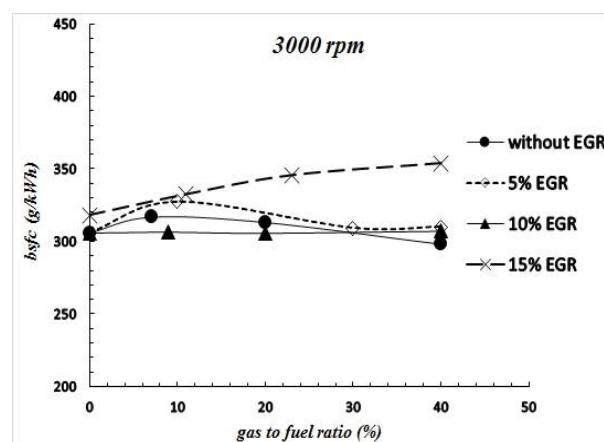
بررسی نتایج برای سرعت ۳۰۰۰

در این سرعت با توجه به افزایش دمای احتراق موتور نسبت به سرعت ۲۰۰۰ که در شکل ۶ مشخص است، مقدار دوده برای هریک از حالت‌های بازخورانی، نسبت به سرعت ۲۰۰۰ کمی کاهش دارد و استفاده از گاز

P_b	توان ترمزی
P_m	فشار مطلق محیط
$P_{s,d}$	فشار استاندارد هوای خشک
$P_{v,m}$	فشار جزئی بخار آب در محیط
T_m	دمای محیط
T_s	دمای استاندارد
علائم یونانی	
ϕ	نسبت هم‌ارزی
زیر نویس ها	
a	واقعی
air	هوا
$diesel$	سوخت دیزل
f	سوخت
gas	سوخت گازی طبیعی
s	استوکیومتری

مراجع و منابع

- [1] M. Zheng, G. T. Reader and J. G. Hawley, Diesel engine exhaust gas recirculation—a review on advanced and novel concepts, *Energy conversion and management*, Vol. 45, No. 6, pp. 883-900, 2004.
- [2] S. I. Raptotasi, N. F. Sakellari, R. G. Papagiannakis and D. T. Hountalas, Application of a multi-zone combustion model to investigate the NOx reduction potential of two-stroke marine diesel engines using EGR, *Applied Energy*, Vol. 157, pp. 814-823, 2015.
- [3] J. M. Luján, H. Climent, R. Novella and M. E. Rivas-Perea, Influence of a low pressure EGR loop on a gasoline turbocharged direct injection engine, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 89, pp. 432-443, 2015.
- [4] G. Zamboni and M. Capobianco, Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine, *Applied Energy*, Vol. 94, pp. 117-128, 2012.
- [5] K. Nithyanandan, Y. Lin, R. Donahue, X. Meng, J. Zhang and F. L. Chia-fon, Characterization of soot from diesel-CNG dual-fuel combustion in a CI engine, *Fuel*, Vol. 184, pp. 145-152, 2016.
- [6] K. Nithyanandan, J. Zhang, Y. Li, X. Meng, R. Donahue, C.-F. F. Lee and H. Dou, Diesel-like efficiency using cng/diesel dual-fuel combustion, in *Proceeding of, American Society of Mechanical Engineers*, pp. V001T02A014-V001T02A014.
- [7] J. Caban, A. Gniecka and L. Holeša, Alternative fuels for diesel engines, *Advances in Science and Technology Research Journal*, Vol. 7, No. 20, 2013.
- [8] S. Lee and T. Y. Kim, Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Operated with Diesel/DEE Blended Fuel, *Applied Thermal Engineering*, 2017.
- [9] S.-R. Jhang, K.-S. Chen, S.-L. Lin, Y.-C. Lin and W. L. Cheng, Reducing pollutant emissions from a heavy-duty diesel engine by using hydrogen additions, *Fuel*, Vol. 172, pp. 89-95, 2016.
- [10] Z. Sahin, O. Durgun and C. Bayram, Experimental investigation of gasoline fumigation in a turbocharged IDI diesel engine, *Fuel*, Vol. 95, pp. 113-121, 2012.



شکل ۱۲: تغییرات مصرف مخصوص سوخت با تغییر درصد گاز طبیعی و بازخورانی برای ۷۵ درصد گشتاور کامل

نتیجه گیری

در مجموع و برای تمامی سرعت‌ها با افزودن سوخت گاز طبیعی کاهش در آلایندة دوده ایجاد می‌شود که مقدار کاهش برای حالت‌های مختلف بازخورانی با توجه به مقدار دوده متفاوت است. در ادامه خلاصه‌ای از نتایج، در سرعت‌های مختلف ارائه می‌شود.

۱- در سرعت ۱۲۰۰، افزودن گاز طبیعی باعث کاهش مطلوبی در آلایندة دوده برای تمامی حالت‌های بازخورانی می‌گردد. در بهترین حالت ۸۰ درصد در حالت بدون بازخورانی کاهش در دوده ایجاد می‌کند. با افزودن سوخت گاز طبیعی علاوه بر کاهش دوده، برای حالت‌های بازخورانی ۱۰ و ۱۵ درصد، کاهش در مصرف مخصوص سوخت نیز مشاهده می‌شود که بیشترین کاهش، ۹ درصد برای ۱۵ درصد بازخورانی است. اما برای حالت‌های بدون بازخورانی و ۵ درصد بازخورانی مصرف مخصوص به‌ترتیب ۶ و ۷ درصد افزایش دارد.

۲- در سرعت ۲۰۰۰ بیشترین کاهش دوده ۴۸ درصد است که در ۵ درصد بازخورانی اتفاق می‌افتد. با افزودن سوخت گاز طبیعی و افزایش آن فقط در حالت ۵ درصد بازخورانی، مصرف مخصوص سوخت ۲ درصد افزایش دارد. برای سایر حالت‌های بازخورانی تغییری مشاهده نمی‌شود و حتی در حالت بدون بازخورانی ۴ درصد کاهش در مصرف مخصوص سوخت ایجاد می‌شود.

۳- در سرعت ۳۰۰۰، آلایندة دوده در بهترین حالت ۶۸ درصد کاهش برای حالت ۱۵ درصد بازخورانی دارد. برای حالت ۵ درصد نیز تقریباً ۶۳ درصد کاهش در این آلایندة ایجاد می‌شود. با افزایش نسبت سوخت گاز طبیعی مشاهده می‌شود که فقط برای ۱۵ درصد بازخورانی مصرف مخصوص ۱۱ درصد افزایش دارد و در سایر حالت‌ها تغییر خاصی در مصرف مخصوص مشاهده نمی‌شود.

فهرست علائم

$bsfc$	مصرف مخصوص سوخت ترمزی
C_f	ضریب اصلاح قدرت
gfr	درصد سوخت گازی
$\dot{m}$	دبی جرمی

- [15] D. T. Hountalas and R. Papagiannakis, *A simulation model for the combustion process of natural gas engines with pilot diesel fuel as an ignition source*, 0148-7191, SAE Technical Paper, 2001.
- [16] H. Huang, Q. Liu, Q. Wang, C. Zhou, C. Mo and X. Wang, Experimental investigation of particle emissions under different EGR ratios on a diesel engine fueled by blends of diesel/gasoline/n-butanol, *Energy Conversion and Management*, Vol. 121, pp. 212-223, 2016.
- [17] R. Papagiannakis and D. Hountalas, Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 353-365, 2003.
- [18] V. Daukšys, M. Račkus and N. Zamiatina, Energy Efficiency Improvement Adding Various Amounts of CNG in the Naturally Aspirated Compression Ignition Engine, *Procedia Engineering*, Vol. 187, pp. 222-228, 2017.
- [11] P. Sahoo, L. Das, M. Babu, P. Arora, V. Singh, N. Kumar and T. Varyani, Comparative evaluation of performance and emission characteristics of jatropha, karanja and polanga based biodiesel as fuel in a tractor engine, *Fuel*, Vol. 88, No. 9, pp. 1698-1707, 2009.
- [12] S. Jindal, B. P. Nandwana and N. S. Rathore, Comparative evaluation of combustion, performance, and emissions of jatropha methyl ester and karanj methyl ester in a direct injection diesel engine, *Energy & Fuels*, Vol. 24, No. 3, pp. 1565-1572, 2010.
- [13] M. Nagarhalli, V. Nandedkar and K. Mohite, Emission and performance characteristics of karanja biodiesel and its blends in a CI engine and its economics, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 2, pp. 52-56, 2010.
- [14] A. K. Agarwal and K. Rajamanoharan, Experimental investigations of performance and emissions of Karanja oil and its blends in a single cylinder agricultural diesel engine, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 1, pp. 106-112, 2009.