

بررسی آزمایشگاهی اثر افزودن گاز طبیعی در موتور دیزل تزریق غیر مستقیم بر آلایندة دوده در سرعت‌ها و گشتاورهای مختلف

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 بررسی آزمایشگاهی اثر افزودن گاز طبیعی در یک موتور دیزل تزریق غیرمستقیم، بر روی آلایندة دوده و مصرف مخصوص سوخت، پرداخته شده است. اهدافی که در این آزمایش دنبال می‌شود، ایجاد کاهش در آلایندة دوده با افزودن گازطبیعی و بررسی اثر آن بر روی مصرف مخصوص سوخت است. آزمایش‌ها برای سرعت‌های ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ دور در دقیقه صورت گرفته است. برای هر یک از این سرعت‌ها حالت‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد گشتاور بیشینه موتور، بررسی شده است. با نگاهی به نتایج، مشهود است که در تمامی سرعت‌ها و گشتاورها با افزودن گاز طبیعی، کاهش مطلوبی در مقدار آلایندة دوده ایجاد می‌شود. در بهترین حالت، مقدار دوده ۸۰ درصد کاهش دارد که این میزان کاهش، در گشتاور بالا و در سرعت ۱۲۰۰ دور، اتفاق می‌افتد. اما با وجود کاهش در آلایندة دوده، مقداری افزایش در مصرف مخصوص سوخت در گشتاورهای پایین ایجاد می‌شود که در بدترین حالت ۲۰ درصد، افزایش در مصرف مخصوص برای سرعت ۱۲۰۰ اتفاق می‌افتد. باین وجود، ذکر شد که افزایش در مصرف مخصوص سوخت، معمولاً در گشتاورهای پایین اتفاق می‌افتد و برای گشتاورهای بالا، حتی در بعضی حالت‌ها، کاهش در آن پارامتر نیز به چشم می‌خورد که تقریباً بیشترین میزان آن ۴/۵ درصد کاهش، برای سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه است. درمجموع استفاده از سوخت گازی در گشتاور بالا و متوسط، با توجه به اثر مثبتی که روی آلایندة دوده و گاه مصرف مخصوص دارد، می‌تواند محرک خوبی برای انجام تحقیق بیشتر در زمینه استفاده از این سوخت در موتورهای دیزل، در گشتاورهای بالا باشد.

کلیدواژه‌ها: موتور دیزل تزریق غیرمستقیم، گاز طبیعی، آلایندة دوده، مصرف مخصوص سوخت

مقدمه

از میان آلایندةهایی که توسط موتورهای احتراق داخلی تولید می‌شود، موتور دیزل سهم زیادی در تولید دوده^۱ دارد. دوده‌ها عموماً به صورت توده‌های بزرگ تشکیل شده از ذرات کروی کوچک‌تر کربن است و دارای خواص ساختاری مشخص است. 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 سوخت‌های گازی به علت طبیعت پاکي که در مقایسه با سوخت‌های مایع دارند و همچنین در دسترس بودن و قیمت پایین‌تر آن‌ها، همیشه موردتوجه قرار گرفته‌اند. گاز طبیعی یکی از این سوخت‌های گازی است که گازهای گلخانه‌ای کمی تولید می‌کند و ارزان و به صرفه است. این گاز با توجه به نسبت کربن به هیدروژن پایینی که دارد می‌تواند در موتورهای مختلف به عنوان یک سوخت جایگزین و یا یک سوخت مکمل معرفی شود که از نتایج آن می‌تواند کاهش در برخی آلایندةهای تولیدشده در موتور باشد. در این تحقیق نیز از سوخت گاز طبیعی به عنوان مکمل سوخت دیزل در موتور اشتعال تراکمی تزریق غیرمستقیم^۲ استفاده شده است.

استفاده از یک سوخت به عنوان سوخت مکمل یا جایگزین کامل سوخت اصلی، تنها به استفاده از سوخت‌های گازی محدود نمی‌شود بلکه سوخت‌های دیگری نیز هستند که از منابع تجدید پذیر بوده و استفاده از این سوخت‌ها، ضمن تولید آلایندةهای کمتر، نگرانی‌های مربوط به استفاده از سوخت‌های فسیلی را ندارد و گزینه مناسبی جهت جایگزینی سوخت‌های فسیلی به شمار می‌رود. از جمله این سوخت‌ها می‌توان به بیودیزل‌های^۳ مختلف، بیوگاز، متانول، اتانول و هیدروژن اشاره کرد. در کارهای مختلفی اثرات استفاده از این سوخت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است در بخش بعد تعدادی از این کارها معرفی می‌شوند [۱].

استفاده از سوخت‌های جایگزین

تحقیقات زیادی روی موتور دیزل تزریق مستقیم در مورد استفاده از سوخت‌های جایگزین انجام گرفته است. اما این تحقیقات کم‌تر در حوزه موتورهای تزریق غیرمستقیم وارد شده است. لی^۴ و همکاران [۲] در آزمایشی که روی موتور اشتعال تراکمی تزریق مستقیم انجام دادند، از سوخت دی‌اتیل‌تر^۵ به عنوان سوخت جایگزین استفاده کردند و توانستند به راندمان تبدیل سوخت مشابه با سوخت دیزل خالص برسند. همچنین نشان دادند در صورت استفاده ترکیبی از دو سوخت، می‌توان به کاهش

² Indirect injection

³ Biodiesel

⁴ Lee

⁵ Diethyl ether

¹ soot

الاینده‌هایی نظیر هیدروکربن‌های نسوخته، مونوکسید کربن و ذرات معلق کمک کرد.

ازجمله کارهای دیگر که در زمینه سوخت‌های جایگزین انجام شده است می‌توان به کارهایی که توسط ساهو^۱، جیندال^۲، ناگارهای^۳، آگاروال^۴ و همکارانشان [۳-۶] اشاره کرد که در تحقیقاتشان از بیودیزل کارانجا و جاتروفا، که نوعی روغن گیاهی است، استفاده کردند. نتایج کار آن‌ها بهبود در وضعیت آلاینده‌هایی نظیر مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته، و در بعضی حالت‌ها کاهش در ذرات معلق بود. در بین سوخت‌های مختلفی که به‌عنوان سوخت جایگزین استفاده شده‌اند، هیدروژن نیز به چشم می‌خورد. این سوخت، هم در موتورهای اشتعال تراکمی و هم در موتورهای اشتعال جرقه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. ژانگ^۵ و همکاران [۷] 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 آلاینده‌ها بدست آوردند.

در سیر آزمایش‌هایی که تحت عنوان استفاده از سوخت جایگزین شناخته می‌شود، روش‌های گوناگونی برای اضافه کردن سوخت ثانویه به چشم می‌خورد. استفاده از ترکیب دوسوخت به‌صورت مایع، استفاده از سوخت گازی و یا تبخیر کردن سوخت مایع و اضافه کردن به هوای ورودی به موتور و استفاده مستقیم از سوخت، از جمله روش‌های افزودن سوخت جایگزین است.

در روش استفاده از تبخیر سوخت مایع و افزودن آن به هوای ورودی می‌توان از سوخت‌های متنوع مثل الکل‌ها، بیودیزل‌ها و حتی بنزین استفاده کرد که هرکدام مزایا و معایبی دارد. ساهین^۶ و همکاران [۸] از جمله محققینی هستند که برای یک موتور دیزل تزریق غیر مستقیم از بخار بنزین به‌عنوان سوخت مکمل استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که که قدرت موثر موتور به صورت کلی کاهش دارد ولی راندمان موثر، افزایش داشت. درمصرف مخصوص سوخت ترمزی نیز ۵ درصد کاهش دیده می‌شود. در مورد آلاینده‌ها هم نتایج جالبی بدست آوردند که می‌توان به کاهش ۵ تا ۱۰ درصدی اکسیدهای نیتروژن و کاهش آلاینده دوده در بزی از حالت‌های عملکردی موتور اشاره کرد که ماکزیمم مقدار کاهش در مخلوط ۲۰ درصد اتفاق می‌افتد.

در بخش بعد به معرفی تجهیزات و روش انجام آزمایش و نیز برخی روابط به‌کار برده شده پرداخته می‌شود.

تجهیزات و روش انجام آزمایش

موتور مورد آزمایش، موتور پرکینز^۷ مدل ۴.۱۰۸ است. این موتور چهار سیلندر و چهارزمانه و از نوع تزریق غیرمستقیم است. مشخصات فنی موتور در جدول ۱ نشان داده شده است. برای موتور علاوه بر سیستم سوخت‌رسانی دیزل معمول، از یک منبع سوخت گاز طبیعی نیز استفاده شده است که گاز طبیعی به ورودی هوا تزریق می‌شود.

جدول ۱: مشخصات موتور

موتور پرکینز تنفس طبیعی ۴.۱۰۸	
تعداد سیلندر	۴
قطر سیلندر	۷۹/۷ (mm)
کورس پیستون	۸۸/۹ (mm)
حجم جابجایی	۱۷۶۰ (cm ³)
نسبت تراکم	۲۲:۱
قدرت ماکزیمم	۲۸ (kW)
گشتاور ماکزیمم	۸۹ (N.m)
سرعت ماکزیمم	۴۵۰۰ (rpm)
فشار تزریق سوخت	۲۰۰ (bar)

در شکل ۱ نمای شماتیک از بستر تست نشان داده شده است که منبع هوا نیز در آن به‌چشم می‌خورد. شاید این سوال ایجاد شود که منبع هوا به چه منظور مورد استفاده قرار گرفته است؟ در پاسخ باید توضیح داده شود که برای اندازه‌گیری دبی هوا در آزمایش‌های مختلف معمولاً از اوریفیس استفاده می‌شود. عملکرد آن‌ها به این صورت است که صفحه‌ای دارای سوراخ با قطر مشخص، در مسیر جریان هوا قرار داده می‌شود، اختلاف فشاری که در نتیجه عبور هوا از سوراخ به وجود می‌آید، به یک مانومتر منتقل می‌شود. به‌این‌ترتیب با دانستن اختلاف فشار و استفاده از معادله برنولی و ضرایب تصحیح می‌توان دبی حجمی و درنهایت دبی جرمی هوای ورودی را اندازه گرفت. در موتورهای احتراق داخلی به خاطر مکش متناوب سیلندرها، جریان هوای مجرای ورودی، به‌شدت متناوب است. بنابراین اختلاف فشار دو طرف اوریفیس نیز تناوبی خواهد بود و محاسبه دبی حجمی با چنین اختلاف فشاری اولاً غیرممکن و ثانیاً بی‌بهره خواهد بود. دلیل آن، تغییرات زیادی است که به‌وجود می‌آید. برای حل این مشکل لازم است پالس‌های مکش ورودی درجایی مستهلک شوند. ساده‌ترین طرحی که می‌توان پیشنهاد کرد استفاده از یک مخزن هوای نسبتاً بزرگ است. در این طرح می‌توان اوریفیس را در ورودی مخزن که کمترین مقدار پالس به آن می‌رسد قرار داد که در این آزمایش هم به این صورت از اوریفیس و منبع هوا استفاده شده است.

گاز طبیعی در مخزنی با قابلیت تحمل ۲۰۰ بار^۸، قرار دارد و پس از عبور از تنظیم‌کننده^۹ 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 داماسنج و دبی سنج به‌منظور اندازه‌گیری مقدار جریان و 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 ۱ استفاده شده است.

¹ Sahoo

² Jindal

³ Nagarhalli

⁴ Agarwal

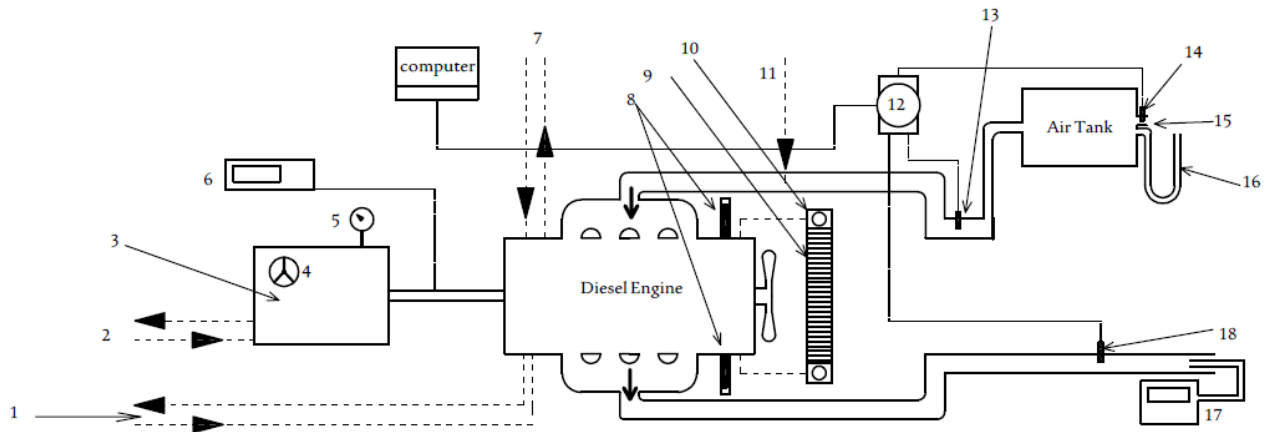
⁵ jhuang

⁶ sahin

⁷ Perkins Engines

⁸ bar

⁹ regulator



شکل ۱: نمای شماتیک موتور

(۱) - ورود و خروج آب رادیاتور ۲- ورود و خروج آب دینامومتر ۳- دینامومتر ۴- محور باگذاری دینامومتر ۵- نمایشگر گشتاور ۶- نمایشگر دورسنج ۷- ورود و خروج سوخت ۸- دماسنج آب رادیاتور ۹- رادیاتور ۱۰- روتامتر ۱۱- محل تزریق گاز به مخلوط ورود ۱۲- برد اینترفیس ۱۳- ترموکوپل مخلوط ورودی ۱۴- ترموکوپل هوای ورودی ۱۵- اوریفیس ۱۶- مانومتر ۱۷- دود سنج ۱۸- ترموکوپل دمای اگزوز)

ضرایب تصحیحی برای تطبیق شرایط آزمایشگاه با شرایط استاندارد استفاده می‌شود. طبق تعریف برای ضریب تصحیح قدرت داریم:

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

در جدول ۳ مشخصات استاندارد هوا آورده شده است.

جدول ۳: شرایط 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 سرعت‌های ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و در بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد گشتاور ماکزیمم در هر سرعت انجام گرفته است. پارامترهایی که در هریک از حالت‌ها، مورد بررسی گرفتند شامل نسبت هم‌ارزی، مصرف مخصوص سوخت و آلایندة دوده است. نسبت هم‌ارزی که با علامت ϕ نمایش داده می‌شود عبارت است از تقسیم نسبت سوخت به هوا در حالت واقعی بر نسبت سوخت به هوا در حالت استوکیومتری که در رابطه ۳ نشان داده شده است.

$$\phi = \frac{(\dot{m}_f / \dot{m}_{air})_a}{(\dot{m}_f / \dot{m}_{air})_s} \quad (3)$$

مصرف مخصوص سوخت درواقع میزان نرخ جرمی مصرف سوخت، به ازای واحد توان است و این پارامتر گزینه خوبی برای مقایسه موتورهای مختلف به شمار می‌رود. مصرف مخصوص سوخت را می‌توان 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، منطقی‌تر به نظر می‌رسد. در این آزمایش نیز، مصرف مخصوص ترمزی^۱ در نظر گرفته شده است. در این کار با توجه به اینکه از

$$gfr = \frac{\dot{m}_{gas}}{\dot{m}_{gas} + \dot{m}_{Diesel}} * 100 \quad (1)$$

برای به دست آوردن دوده در هر مرحله، از دستگاه AVL-415 soot analyzer استفاده می‌کنیم. که در هر مرحله میزان دوده را برحسب میلی گرم 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 میلی گرم بر مترمکعب، بر روی نمایشگر دیجیتالی خود 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 به دست 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.

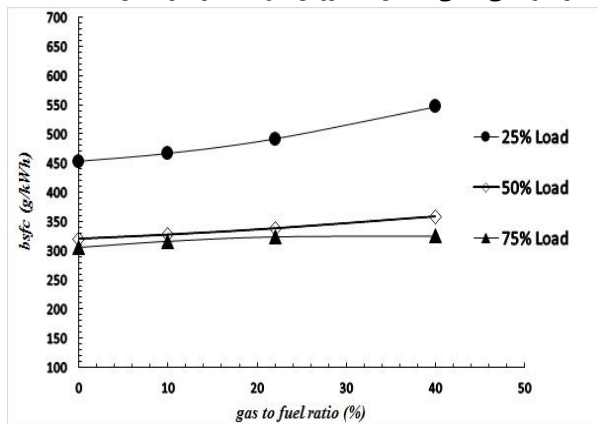
جدول ۲: دقت وسایل اندازه‌گیری

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

فشار، رطوبت و دمای هوای محیط که به داخل موتور در یک ساعت مشخص القا می‌شود بر دبی هوای ورودی و قدرت موتور تأثیر می‌گذارد.

¹ Brake specific fuel consumption

تحقیقاتی که قبلاً توسط پاپاجیاناکیس^۱ [۹] و دوکسز^۲ [۱۰] و همکاران شان انجام گرفته شده، نشان داده شده است. اما برای بارهای بالا، افزایش زیادی در مصرف مخصوص با افزایش درصد گاز وجود نمی‌آید. از جمله کارهایی که این نتایج را تایید می‌کند، بررسی کوزاکا^۳ و همکاران [۱۱]، همچنین دوکسزو همکاران [۱۰] است که در بار بالا افزایش کمتری و حتی گاهی کاهش، با افزودن سوخت گازی را نشان دادند.



شکل ۳: تغییرات مصرف مخصوص در دور ۱۲۰۰

در شکل ۴ تغییرات دوده با تغییرات درصد گاز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار گاز برای هر درصد بار، کاهش محسوس در مقدار دوده ایجاد می‌شود. دوده از ذرات کربن جامد تشکیل شده است و مقدار این آلاینده به نوع سوخت مورد استفاده، بستگی دارد. با توجه به اینکه گاز طبیعی در مقایسه با سوخت دیزل از نسبت کربن به هیدروژن پایین‌تری برخوردار است، بنابراین می‌توان گفت که مهمترین دلیل کاهش دوده تغییر در نوع سوخت است. کاهش دوده با افزودن گاز طبیعی و سایر سوخت‌های سبک دیگر، در کارهای مختلفی ارائه شده است که از جمله آن می‌توان به کار پاپاجیاناکیس [۹]، کار هوانگ^۴ و همکاران [۱۲]، کاراوالاکیس^۵ و همکاران [۱۳] اشاره کرد. همچنین در بررسی ناماسیویام^۶ [۱۴] نیز، برای سوخت‌های جایگزین سبک، کاهش در مقدار دوده گزارش شده است.

همانگونه که در شکل ۴ مشخص است بیشترین مقدار دوده در حالتی که سوخت گازی اضافه نشده است مربوط به حالت ۷۵ درصد گشتاور بیشینه است که به دلیل سوخت زیادی است که در این حالت مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما با اضافه شدن سوخت گاز طبیعی و کاهش درصد سوخت دیزل مشاهده می‌شود که در این حالت کاهش بسیار مطلوبی در آلاینده دوده وجود می‌آید.

دو سوخت گاز طبیعی و دیزل استفاده شده است، رابطه مصرف مخصوص ترمزی بدون در نظر گرفتن ارزش حرارتی، بصورت رابطه ۴ خواهد شد:

$$bsfc = \frac{\dot{m}_{diesel} + \dot{m}_{gas}}{P_b} \quad (4)$$

مقدار سوخت گازی برای هریک از حالت‌های آزمایش از ۰ تا ۴۰ درصد تغییر می‌کند. ابتدا نتایج مربوط به سرعت ۱۲۰۰ ارائه می‌شود و پس از آن سرعت ۲۰۰۰ و سپس ۳۰۰۰ بررسی خواهد شد.

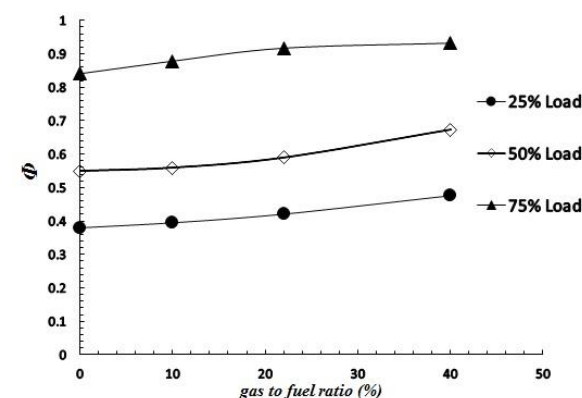
بررسی نتایج برای سرعت ۱۲۰۰

در شکل ۲، تغییرات نسبت هم‌ارزی با تغییرات درصد گاز از صفر تا ۴۰ درصد مشاهده می‌شود. در تغییرات نسبت هم‌ارزی، مخرج رابطه که همان نسبت سوخت به هوای استوکیومتری است، ثابت است. لذا زمانی که نسبت هم‌ارزی 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 می‌شود، باعث کاهش هوای وارد شده می‌گردد. پس هر افزایش و کاهش در نسبت هم‌ارزی در طول تغییرات گاز، به مقدار سوخت مصرف شده مربوط می‌شود.

در شکل ۲ مشاهده می‌شود که برای تمامی بارها با افزایش درصد گاز، نسبت هم‌ارزی افزایش دارد. بنابراین در یک بار ثابت با افزایش درصد گاز، افزایش در مصرف مخصوص سوخت انتظار می‌رود. زیرا در توان ثابت مقدار سوخت افزایش پیدا کرده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش بار، نسبت هم‌ارزی افزایش دارد. این افزایش نسبت سوخت به هوا، به این علت است که در دور ثابت با افزایش بار، توان بیشتری مورد نیاز است و برای تولید توان بالاتر، نیاز

به سوخت بیشتری می‌باشد. که این دلیلی بر افزایش مصرف مخصوص سوخت نیست. به این علت که با افزایش مقدار سوخت متعاقباً، توان هم افزایش پیدا می‌کند درحالی‌که توان اضافه شده در مقایسه با سوخت اضافه شده مقدار بیشتری دارد.



شکل ۲: تغییرات نسبت هم‌ارزی در دور ۱۲۰۰

در شکل ۳ تغییرات مصرف مخصوص نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که برای هر سه حالت ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد بار، افزایش مصرف مخصوص با افزایش درصد سوخت گازی را داریم. در بار کم مشاهده می‌شود که مصرف مخصوص بالا و میزان افزایش آن نیز با تغییرات درصد گاز زیاد است. افزایش مصرف مخصوص در بار کم، در

¹ Papagiannakis

² Daukšys

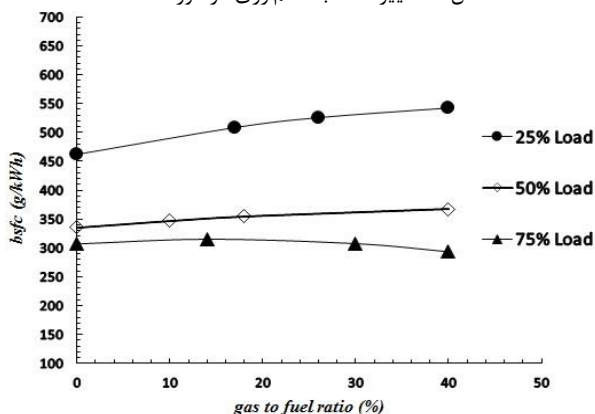
³ Kusaka

⁴ Huang

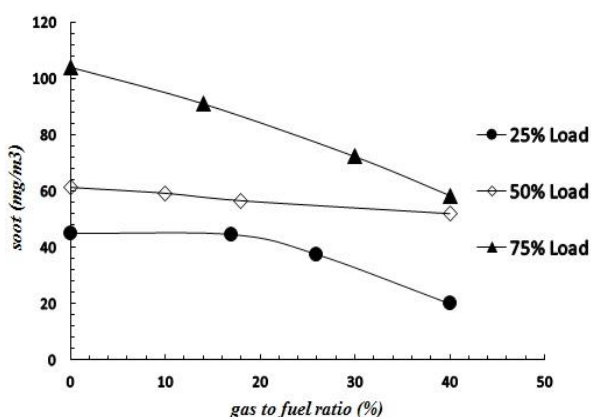
⁵ Karavalakis

⁶ Namasivayam

شکل ۵: تغییرات نسبت هم‌آزری در دور ۲۰۰۰



شکل ۶: تغییرات مصرف مخصوص در دور ۲۰۰۰

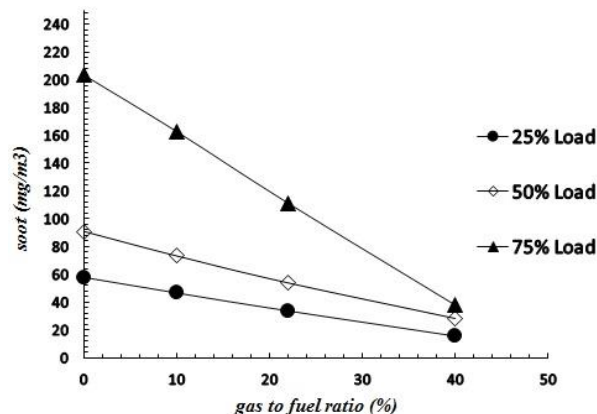


شکل ۷: تغییرات دوده در دور ۲۰۰۰

بررسی نتایج برای سرعت ۳۰۰۰

با توجه به شکل ۸، مشهود است که برای این سرعت در حالت ۵۰ و ۷۵ درصد گشتاور ماکزیمم، تقریباً نسبت هم‌آزری ثابت است و تغییر زیادی ندارد. اما برای حالت ۲۵ درصد گشتاور، نسبت هم‌آزری افزایش دارد. پس انتظار افزایش مصرف مخصوص در این بار می‌رود که با توجه به شکل ۹، این افزایش برای ۲۵ درصد بار مشخص است.

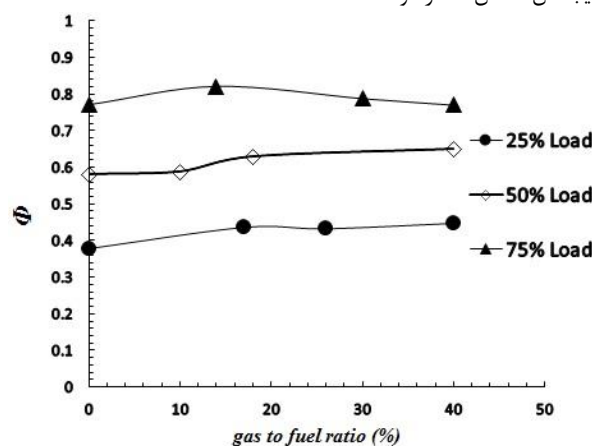
با نگاهی به نمودارها در سرعت‌های مختلف مشخص است که برای بار ۲۵ درصد در سرعت‌های ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰، با افزایش درصد سوخت گازی، مقدار نسبت هم‌آزری و مصرف مخصوص سوخت افزایش پیدا می‌کند. با این وجود، اثر مثبت گاز بر روی آلایند دوده را نیز باید در نظر گرفت. اما اگر در بارهای ۵۰ درصد و ۷۵ درصد نگاه کنیم، مشخص است که با افزایش درصد گاز برای دوره‌های مختلف، نه تنها همیشه مصرف مخصوص افزایش پیدا نمی‌کند، بلکه گاهی کاهش در مصرف مخصوص سوخت را شاهد هستیم و با توجه به اثر مثبت دیگری هم که افزودن گاز بر روی آلایند دوده دارد، استفاده از گاز در این بارها برای موتورهای دیزل هم از لحاظ کاهش آلایند دوده و هم از لحاظ اقتصادی به صرفه خواهد بود. البته باید اثر گاز طبیعی بر روی سایر آلاینده‌ها نیز بررسی شود که در کارهای آینده می‌توان به این موضوع پرداخت و به عنوان مثال اثر افزودن گاز طبیعی را بر روی اکسیدهای نیتروژن نیز بررسی کرد.



شکل ۴: تغییرات دوده در دور ۱۲۰۰

بررسی نتایج برای سرعت ۲۰۰۰

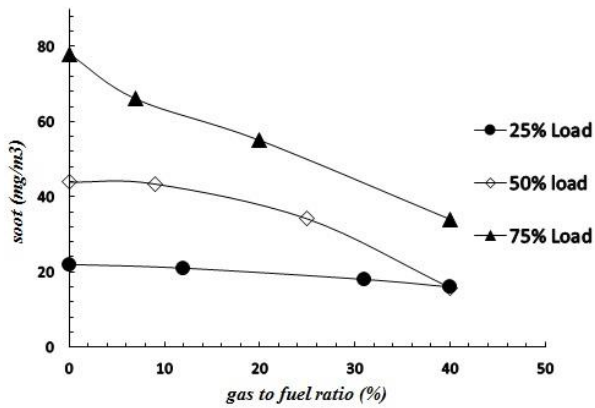
در شکل ۵ تغییرات نسبت هم‌آزری برای سرعت ۲۰۰۰ نشان داده شده است. این دور از موتور، حالتی است که بیشترین توان را دارد. با توجه به شکل برای بار بالا، از درصد گاز ۱۲ به بالا، کاهش در نسبت هم‌آزری مشاهده می‌شود و با دقت در شکل ۶ نیز مشاهده می‌کنیم که مصرف مخصوص، در همین بازه کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت از ۱۲۰۰ به ۲۰۰۰ دور، به علت تلفات اصطکاکی تر، مقداری مصرف مخصوص در حالت بدون گاز افزایش پیدا می‌کند. اما در ادامه با افزودن گاز مشاهده می‌شود که در این حالت افزایش کمتری برای تمامی حالت‌ها در مقدار مصرف مخصوص، در مقایسه با سرعت ۱۲۰۰ داریم. در شکل ۷ تغییرات مقدار دوده را مشاهده می‌کنیم. بیشترین کاهش برای کمترین بار اتفاق می‌افتد که تقریباً ۵۵ درصد است. اما بیشترین مقدار دوده، مشابه سرعت ۱۲۰۰ دور، برای ۷۵ درصد بار اتفاق افتاده است. با افزودن گاز می‌توان کاهش بسیار مطلوبی در مقدار دوده در بار بالا ایجاد کرد، هرچند که در بار پایین هم باعث کاهش در مقدار دوده می‌شود. 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 به عنوان اثری مثبت در این موتورها در نظر گرفت. اثری که این کاهش اتلاف حرارت می‌گذارد، این است که دمای داخل سیلندر را افزایش می‌دهد و باعث طولانی‌تر شدن فرآیند احتراق دیر هنگام یا نهایی می‌شود. طولانی شدن این فرآیند نتیجه‌اش کاهش مقدار دوده است.



هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران،

۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف



شکل ۷: تغییرات دوده در دور ۳۰۰۰

نتیجه‌گیری

در این بخش به‌طور خلاصه نتایجی که برای سرعت‌ها و گشتاورهای مختلف، با افزودن گاز در این موتور به‌دست آمده، ذکر می‌شود.

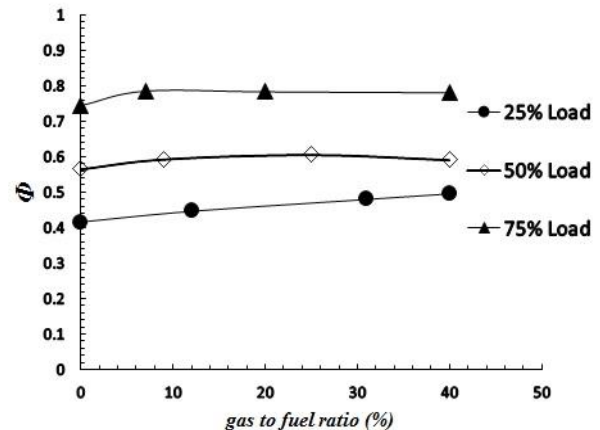
۱- در سرعت ۱۲۰۰ کاهش مناسبی در مقدار دوده در همه‌ی بارها، به‌خصوص برای ۷۵ درصد بار کامل مشاهده شد. در این بار با توجه به نسبت سوخت به هوای بالایی که موتور دارد، میزان دوده در حالت بدون گاز بالا بوده و تاثیر افزودن گاز، در کاهش دوده به‌خوبی مشهود است. مصرف مخصوص نیز در این دور، برای تمامی بارها افزایش داشت. بیشترین افزایش در حالت ۲۵ درصد بار کامل اتفاق افتاد که در این حالت ۲۰ درصد افزایش در مصرف مخصوص سوخت ایجاد می‌شود. اما برای بارهای بالاتر، این افزایش خیلی کمتر بوده و تقریباً کمتر از ۱۰ درصد افزایش در مصرف مخصوص برای دو حالت دیگر اتفاق افتاد.

۲- در سرعت ۲۰۰۰ نیز با افزودن گاز، مقدار دوده کاهش داشت که در بهترین حالت برای بار پایین، تقریباً ۵۶ درصد میزان دوده کاهش می‌یابد. مصرف مخصوص سوخت برای این دور در بار کم افزایش پیدا می‌کند که تقریباً معادل ۱۷ درصد است. اما در بار بالا تقریباً ۴/۵ درصد کاهش در مصرف مخصوص سوخت بوجود می‌آید.

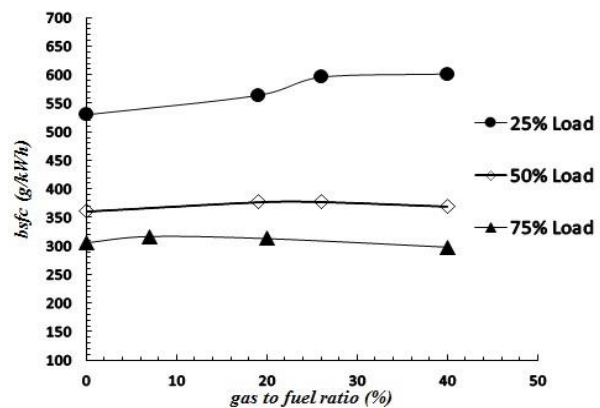
۳- در سرعت ۳۰۰۰، مشابه حالت‌های قبل، دوده در همه حالت‌ها کاهش می‌یابد و بیشترین کاهش ۶۴ درصد بود، که مربوط به بار متوسط است. مصرف مخصوص برای بارهای ۲۵ و ۵۰ درصد بار کامل، به‌ترتیب ۱۳/۵ و ۲ درصد افزایش داشت. اما برای حالت بار بالا در مقدار مصرف مخصوص سوخت به اندازه ۲/۵ درصد کاهش ایجاد شد.

فهرست علائم

$bsfc$	مصرف مخصوص سوخت ترمزی
C_f	ضریب اصلاح قدرت
gfr	درصد سوخت گازی
$\dot{m}$	دبی جرمی
P_b	توان ترمزی
P_m	فشار مطلق محیط
$P_{s,d}$	فشار استاندارد هوای خشک



شکل ۸: تغییرات نسبت هم‌ارزی در دور ۳۰۰۰



شکل ۹: تغییرات مصرف مخصوص در دور ۳۰۰۰

قبلاً توضیح داده شد که با افزایش سرعت موتور، به علت افزایش دمای سیلندر، مقدار دوده کاهش پیدا می‌کند. این اتفاق در این دور هم افتاده و مقدار دوده مخصوصاً برای ۷۵ درصد بار، کاهش بسیار مناسبی داشته است. بیشترین درصد کاهش دوده با افزایش درصد گاز، مربوط به ۵۰ درصد بار است که تقریباً ۶۴ درصد و برای ۷۵ درصد بار نیز، مقدار دوده تقریباً ۵۶ درصد کاهش دارد که درصد قابل قبولی با توجه به مقدار زیاد دوده در این بار است. شکل ۱۰ تغییرات دوده را با تغییرات گاز در سرعت ۳۰۰۰ نشان می‌دهد.

$P_{v,m}$	فشار جزئی بخار آب در محیط
T_m	دمای محیط
T_s	دمای استاندارد
	علائم یونانی
ϕ	نسبت هم‌ارزی
	زیرنویس‌ها
a	واقعی
air	هوا
$diesel$	سوخت دیزل
f	سوخت
gas	سوخت گازی طبیعی
s	استوکیومتری

مراجع و منابع

- [9] 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
- [10] 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] J. Kusaka, T. Okamoto, Y. Daisho, R. Kihara and T. Saito, Combustion and exhaust gas emission characteristics of a diesel engine dual-fueled with natural gas, *JSAE review*, Vol. 21, No. 4, pp. 489-496, 2000.
- [12] 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.
- [13] G. Karavalakis, T. D. Durbin, M. Villela and J. W. Miller, Air pollutant emissions of light-duty vehicles operating on various natural gas compositions, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 4, pp. 8-16, 2012.
- [14] A. Namasivayam, T. Korakianitis, R. Crookes, K. Bob-Manuel and J. Olsen, Biodiesel, emulsified biodiesel and dimethyl ether as pilot fuels for natural gas fuelled engines, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 3, pp. 769-778, 2010.
- [1] J. Caban, A. Gniecka and L. Holeša, Alternative fuels for diesel engines, *Advances in Science and Technology Research Journal*, Vol. 7, No. 20, 2013.
- [2] 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.
- [3] P. Sahoo, L. Das, M. Babu, P. Arora, V. Singh, N. Kumar and T. Varyani, Comparative evaluation of performance and emission characteristics of jatropa, karanja and polanga based biodiesel as fuel in a tractor engine, *Fuel*, Vol. 88, No. 9, pp. 1698-1707, 2009.
- [4] S. Jindal, B. P. Nandwana and N. S. Rathore, Comparative evaluation of combustion, performance, and emissions of jatropa methyl ester and karanj methyl ester in a direct injection diesel engine, *Energy & Fuels*, Vol. 24, No. 3, pp. 1565-1572, 2010.
- [5] M. Nagarhalli, V. Nandedkar and K. Mohite, Emission and performance characteristics of karanja biodiesel and its blends in a CI engine and it's economics, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 2, pp. 52-56, 2010.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.