بررسی کاربرد سوخت‌های گازی (گاز طبیعی، هیدروژن، بیوگاز) بر عملکرد و انتشار آلایندگی موتورهای دیزل

سید سجاد جعفری موحد[1*]،عباس روحانی[2]،محمدعلی ابراهیمی نیک[3]، جواد زارعی[4]

۱.گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.(seyedsajjad.jafarimovahed@mail.um.ac.ir)
۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.(arohani@um.ac.ir)
۳. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.(ebrahimi-nik@um.ac.ir)
٤. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.(javadzareei@um.ac.ir)

چکیده

طراحی و ارزیابی پارامترهای عملکردی و انتشار آلایندگی موتورهای احتراق داخلی به‌عنوان پیشران و محرک سامانه‌های مکانیکی از اهمیت ویژه‌ای برخورداراست. همانند هر وسیله صنعتی دیگر، قوانین و استانداردهای خاصی جهت بهره‌برداری و تجاری‌سازی موتورهای احتراق داخلی وضع شده است. مجموعه استانداردهای یورو ازجمله استانداردهایی است که در اغلب کشورهای پیشرفته و درحال‌توسعه مورد توجه کارخانجات تولید پیشرانه‌های احتراق داخلی قرارگرفته است. سامانه‌های حمل‌ونقل درون‌شهری به‌عنوان منبع اصلی تولید آلایندگی، هدف اصلی اصلاح ساختاری در موتور جهت کاهش مصرف سوخت هستند تا از این جهت سبب کاهش انتشار آلایندگی نیز شوند. سه گاز هیدروژن، گاز طبیعی و بیوگاز را می توان جهت کاهش آلایندگی موتورهای دیزلی به کاربرد.

کلمات کلیدی:
بیوگاز، گازطبیعی، هیدروژن، موتور دیزلی، آلایندگی، عملکرد، دوگانه‌سوز

بررسی کاربرد سوخت‌های گازی (گاز طبیعی، هیدروژن، بیوگاز) بر عملکرد و انتشار آلایندگی موتورهای دیزل

مقدمه

طراحی و ارزیابی پارامترهای عملکردی و انتشار آلایندگی موتورهای احتراق داخلی به‌عنوان پیشران و محرک سامانه‌های مکانیکی از اهمیت ویژه‌ای برخورداراست. همانند هر وسیله صنعتی دیگر، قوانین و استانداردهای خاصی جهت بهره‌برداری و تجاری‌سازی موتورهای احتراق داخلی وضع شده است. مجموعه استانداردهای یورو ازجمله استانداردهایی است که در اغلب کشورهای پیشرفته و درحال‌توسعه مورد توجه کارخانجات تولید پیشرانه‌های احتراق داخلی قرارگرفته است. این استاندارد به کاهش هیدروکربن های نسوخته (HC)، کربن مونوکسید(CO)، دی اکسید کربن(CO_2) و اکسیدهای نیتروژن(NO_X) تاکید دارد [2]. مصرف روز افزون سوخت‌های فسیلی اگر چه سبب رشد سریع اقتصادی جوامع شده است ما انتشار آلاینده‌های ناشی از آن‌ها و افزایش دی اکسید کربن در جو، مشکلات زیست محیطی را به وجود آورده است[3]. تأکید روزافزون استانداردهای یورو بر کاهش میزان آلایندگی موتورهای احتراق داخلی با رویکرد کاهش مصرف سوخت باعث شده تا شرکت‌های معتبر خودروسازی بیش‌ازپیش به سمت کاهش انتشار آلایندگی و مصرف سوخت موتورهای احتراق داخلی سوق داده شوند.

سامانه‌های حمل‌ونقل درون‌شهری به‌عنوان منبع اصلی تولید آلایندگی، هدف اصلی اصلاح ساختاری در موتور جهت کاهش مصرف سوخت هستند تا از این جهت سبب کاهش انتشار آلایندگی نیز شوند. سه گاز هیدروژن، گاز طبیعی و بیوگاز را می توان جهت کاهش آلایندگی موتورهای دیزلی به کاربرد.

معرفی و پیشینه پژوهش

موتورهای دیزل- گاز طبیعی

گاز طبیعی به دلیل در دسترس بودن در داخل کشور ، زیرساخت های توزیع گسترده ، هزینه کم و کیفیت سوختن پاک ، سوختی بسیار امیدوار کننده و بسیار جذاب است که به عنوان سوخت حمل و نقل مورد استفاده قرار می گیرد. گاز طبیعی / گازوئیل دوگانه سوز یک حالت عملیاتی است که در آن گاز طبیعی به هوای ورودی بالادست منیفولد وارد می شود و سپس توسط گازوئیل تزریق مستقیم در سیلندر مشتعل می شود.

عبدالله و همکاران، (۲۰۱۲) به مقایسه‌ی پارامترهای عملکردی و انتشار آلایندگی یک موتور دیزل تک سیلندر در حالت دوگانه سوز (دیزل – گاز طبیعی) با تکنیک EGR [1]، حالت دوگانه سوز بدون حالت دیزل های معمول دربارگذاری‌های مختلف پرداختند. طبق بررسی آنها استفاده از حالت دوگانه‌سوز بدون EGR و با EGR میزان فشار حداکثر داخل سیلندر را کاهش می داد، در نتیجه در حالت دوگانه طول عمر موتور افزایش می یافت. همچنین سبب افزایش تاخیر در اشتعال می شد. از دیگر نتایج آنها استفاده از حالت دوگانه در بارگذاری پایین نرخ آزاد شدن گرما کاهش و در بارگذاری بالا نرخ آزاد شدن گرما را افزایش می دهد. میزان NO_X و CO_2 در حالت‌های دوگانه کاهش یافت اما میزان CO و HC افزایش یافت[4].

1 Exhaust Gas Recirculation

درپژوهشی دیگر (لیو و همکاران ۲۰۱۳) میزان آلایندگی یک موتور دیزل-گاز طبیعی در درصدهای مختلف دیزل و زمان‌های تزریق مختلف مورد بررسی قرار دادند. طبق مشاهدات آن‌ها حالت دوگانه سوز به طور متوسط ۳۰٪ میزان انتشار NO_X را کاهش می داد. همچنین دریافتند میزان هیدروکربن‌های نسوخته در حالت دوگانه‌سوز در بارهای کم و متوسط به مراتب از حالت دیزلی بیشتر است که حدود ۹۰٪ از انتشار THC مربوط به متان نسوخته بود این و بدان معنی بود که شعله در کل سیلندر گسترش نمی یافت. با افزایش میزان پاشش دیزل مقدار هیدرکربن‌های نسوخته کاهش می یافت. باتوجه به وجود مخلوط همگن گاز طبیعی و اکسیژن میزان ذرات معلق کاهش یافت ولی با افزایش میزان پاشش دیزل مقدار ذرات معلق افزایش می یافت[5].

موتورهای دیزل- هیدروژن

به دلیل ارزش حرارتی بالا و عدم وجود کربن در ساختار هیدروژن میزان هیدروکربن‌های نسوخته و کربن مونو کسید و کربن کاهش می یابد. در این موتورها هیدروژن به عنوان سوخت افزودنی به همراه اکسیژن از منیفولد ورودی وارد موتور می شود و سوخت دیزل توسط انژکتور به داخل سیلندر تزریق می شود و پس از فشرده سازی احتراق صورت می گیرد. در همین راستا یاسین کارقوز و همکاران، (۲۰۱۶) تفاوت عملکردی موتور دیزل ، میزان انتشار و خصوصیات احتراق با افزودن درصدهای مختلف هیدروژن مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش کردند که افزودن هیدروژن به موتور سبب کاهش قابل توجهی در انتشار دوده خروجی می‌شود اما افزایش چشمگیر اکسیدهای نیتروژن را در پی دارد. همچنین افزایش میزان هیدروژن سبب افزایش ناچیز هیدروکربن‌های نسوخته می شود. این در حالی بود که میزان کربن مونوکسید(CO)، دی اکسید کربن(CO_2) به صورت چشمگیری کاهش می یافت. آن‌ها درصدهای مختلفی از هیدروژن برای تامین بخشی از کل انرژی مورد نیاز برای موتور را در شش دور موتور مختلف با بار کامل مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند استفاده از هیدروژن، از ۰ تا ۲۵ درصد از کل انرژی مورد نیاز، سبب کاهش ۸ تا ۱۵ درصدی گشتاور و توان تولیدی موتور می شود. با افزایش این میزان تا ۵۰ درصد کاهش ۱۰ تا ۲۵ درصدی میزان گشتاور وتوان تولیدی را مشاهده کردند[6].

در پژوهشی دیگر دمتریوف و همکاران، (۲۰۱۸) ویژگی‌های احتراق و آلایندگی یک موتور دوگانه سوز هیدروژن – دیزل مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها درصدهای مختلفی از هیدروژن رو در بارگذاری های مختلف مورد بررسی قرار دادند و سهم تاثیر انرژی هیدروژن و استراتژی های مختلف احتراق مانند گردش مجدد گازهای خروجی اگزوز، فشار تزریق دیزل و استراتژی های مختلف تزریق دیزل رو مورد بررسی قرار دادند. طبق تحقیقات انجام شده، آن‌ها گزارش کردند، در بارگذاری کم اگرچه میزان انتشار گاز های گلخانه‌ای کاهش می یابد که بسیار امیدوار کننده بود اما با افزایش میزان بارگذاری میزان انتشار آلاینده اکسیدهای نیتروژن افزایش می یابد[7].

همچنین طالبی و همکاران، (۲۰۱۸) استفاده از هیدروژن را در دو موتور سنگین و سبک دیزلی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها میزان هیدروژن به کاربرده شده را از ۸ تا ۲۰ درصد از حجم کلی سوخت تغییر دادند و از گردش مجدد گازهای خروجی اگزوز (EGR) جهت کاهش میزان اکسیدهای نیتروژن استفاده کردند. طبق مشاهدات آن‌ها افزایش میزان هیدروژن در موتورهای سبک دیزلی باعث افزایش میزان NOx می شد اما در موتورهای سنگین این مقدار تقریبا پایدار بود. همچنین با افزایش میزان هیدروژن میزان، کربن مونوکسید برای هر دو موتور کاهش می‌یافت[8].

موتورهای دیزل- بیوگاز

بیوگاز سوخت گازی تجدیدپذیری است که از منابع غیر متمرکز برلی تامین انرژی در مناطق روستایی به حساب می‌آید. بیوگاز از تخمیر بی هوازی موادی مثل فضولات گاوی، فاضلاب شهری در دایجستر بدست می‌آید. بیوگاز متشکل از ٤٠ تا ٧٥ درصد متان، ٢٠ تا ٥٥ درصد کربن دی اکسید و مابقی H_2S است. نحوه‌ی عملکرد به این صورت است که مخلوط هوا و بیوگاز در محفظه احتراق وارد می شود و با فشرده سازی دیزل احتراق صورت می‌گیرد. بیشتر انرژی احتراق در این موتورها با استفاده از سوخت گازی تامین می شود و بخش اندکی مربوط به سوخت دیزل است. باید توجه داشت این موتورها به هوای اضافی بیشتری نیاز دارند. باید توجه داشت در صورت اختلال یا تولید نوسان تولید بیوگاز، این موتورها می توانند بدون هیچ اشکالی با سوخت دیزل مشتعل شوند [1]. بیوگاز به دلیل داشتن دمای بالای احتراق خود به خودی و عدد ستان پایین در موتورهای تراکمی استفاده می شود. این خصوصیات قابلیت کاهش اکسیدهای نیتروژن(NO_X) و ذرات معلق را دارد.

در همین راستا جاگدیش و همکاران، (٢٠٢٠) تغییرات مرحله به مرحله یک موتور دیزل دوگانه سوز با بیوگاز مورد بررسی قرار دادند. بیوگاز مورد استفاده آن‌ها پسماند مواد غذایی بود و پارامتر مورد بررسی آن‌ها، تغییرات میزان بیوگاز ورودی از منیفولد هوا بود. طبق مشاهدات آن‌ها با افزایش بار و میزان بیوگاز ورودی، فشار متوسط داخل سیلندر و فشار حداکثری در سیلندر، افزایش می‌یافت و با افزایش میزان بار اکسیدهای نیتروژن(NO_X) افزایش می‌یافت. اما این افزایش در حالت‌های دوگانه‌سوز به مراتب از حالت دیزل به صورت تک کمتر بود[9].

در پژوهشی دیگر آمبریتا، (٢٠١٧)، بر روی عملکرد و خصوصیات احتراقی یک موتور دیزلی (با حداکثر توان ٤/٤١ وات) به‌صورت دوگانه‌سوز(با بیوگاز) بدون هیچ تغییری پرداخت. او این پژوهش را در دو سرعت و دو توان مختلف انجام داد. پارامترهای مورد بررسی او نرخ جریان بیوگاز و غلظت متان بود که تاثیر این موارد بر عملکرد و انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از پژوهش او به این صورت بود که اگر از بیوگاز به صورت مکمل در موتور دیزلی استفاده شود عملکرد بهتری نسبت به دیزل به صورت مجزا دارد و بیوگاز نقش موثری در کاهش مصرف سوخت دارد. همچنین بازده حرارتی ترمزی (BTE)[۲] موتور در حالت دوگانه‌سوز به شدت تحت تأثیر نرخ جریان بیوگاز و غلظت متان قرار دارد[10].

همچنین پالی روشا و همکارانش، (٢٠١٨) به بررسی تجزیه و تحلیل عملکرد بیوگاز، گازسنتز و هیدروژن در دو موتور دیزلی و بیودیزلی پرداختند. آن ها مشخصه‌های مختلف موتور مانند احتراق، عملکرد و انتشار گازهای گلخانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند ونتایج خود را به این صورت گزارش کردند که استفاده از بیوگاز در موتور دیزل میزان گرمای آزاد شده را افزایش و فشار ایجاد شده در سیلندر را به حداکثر می رساند. توان ترمزی نیز در صورت استفاده از بیوگاز به دلیل وجود مواد رقیق‌کننده کاهش می‌یابد [11].

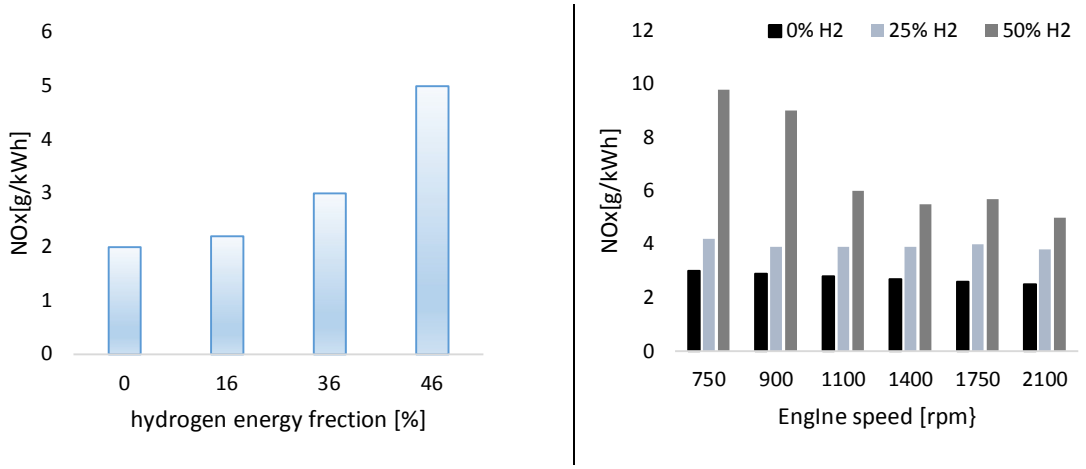
در پژوهشی دیگر در همین راستا بورا و همکارانش (٢٠١٤)، با توجه به تأثیر شروع زمان پاشش بر عملکرد و انتشار گازهای گلخانه‌ای در موتورهای دوگانه‌سوز(بیوگاز- دیزلی) زمان‌بندی تزریق را مورد بررسی قرار دادند. زمان بندی تزریق پایه موتور مورد بررسی آن ها ٢٩ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا بود و این موتور حداکثر بازده ٢٥/٨١ درصد (با درصد سوخت مایع ٧٥/٧٧) را در بارگذاری کامل داشت. در این زمان بندی خاص میزان تولید CO و آلایندگی کمترین مقدار را داشت. نتایج بررسی آن ها نشان می داد که افزایش زمان تزریق سوخت پایلوت دیزل یک ابزار قدرتمند برای بهبود عملکرد موتور است، اما این روش سبب افزایش NO_X خروجی و فشار در سیلندر می شود[12] .

1 Brake thermal efficiency

بررسی استفاده هیدروژن در موتورهای دیزلی به صورت دوگانه‌سوز

میزان انتشار NOx

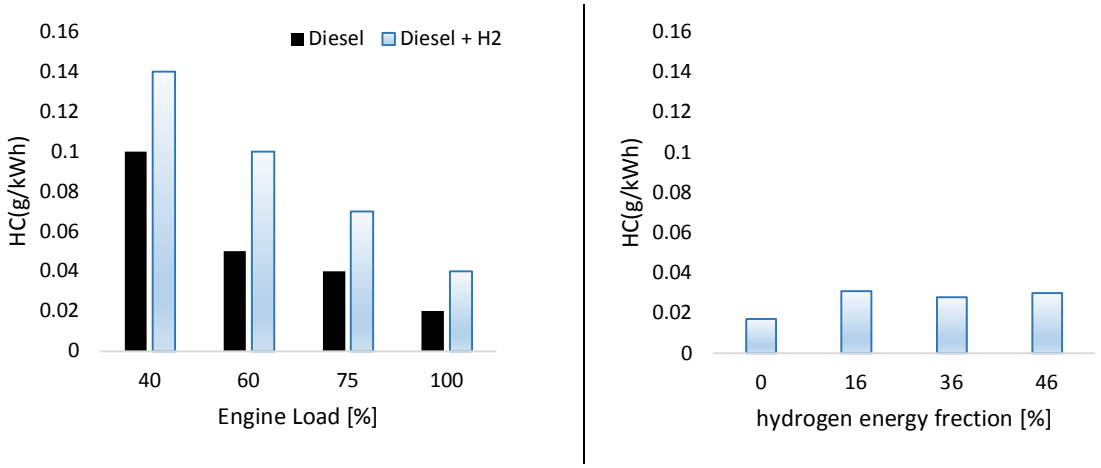
شکل ۱ میزان انتشار NO_X را برای هیدروژن نشان می دهد. سندلیسی و کارقوز، (۲۰۱٤) سهم تاثیر هیدروژن برای تامین انرژی مورد نیاز یک موتور مورد در دور موتورهای ثابت مورد بررسی قرار دادند و همچنین کارقوز و همکاران، (۲۰۱٦) سهم تاثیر هیدروژن را در دور موتورهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج مورد بررسی آنها احتراق هیدروژن به همراه دیزل دمای بسیار بالایی ایجاد می کند، در نتیجه دمای سیلندر به شدت افزایش پیدا می‌کند. همچنین هیدروژن قابلیت احتراق بسیار بالایی دارد و در طیف وسیعی از اکسیژن احتراق صورت می‌گیرد. در نتیجه استفاده از هیدروژن سبب افزایش NO_X در این حالت می شود[6,13].



شکل ۱ – میزان انتشار NOx برای حالت دوگانه سوز هیدروژن[6,13]

میزان انتشار هیدروکربن های نسوخته

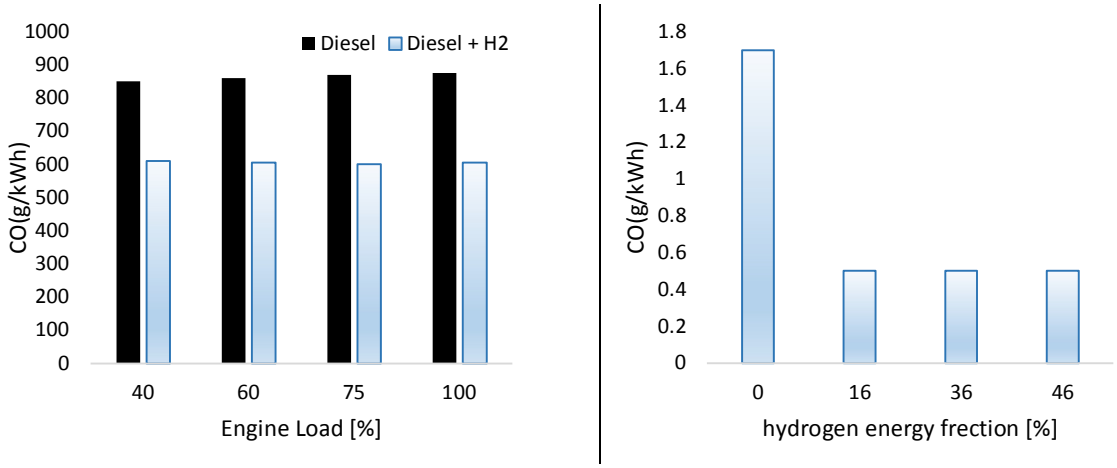
شکل ۲ میزان انتشار HC را برای هیدروژن نشان می دهد. سندلیسی و کارقوز، (۲۰۱٤) سهم تاثیر هیدروژن برای تامین انرژی مورد نیاز یک موتور مورد در دور موتورهای ثابت مورد بررسی قرار دادند و همچنین کارقوز و همکاران، (۲۰۱٦) حالت دوگانه را در مقدار هیدروژن ثابت و بارگذاری های متغیر مورد بررسی قرار دادند. طبق بررسی این دو گروه از پژوهشگران کاهش راندمان حجمی به دلیل وجود هیدروژن و جلوگیری از وجود ورود اکسیژن به دلیل وجود هیدروژن میزان هیدروکربن‌های نسوخته را افزایش می‌دهد[13,14].



شکل ۲ - میزان انتشار HC برای حالت دوگانه سوز هیدروژن[13,14].

میزان انتشار CO

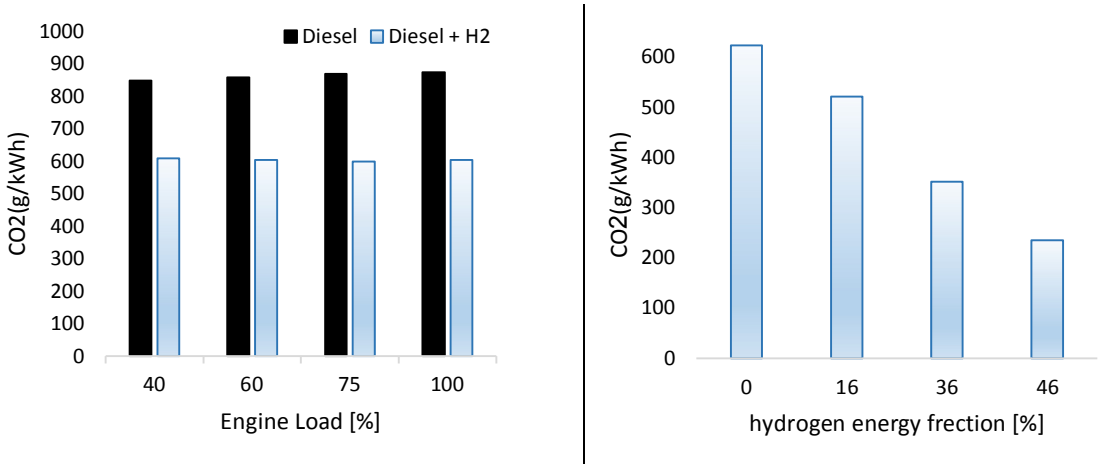
شکل۳ میزان انتشار CO را برای هیدروژن نمایش می دهد. سندلیسی و کارقوز، (۲۰۱٤) سهم تاثیر هیدروژن برای تامین انرژی مورد نیاز یک موتور مورد در دور موتورهای ثابت مورد بررسی قرار دادند و همچنین کارقوز و همکاران، (۲۰۱٦) حالت دوگانه را در مقدار هیدروژن ثابت و بارگذاری های متغیر مورد بررسی قرار دادند. همچنین طبق بررسی این دو گروه از پژوهشگران به دلیل قابلیت انتشار بسیار بالای هیدروژن، اکسیژن بسیار زیادی در اختیار احتراق قرار می‌گیردف در نتیجه احتراق کامل‌تری صورت می گیرد و در نتیجه میزان انتشار CO کاهش می یابد[13,14].



شکل۳ - میزان انتشار CO برای حالت دوگانه سوز هیدروژن[13,14].

میزان انتشار CO_2

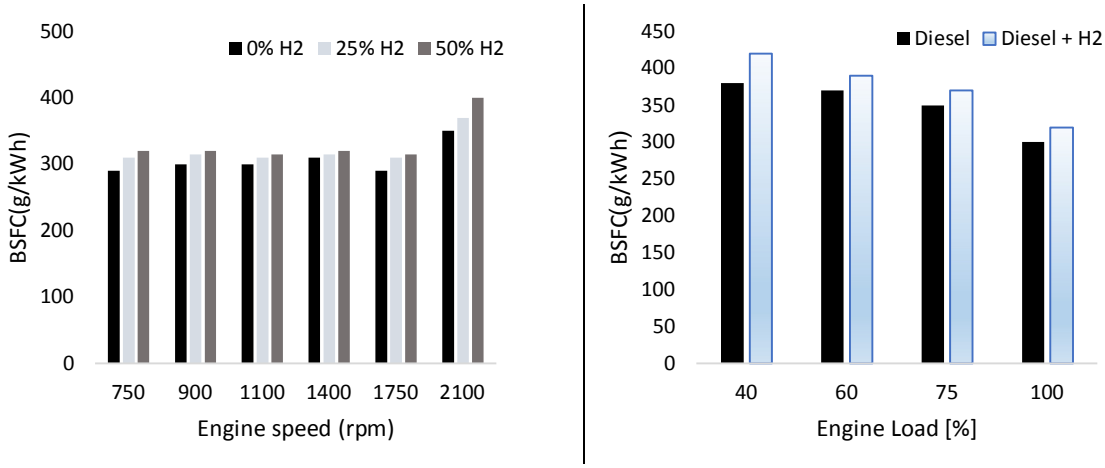
شکل٤ میزان انتشار CO_2 را برای هیدروژن نمایش می دهد. سندلیسی و کارقوز، (۲۰۱٤) سهم تاثیر هیدروژن برای تامین انرژی مورد نیاز یک موتور مورد در دور موتورهای ثابت مورد بررسی قرار دادند و همچنین کارقوز و همکاران، (۲۰۱٦) حالت دوگانه را در مقدار هیدروژن ثابت و بارگذاری های متغیر مورد بررسی قرار دادند. طبق بررسی این دو گروه از پژوهشگران به علت عدم وجود کربن در ساختار هیدروژن و همچنین ترکیب یکنواخت سوختی هیدروژن و اکسیژن میزان کربن دی اکسید کاهش می یافت[13,14].



شکل ٤ – میزان انتشار CO_2 برای حالت دوگانه سوز هیدروژن[13,14].

مصرف سوخت ویژه ترمز(BSFC)[3]

شکل ٥ BSFC **را برای هیدروژن نشان می‌دهد. کاقوز و همکاران، (۲۰۱٦) (۲۰۱۵) طبق دو پژوهش مختلف از یک گروه محققین که یک بار سهم تأثیر هیدروژن بر عملکرد بر دور موتورهای مختلف مورد بررسی قرار دادند و یک بار میزان بارگذاری برای حالت دوگانه‌سوز را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه حاصل شد که کمبود اکسیژن کافی در مخلوط و کاهش قدرت موتور از دلایل اصلی افزایش مصرف سوخت ویژه ترمز است**[6,15].



شکل ٥ – میزان BSFC برای حالت دوگانه سوز هیدروژن[6,15].

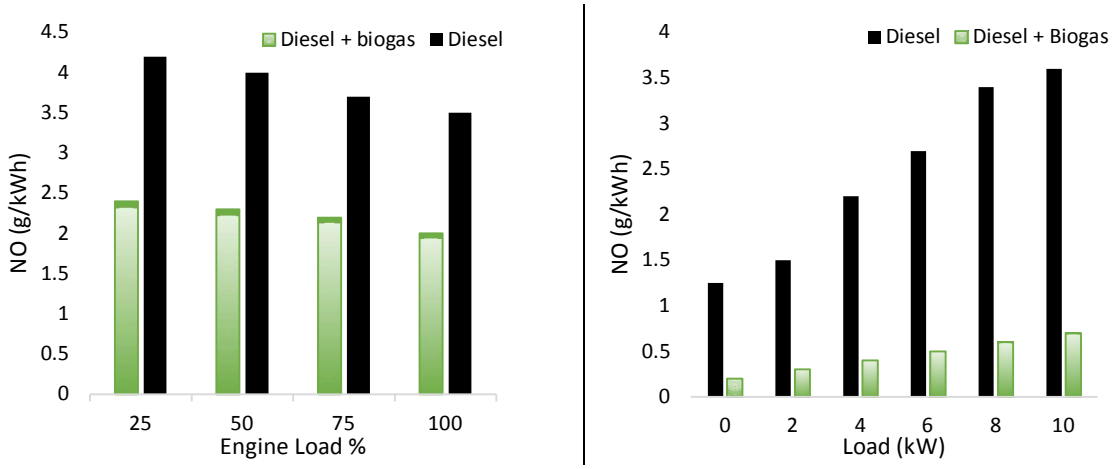
بررسی استفاده بیوگاز در موتورهای دیزلی به صورت دوگانه‌سوز

میزان انتشار NO_X

شکل ٦ میزان انتشار NO_X **را برای بیوگاز نشان می دهد. باریک و مورگان، (۲۰۱٤) مقادیر مختلفی از بیوگاز را در حالت دوگانه‌سوز به موتور دیزلی تزریق کردند. میزان انتشار** NO_X **را مورد بررسی قرار دادند. همچنین در پژوهشی دیگر نایاک و شاهو، (۲۰۲۰) به مقایسه‌ی عملکرد و آلایندگی در موتورهای دیزلی پرداختند. نتایج این دو گروه از**

1 Brake-specific fuel consumption

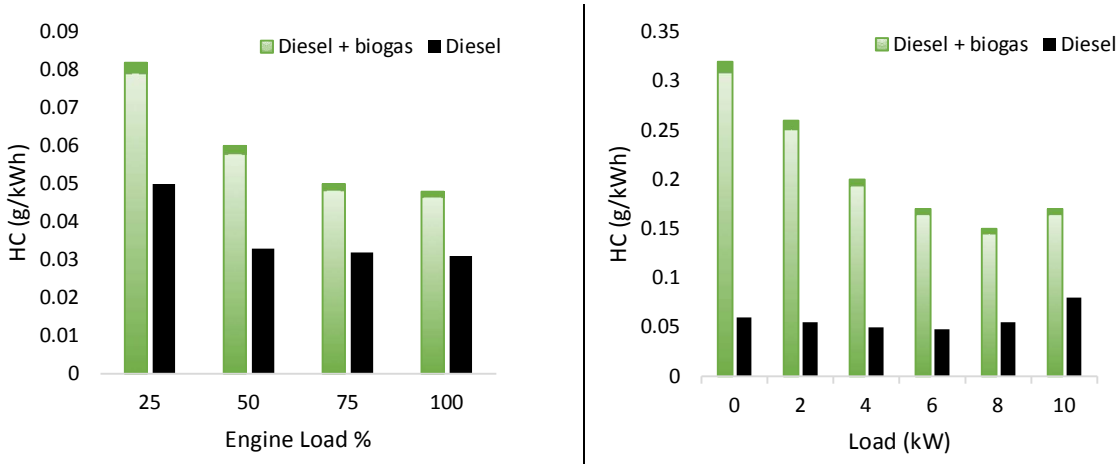
پژوهشگران نشان می داد که وجود بیوگاز سبب کاهش میزان اکسیژن در سیلندر می شود و همچنین وجود CO_2 سبب رقیق شدن ترکیب و کاهش دمای چرخه می شود در نتیجه میزان NO_X کاهش می‌یابد[16,17].



شکل ٦ - میزان انتشار NOx برای حالت دوگانه سوز بیوگاز[16,17].

میزان انتشار HC

شکل ۷ میزان انتشار HC را برای بیوگاز نشان می دهد. باریک و مورگان، (۲۰۱٤) مقادیر مختلفی از بیوگاز را در حالت دوگانه‌سوز به موتور دیزلی تزریق کردند. میزان انتشار HC را مورد بررسی قرار دادند. همچنین در پژوهشی دیگر نایاک و شاهو، (۲۰۲۰) به مقایسه‌ی عملکرد و آلایندگی در موتورهای دیزلی پرداختند. طبق نتایج این دو گروه از پژوهشگران کاهش دمایی که در سیلندر اتفاق می افتاد اگر چه سبب کاهش میزان NOx می شود، اما سبب عدم گسترش مناسب شعله می شود که در نتیجه میزان میزان HC افزایش می یافت[16,17] .

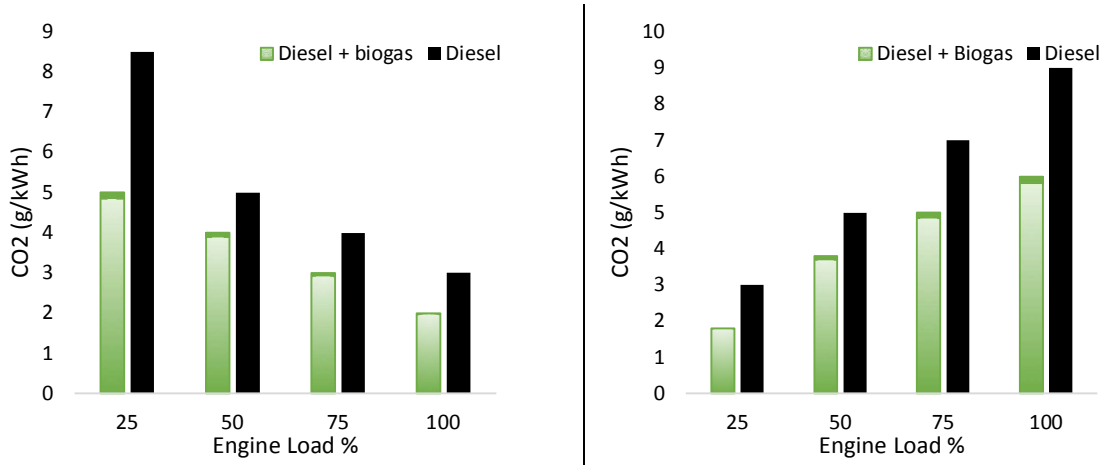


شکل ۷ - میزان انتشار HC برای حالت دوگانه سوز بیوگاز[16,17].

میزان انتشار CO_2

شکل ۱۵ و شکل ١٦ میزان انتشار CO_2 را نشان می دهد. باریک و مورگان، (۲۰۱٤) مقادیر مختلفی از بیوگاز را در حالت دوگانه‌سوز به موتور دیزلی تزریق کردند. میزان انتشار CO_2 را مورد بررسی قرار دادند. همچنین در پژوهشی

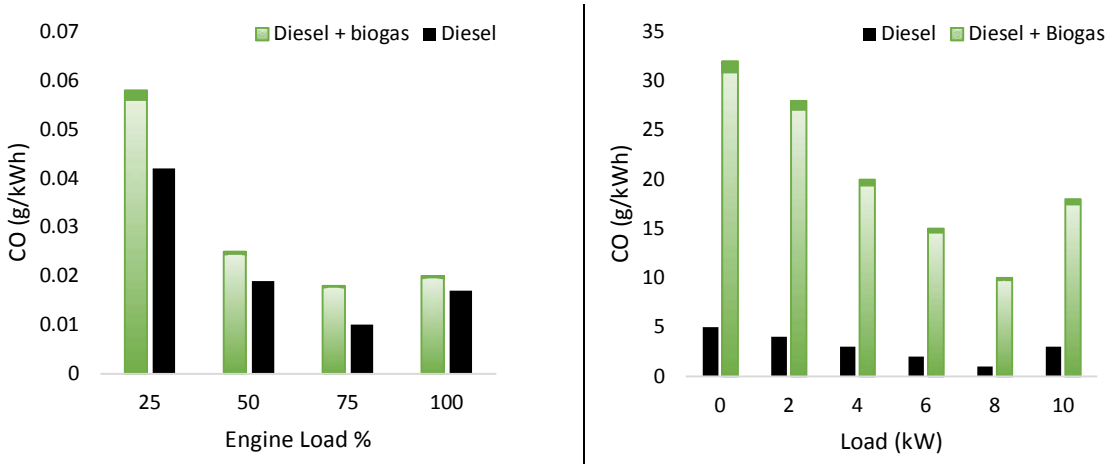
دیگر جاگادیش و گامتاپور، (۲۰۲۰) درصدهای مختلفی از بیوگاز را به موتور تزریق کردند و تغییرات را مرحله به مرحله مورد بررسی قرار دادند. طبق یافته های این دو گروه از پژوهشگران دریافتند؛ که با تزریق بیوگاز میزان کربن مونوکسید افزایش پیدا میکند و به صورت متقابل میزان کربن دی اکسید کاهش پیدا میکند؛ همچنین در حالت دوگانه سوز احتراق ناقص تری داریم و همچنین تعداد کربن در بیوگاز کم است در نتیجه این میزان کاهش می یابد[9,17].



شکل ۸ – میزان انتشار CO2 برای حالت دوگانه سوز بیوگاز [9,17].

میزان انتشار CO

شکل ۹ میزان انتشار CO را نشان می دهد. باریک و مورگان، (۲۰۱٤) مقادیر مختلفی از بیوگاز را در حالت دوگانه‌سوز به موتور دیزلی تزریق کردند. میزان انتشار CO را مورد بررسی قرار دادند. همچنین در پژوهشی دیگر نایاک و شاهو، (۲۰۲۰) به مقایسه‌ی عملکرد و آلایندگی در موتورهای دیزلی پرداختند. طبق مشاهده این دو گروه از پژوهشگران در حالت دوگانه سوز احتراق ناقص بسیار زیاد است. این به دلیل کاهش راندمان حجمی،کاهش دمای سیلندر و کاهش فاصله بین پیستون و دیواره است. در نتیجه میزان کربن مونوکسید افزایش پیدا می کند [16,17].

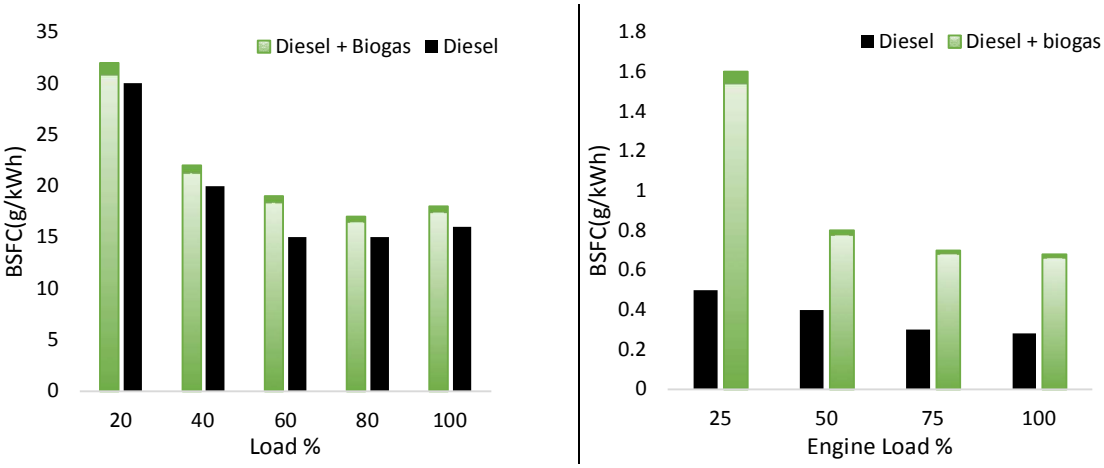


شکل ۹ – میزان انتشار CO برای حالت دوگانه سوز بیوگاز [16,17].

مصرف سوخت ویژه ترمز(BSFC)

شکل ۱۰ میزان BSFC را برای بیوگاز نشان می‌دهد. باریک و مورگان، (۲۰۱٤) مقادیر مختلفی از بیوگاز را در حالت دوگانه‌سوز به موتور دیزلی تزریق کردند. همچنین لونیسی، (۲۰۱٤) میزان BSFC را برای موتوری که ٦۰ درصد

انرژی مورد نیازش را از بیوگاز تامین می شد را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج این دو پژوهش، این دو گروه از پژوهشگران دریافتند، که به دلیل تراکم انرژی پایین بیوگاز، دمای پایین سیلندر و وجود CO_2 در بیوگاز که از سرعت بالای احتراق جلوگیری می کند، میزان BSFC در حالت دوگانه‌سوز افزایش می یافت[17,18].



شکل ۱۰ – میزان BSFC برای حالت دوگانه سوز بیوگاز[17,18].

نتایج استفاده از گاز طبیعی

میزان انتشار NO_X

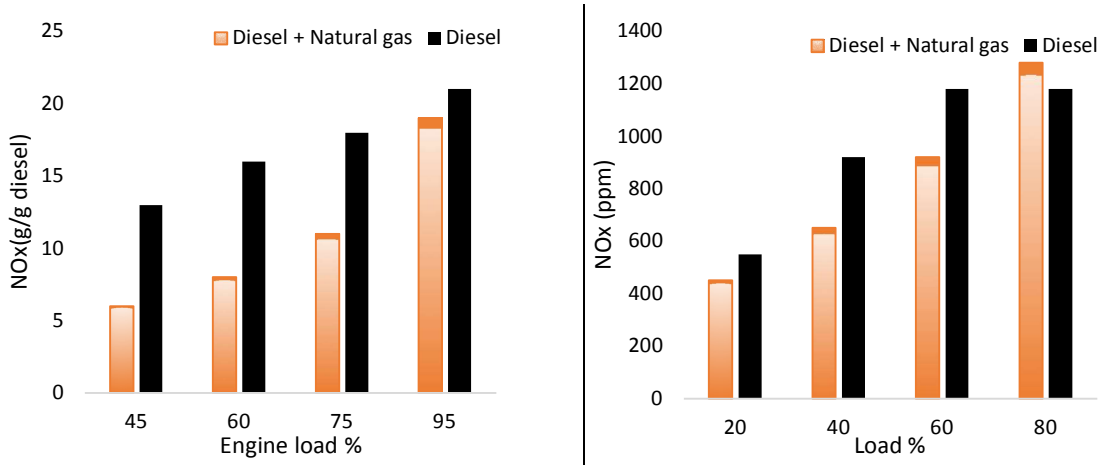
شکل ۱۱ میزان انتشار NOx برای گازطبیعی را نشان می‌دهد. عبدلال و همکاران ،(۲۰۱۲) به مقایسه سه حالت در موتورهای دیزل پرداختند. موارد مورد بررسی آنان استفاده از EGR در موتور دوگانه سوز، موتور دوگانه سوز بدون EGR، موتور دیزل به صورت تک سوختی بود[4]. همچنین لونیسی و همکاران، (۲۰۱۲) به مقایسه‌ی میزان انتشار NOx در حالت دوگانه‌سوز و پرداختند[19]. طبق بررسی‌های صورت گرفته در منابع مختلف توسط وی و گنگ، (۲۰۱۵) در برخی منابع افزایش میزان NOx گزارش شده و در برخی منابع کاهش میزان NOx گزارش شده است علت کاهش میزان NO_X را می توان به دلایل زیر توجیح کرد[20].

ظرفیت گرمایی بالاتر گاز طبیعی از اکسیژن سبب می شود. با ترکیب گاز طبیعی و اکسیژن ظرفیت گرمایی کلی سیلندر افزایش یابد. افزودن گاز طبیعی باعث افزایش ظرفیت کلی گرما در مخلوط سیلندر می شود که منجر به کاهش میانگین دما در پایان فشار فشرده سازی و در طی فرآیند احتراق کلی می شود. کاهش دما سبب کاهش میزان NO_X می شود. افزایش تاخیر در احتراق سبب کاهش دمای احتراق می شود و کاهش میزان NO_X می‌شود. ترکیب گاز طبیعی و اکسیژن، میزان اکسیژن را کاهش می دهد در نتیجه میزان NOx کاهش می یابد. افزایش دور موتور سبب می شود زمان کمتری برای تشکیل NO_X وجود داشته است.

همچنین علت افزایش میزان NO_X را می توان به موارد زیر اشاره کرد:

میزان گرمای آزاد شده در این موتورها بیشتر است درنتیجه حداکثر دمای احتراق افزایش می یابد و در نتیجه میزان NOx افزایش می یابد.

احتراق بهتر سوخت‌ها ، انتشار CO کمتری درپی دارد ودر نتیجه اکسیژن کمتری مصرف می شود. بنابراین ممکن است اکسیژن بیشتری برای تشکیل NO_X در دسترس باشد و میزان انتشار NO_X را افزایش دهد.



شکل ۱۱ – میزان انتشار NOx برای حالت دوگانه سوزگاز طبیعی[4,19].

میزان انتشار CO

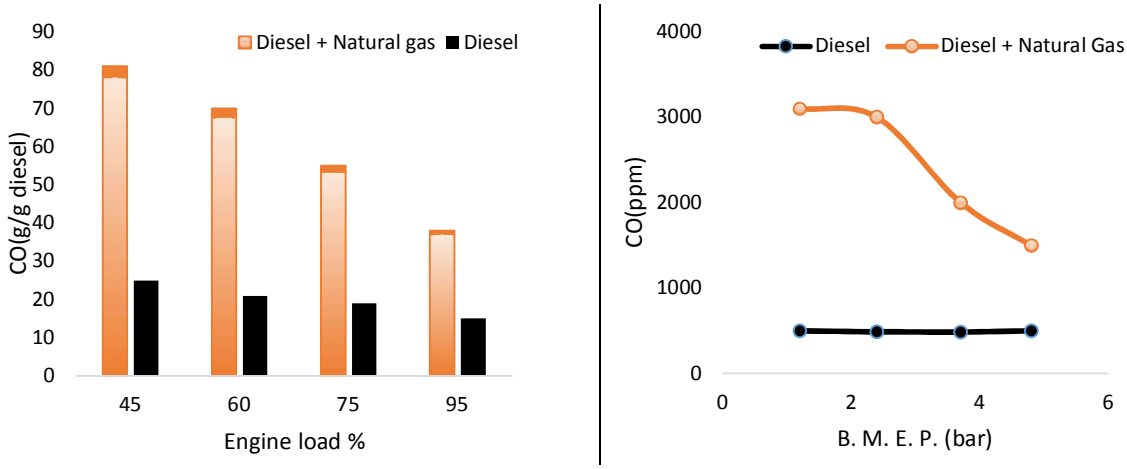
شکل ۱۲ میزان انتشار CO را برای برای گازطبیعی نشان می‌دهد. پاپاگیانیکس و همکاران، (۲۰۰٤)، در یک دور موتور ثابت میزان انتشار CO در بارگذاری های مختلف مورد بررسی قرار دادند [21] و همچنین عبدالله و همکاران، (۲۰۱۲) در ادامه بررسی‌های خود در پژوهش ذکر شده در قسمت انتشار NO_X، میزان انتشار CO را نیز بررسی کردند.[4] تعداد مشاهدات این دو گروه از پژوهشگران میزان انتشار نسبت به دیزل تک افزایش داشته است. طبق گزارش‌های صورت گرفته توسط وی و گنگ، (۲۰۱۵) میزان انتشار CO در همه‌ی موارد مورد بررسی افزایش داشته است که می توان دلایل زیر را برای توجیح این امر ذکر کرد:[20]

مخلوط هوا و گاز طبیعی در بین شکاف‌ها گیر می کند و مدت زمان طولانی در سیلندر باقی می ماند. این ترکیب آزاد می شود اما به دلیل پایین بودن دمای سیلندر حین انبساط نمی تواند اکسید شود. با افزایش میزان گاز طبیعی این مقدار افزایش می یابد. بنابراین انتشار CO با افزایش نسبت توده گاز طبیعی به میزان قابل توجهی افزایش می یابد.

پس از احتراق گازهای داغ با محیط سرد اختلاط می کند و درنتیجه این سبب افزایش تشکیل CO می‌شود.

مخلوط گاز طبیعی در محفظه احتراق توسط پاشش دیزل در محفظه احتراق توسط دیزل مشتعل و گسترش می یابد. در برخی مناطق ترکیب بسیار کم است و درنتیجه از انتشار شعله کاسته می شود. در نتیجه دمای این مناطق ماهش می یابد و فرآیند اکسیداسیون CO متوقف می شود. در نتیجه میزان CO افزایش می‌یابد.

رقابت بین واکنشهای اکسیداسیون HC و CO ممکن است منجر به انتشار زیاد CO شود زیرا سرعت اکسیداسیون HC بسیار سریعتر از CO است.



شکل ۱۲ – میزان انتشار CO برای حالت دوگانه سوزگاز طبیعی[4,21].

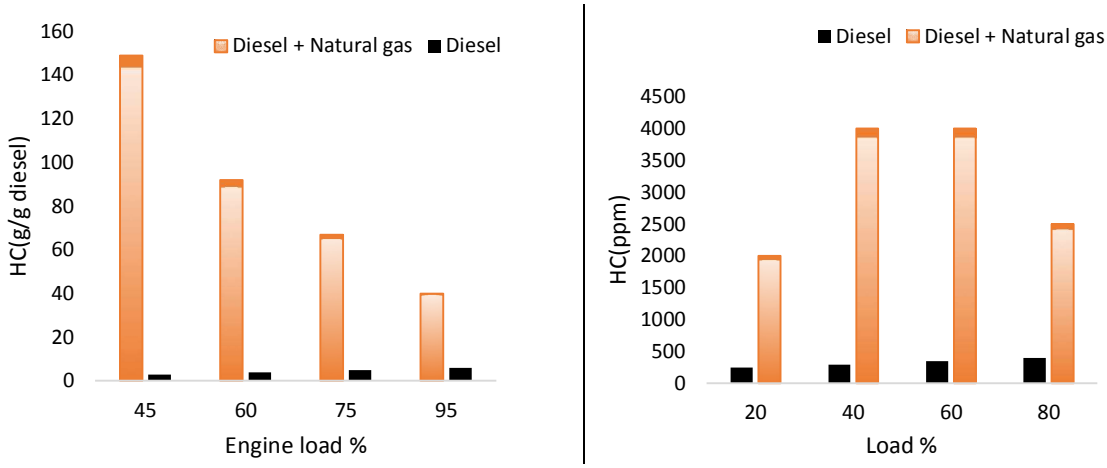
میزان انتشار HC

شکل ۱۳ میزان انتشار HC را برای برای گازطبیعی نشان می‌دهد. در ادامه بررسی های عبدالله و همکاران، (۲۰۱۲) [4]و لونیسی و همکاران، (۲۰۱۲) هر دو گروه از پژوهشگران میزان انتشار HC در حالت دوگانه‌سوز افزایشی گزارش کردند[19]. طبق بررسی های صورت گرفته توسط وی و گنگ، (۲۰۱۵) مشخص شده است که میزان HC در همه‌ی حالت دوگانه سوز افزایش داشته است. در برخی موارد این افزایش ۱۰۰ برابر بیشتر بوده است و همچنین یک رابطه مستقیم بین میزان HC و NO_X وجود داشته است. با افزایش میزان بارگذاری، افزایش میزان پاشش دیزل، تنظیم مناسب زمان پاشش میزان HC کاهش می یابد. این افزایش به دلایل زیر است:[20]

به دلیل همپوشانی باز و بسته شدن دریچه‌ها مقداری از ترکیب اکسیژن و گاز طبیعی از سوپاپ دود خارج می شود. که منجر افزایش HC می‌شود.

مشابه مکانیسم تشکیل انتشار CO ، به دام افتادن در شکاف ها و خاموش شدن شعله باعث می شود که سوخت نسوز در قسمت دوم فرآیند احتراق مشتعل شود و در نتیجه باعث افزایش انتشار HC شود.

در شرایط کم باری، میزان مخلوط گاز طبیعی و اکسیژن کم است، دمای محفظه احتراق پایین است در نتیجه احتراق به سختی صورت می گیرد و میزان انتشار HC افزایش می یابد.

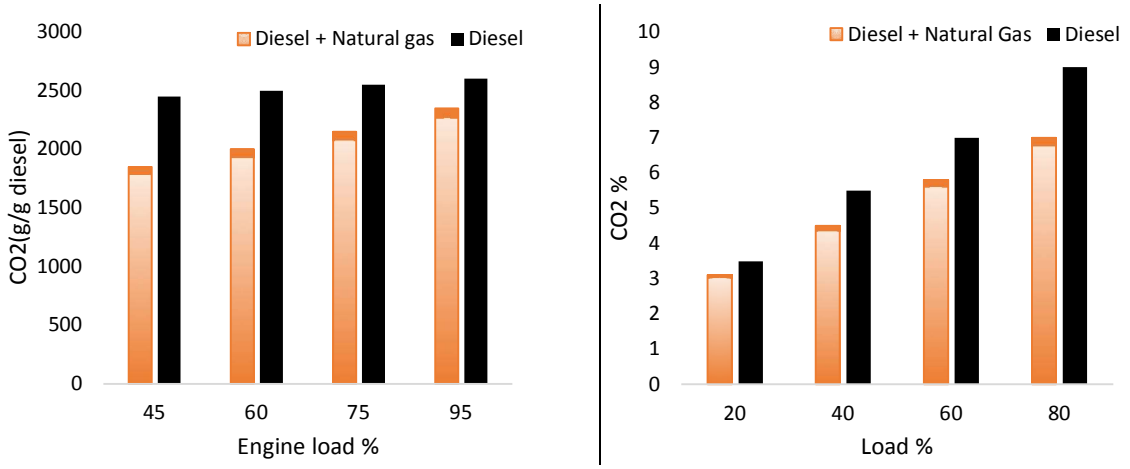


شکل ۱۳ – میزان انتشار HC برای حالت دوگانه سوزگاز طبیعی[4,19].

میزان انتشار CO_2

شکل ١٤ یزان انتشار CO_2 را گاز طبیعی نشان می دهد.در ادامه بررسی های عبدالله و همکاران، (۲۰۱۲) [4]و لونیسی و همکاران، (۲۰۱۲) [19]هر دو گروه از پژوهشگران میزان انتشار CO_2 در حالت دوگانه‌سوز افزایشی گزارش کردند. طبق بررسی های صورت گرفته توسط وی و گنگ، (۲۰۱۵) دی اکسید کربن محصولی از سوخت کامل هیدروکربن است.[20] سوخت هیدروکربن ابتدا طی فرآیند احتراق به CO اکسید می شود. و سپس اگر دمای درون سیلندر به اندازه کافی بالا و با حضور اکسیژن باشد ، CO اکسید می شود و به طور متوالی CO_2 تشکیل می شود. بنابراین ، تشکیل CO_2 به شدت به دمای درون سیلندر و غلظت اکسیژن بستگی دارد. طبق بررسی های صورت گرفته میزان CO2 در همه‌ی موارد کاهش داشته است دلایل آن به شرح زیر است:

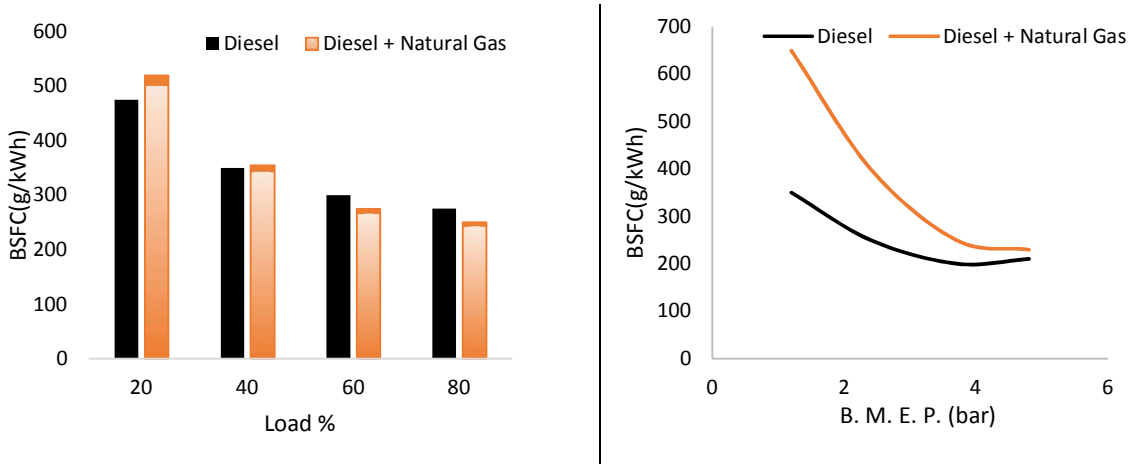
گاز طبیعی عمدتا از متان تشکیل شده است. گاز طبیعی پتانسیل کمتری برای تولید CO_2 از دیزل دارد.



شکل ١٤ – میزان انتشار CO_2 برای حالت دوگانه سوزگاز طبیعی[4,19].

مصرف سوخت ویژه ترمز(BSFC)

شکل ١٥، BSFC را برای گازطبیعی نشان می دهد. در ادامه نتایج پاپاگیانیکس و همکاران، (۲۰۰٤) و لونیسی و همکاران، (۲۰۱۲) نتایجی پیرامون BSFC نیز منتشر کردند. طبق بررسی این دو گروه از پژوهشگران با افزایش میزان بارگذاری بالاتر می‌رود و بهره‌وری سوخت گاز افزایش پیدا می کند و مخلوط غنی تر از گاز داریم در نتیجه میزان BSFC کاهش پیدا می کند[19,21].



شکل ۱۵ – میزان BSFC برای حالت دوگانه سوز گازطبیعی [19,21].

نتیجه‌گیری

نتایج کلی استفاده از هرنوع گاز به صورت جداگانه در جدول ۱ آمده است.

- **اگرچه در بیشتر منابع گزارش‌های مثبتی برای استفاده از هیدروژن بیان شده اما جنبه‌های منفی استفاده از هیدروژن قابل چشم پوشی نیست. برای فشرده سازی هیدروژن ما به فشار ۲۰۰ اتمسفر و دمای اتمسفر نیاز داریم اما این مقدار انرژی معادل ۵٪ بنزین تولید می کند[22].**
- **ارزش حرارتی پایین هیدروژن، توان تولیدی موتور را کاهش می دهد. اشتعال پذیری بالای سوخت هیدروژن باعث ایجاد فشار و درجه حرارت بالا حین احتراق می شود، که در نتیجه اکسیدهای نیتروژن افزایش می یابد.افزایش فشار سبب افزایش توان خروجی موتور نیز می شود. اما افزایش نرخ هیدروژن مقدار UHC به صروت ناچیز افزایش می یابد. مشکلات ایمنی همواره برای هیدروژن وجود داشته است. به دلیل فشار بالا احتراق به سرعت اتفاق می افتد و این سبب سر و صدا اضافی و لرزش می شود[23].**
- **از دیگر موارد می توان به عدم دسترسی به هیدروژن در جو اشاره کرد. تامین هیدروژن از منابع مختلفی امکان پذیر است، که مستلزم صرف هزینه‌ی زیادی است[24]. هیدروژن می تواند از طریق سوخت های فسیلی مانند گاز طبیعی ، ذغال سنگ و روغن با فرآوری بخار یا از طریق اکسیداسیون جزئی تولید شود.**
- **با توجه به مشکلات روز افزون زیست محیطی و استانداردهای یورو استفاده از بیوگاز می تواند گزینه مناسبی برای کاهش آلایندگی باشد. از دلایل عمده توجه به بیوگاز می توان به تامین از منابع انرژی تجدیدپزیر بودن، ارزان بودن و به شمار آمدن در دسته‌ی سوخت های پاک توجه کرد. پالی روشا و همکاران**
- **استفاده از گازطبیعی نیز توانایی کاهش آلایندگی و بهبود جزعی عملکرد همانند بیوگاز را دارد. امروزه باتوجه به دسترسی تمامی کشورها به گاز طبیعی، زیرساخت های مناسب توزیع و هزینه پایین تولید، استفاده از گاز طبیعی می تواند گزینه مناسبی جهت کاهش آلایندگی و بهبود عملکرد باشد.**

جدول ۱ – نتایج کلی استفاده از گازهای مختلف در موتورهای دیزلی

نوع سوخت مکمل	میزان انتشار NOx	میزان انتشارTHC	میزان انتشار CO	BSFC
گاز طبیعی	کاهش	بسیار افزایش	بسیار افزایش	متغییر
بیوگاز	بسیار کاهش	بسیار افزایش	بسیار افزایش	افزایش
هیدروژن	افزایش	افزایش	بسیار کاهش	بسیار افزایش

منابع

۱. **م. ابراهیمی‌نیک، ر. زینلی (۱۳۹۸). راهنمای بیوگاز، دانشگاه فردوسی مشهد.**

2. Heywood, J.B., *Combustion engine fundamentals. 1ª Edição.* Estados Unidos, 1988. **2021**
3. Wang, S., X. Huang, and S. Jiang, *The experimental study on diesel-LNG dual fuel marine diesel engine.* Ship Sci. Technol, 2011. **33**: p. 79-81.
4. Abdelaal, M. and A. Hegab, *Combustion and emission characteristics of a natural gas-fueled diesel engine with EGR.* Energy conversion and management, 2012. **64**: p. 301-312.
5. Liu, J., et al., *Effects of pilot fuel quantity on the emissions characteristics of a CNG/diesel dual fuel engine with optimized pilot injection timing.* Applied Energy, 2013. **110**: p. 201-206.
6. Karagöz, Y., et al., *Effect of hydrogen–diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines.* Advances in Mechanical Engineering, 2016. **8**(8): p. 1687814016664458.
7. Dimitriou, P., et al., *Combustion and emission characteristics of a hydrogen-diesel dual-fuel engine.* International journal of hydrogen energy, 2018. **43**(29): p. 13605-13617.
8. Talibi, M., et al., *Hydrogen-diesel fuel co-combustion strategies in light duty and heavy duty CI engines.* international journal of hydrogen energy, 2018. **43**(18): p. 9046-9058.
9. Jagadish, C. and V. Gumtapure, *Experimental studies on cyclic variations in a single cylinder diesel engine fuelled with raw biogas by dual mode of operation.* Fuel, 2020. **266**: p. 117062
10. Ambarita, H., *Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel (diesel-biogas) mode.* Case studies in thermal engineering, 2017. **10**: p. 179-191.
11. Rosha, P., A. Dhir, and S.K. Mohapatra, *Influence of gaseous fuel induction on the various engine characteristics of a dual fuel compression ignition engine: a review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **82**: p. 3333-3349.
12. Bora, B.J. and U.K. Saha. *On the attainment of optimum injection timing of pilot fuel in a dual fuel diesel engine run on biogas*. in *Engineering Systems Design and Analysis*. 2014. American Society of Mechanical Engineers
13. Karagöz, Y., et al., *Engine performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads.* International Journal of Hydrogen Energy, 2015. **40**(20): p. 6702-6713.
14. Sandalcı, T. and Y. Karagöz, *Experimental investigation of the combustion characteristics, emissions and performance of hydrogen port fuel injection in a diesel engine.* International journal of hydrogen energy, 2014. **39**(32): p. 18480-18489.
15. Karagöz, Y., et al., *Engine performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads.* International Journal of Hydrogen Energy, 2015. **40**(20): p. 6702-6713.
16. Nayak, C. and B.B. Sahoo, *Comparative assessment of biogas and producer gas with diesel in a twin cylinder dual-fuel diesel engine.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020. **42**(10): p. 1-11
17. Barik, D. and S. Murugan, *Investigation on combustion performance and emission characteristics of a DI (direct injection) diesel engine fueled with biogas–diesel in dual fuel mode.* Energy, 2014. **72**: p. 760-771.
18. Lounici, M.S., et al., *Experimental investigation on the performance and exhaust emission of biogas-diesel dual-fuel combustion in a CI engine*. 2014, SAE Technical Paper.
19. Lounici, M.S., et al., *Towards improvement of natural gas-diesel dual fuel mode: An experimental investigation*

on performance and exhaust emissions. Energy, 2014. **64**: p. 200-211.
20. Wei, L. and P. Geng, *A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance.* Fuel Processing Technology, 2016. **142**: p. 264-278.
21. Papagiannakis, R. and D. Hountalas, *Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas.* Energy conversion and management, 2004. **45**(18-19): p. 2971-2987.
22. Kalkan, N., K. Luo, and E. Guk, *An Overview of Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engines.* IJASR International Journal of Academic and Scientific Research, 2014. **2**(4): p. 58-70.
23. Dimitriou, P. and T. Tsujimura, *A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel.* International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(38): p. 24470-24486.
24. Karim, G.A., *Hydrogen as a spark ignition engine fuel.* International Journal of Hydrogen Energy, 2003. **28**(5): p. 569-577.

Study of the utilization of gaseous fuels (natural gas, hydrogen, biogas) on the performance and emissions of diesel engines.

Seyed Sajjad Jafari movahhed[1*], Abbas Rohani[2], Mohammad Ali Ebrahimi-nik[3] and Javad Zareei[4]

1. Biosystems Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2. Biosystems Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3. Biosystems Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
4. Biosystems Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

The design and evaluation of the performance parameters and emissions of internal combustion engines as propellants and actuators of mechanical systems is especially important. Similar to any industrial appliance, special rules and standards are in place for the operation and marketing of internal combustion engines. The Euro series of standards is one of the standards discussed by national manufacturers of combustion engines in most developed and developing countries. Intra-city transport systems, as a primary source of emissions, are the primary objective of structural engine modification to reduce fuel consumption to reduce emissions. Three hydrogen, natural gas and biogas gases can be used to reduce pollution in diesel engines.

Key words: Emission, Dual fuel, Diesel engine, performance, hydrogen, natural gas, biogas

* Seyed Sajjad Jafari movahhed
E-mail: seyedsajjad.jafarimovahed@mail.um.ac.ir