

## بررسی تجربی تأثیر استفاده از بیودیزل و بیوگاز به جای گازوئیل و گاز طبیعی در موتور دیزل دوگانه‌سوز

بهمن نجفی\*

دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی  
(دریافت: ۱۳۸۹/۴/۲۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۰/۱/۱۸، پذیرش: ۹۰/۲/۳)

در این تحقیق، با انجام یک سری تغییرات اساسی در سیستم سوخت‌رسانی موتور دیزل، استفاده از دو سوخت جایگزین بیودیزل و بیوگاز در موتور دیزل دوگانه‌سوز (موتور دیزل دوگانه‌سوز بیولوژیک) بررسی شد. سوخت بیودیزل مورد استفاده از روغن پسماند رستوران به روش ترنس‌استریفیکاسیون تولید و سوخت بیوگاز نیز از طریق تخمیر بی‌هوازی فضولات دامی تهیه شد. سوخت بیوگاز شامل ۷۰ درصد گاز متان و ۳۰ درصد دی‌اکسیدکربن بود و از نظر تولید انرژی تا ۹۰ درصد جایگزین سوخت گاز طبیعی شد. مابقی ۱۰ درصد انرژی نیز توسط سوخت بیودیزل به‌عنوان سوخت آتشنا تامین شد که جایگزین سوخت گازوئیل شده بود. به منظور مقایسه تأثیر جایگزینی سوخت بیودیزل و بیوگاز به جای گازوئیل و گاز طبیعی، ابتدا موتور دیزل پایه (لیستر M8/1) با استفاده از تجهیزاتی مانند میکسر، ریگلاتور، فیلتر، شیر قطع‌کن سریع و فلومتر به دوگانه‌سوز تبدیل شد و سپس آزمون‌های عملکرد و آلندگی، در بار کامل و در دور ثابت ۷۵۰ rpm برای هر یک از سوخت‌های فسیلی (گازوئیل و گاز طبیعی) و بیولوژیک (بیودیزل و بیوگاز) انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که استفاده هم‌زمان از سوخت‌های بیولوژیک بیودیزل و بیوگاز در موتور دوگانه‌سوز امکان‌پذیر است، ولی موجب افت توان موتور می‌شود. در این حالت، انتشار آلندنده NOx برخلاف CO<sub>2</sub> و UHC کاهش می‌یابد.

**کلیدواژه:** بیودیزل، بیوگاز، گازوئیل، گاز طبیعی، موتور دیزل دوگانه‌سوز

### مقدمه

اهمیت انرژی و نقش آن در اقتصاد و سیاست در دنیای امروزی بر کسی پوشیده نیست. این موضوع نه تنها برای کشورهای پیشرفته صنعتی که مصرف‌کنندگان اصلی منابع انرژی جهان هستند، بلکه برای کشورهای نفت خیز نیز بسیار حائز اهمیت است. چرا که این کشورها هم ناگزیر به درک این واقعیت‌اند که منابع نفتی منابعی محدود و پایان‌پذیرند. عدم درک این واقعیت در کشورهایی چون ایران که کشوری در حال توسعه است می‌تواند علاوه بر خساراتی که هم‌اکنون بر اقتصاد کشور وارد می‌کند زندگی و اقتصاد نسل‌های آینده را به طور جدی به مخاطره افکند. لذا تولید سوخت‌هایی با منشأ طبیعی (منشأ گیاهی) و با خاصیت تجدیدپذیری نه تنها یک انتخاب بلکه یک اجبار است. در این میان، موتورهای دیزل به‌عنوان بخشی اساسی در تامین نیروی محرکه صنعت و کشاورزی به حساب می‌آیند. خصوصیات نظیر سادگی سیستم، جنبه‌های مثبت اقتصادی، قابلیت اطمینان بالا، طول عمر قابل توجه و رانش‌پذیری مطلوب از جمله مزایای متعدد این موتورها به حساب می‌آیند. این موتورها یکی از مهم‌ترین مصرف‌کنندگان سوخت و یکی از عوامل ایجادکننده آلودگی نیز هستند. جستجو برای یافتن و استفاده از سوخت‌های جایگزین، به خاطر دو عامل محدودیت منابع فسیلی و نیز مشکلات جدی آلودگی محیط زیست، به شدت دنبال می‌شود. در یک دیدگاه ایدئال، سوخت جایگزین مناسب برای موتورهای دیزل باید حفظ مزایای این موتورها را تضمین کند [۱].

\* استادیار (ایمیل: Bahman\_Najafi@yahoo.com)

بیودیزل (سوخت مایع) یکی از سوخت‌های جایگزین زیستی است که تجدیدپذیر است و محیط زیست را تخریب نمی‌کند و به‌عنوان مهم‌ترین سوخت جایگزین موتورهای دیزل مطرح است. تولید سوخت بیودیزل از منابع آلی مانند روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی و یا روغن پسماند رستوران‌ها مزیت اصلی بیودیزل است. علاوه بر آن، بیودیزل سوخت بدون گوگرد است و انتشار دی‌اکسید گوگرد در آن حدود صفر است. همچنین، وجود اکسیژن در ترکیب سوخت بیودیزل موجب کاهش انتشار هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود. عددستان سوخت بیودیزل نسبت به گازوییل بالاست و در نتیجه توانایی احتراق خوبی دارد [۲-۳].

بیوگاز (سوخت گازی) نیز به‌عنوان سوخت جایگزین موتورهای دیزل نویدبخش است، زیرا از منابع آلی در دسترس تولید می‌شود و انرژی پاک و، از نظر زیست محیطی، دوست‌دار طبیعت است. بیوگاز از تخمیر بی‌هوازی زباله‌های آلی، لجن، ضایعات محصولات کشاورزی و ضایعات محصولات حیوانی قابل تولید است [۴]. گاز متان قسمت اصلی آن است و در حدود ۶۵ درصد آن را تشکیل می‌دهد. عدد اکتان بالایی دارد و برای موتورهای با نسبت تراکم بالا (مانند موتور دیزل) مناسب است. به‌علاوه، محتوای کربن آن نیز پایین است و در مقایسه با سوخت‌های فسیلی متداول موجب کاهش قابل ملاحظه‌ای در انتشار گازهای آلاینده می‌شود [۵-۶].

استفاده از هر دو نوع سوخت جایگزین بیودیزل و بیوگاز در موتور دیزل می‌تواند به روش دوگانه‌سوز (Dual Fuel) انجام شود. در این روش، سوخت بیوگاز که دارای دمای خوداشتعالی پایینی است، به همراه هوا در مرحله مکش، وارد محفظه احتراق می‌شود. سپس، در انتهای مرحله تراکم سوخت بیودیزل به‌عنوان سوخت آتشزا از طریق افشانه (Injector) تزریق شده و موجب احتراق سوخت بیوگاز می‌شود [۷].

تحقیقات انجام‌شده بر روی موتورهای دوگانه‌سوز متداول (سوخت گاز طبیعی و گازوییل)، از زمان ابداع تا کنون، حاکی از این واقعیت است که قدرت ترمزی و گشتاور ترمزی موتور دیزل به طور عمومی بالاتر از موتور دوگانه‌سوز است، زیرا ارزش گرمایی سوخت گازوییل و گاز طبیعی متفاوت بوده و نسبت استوکیومتری در حالت دوگانه‌سوز در تمام سرعت‌های موتور کمتر از دیزل خالص است. حداکثر فشار با افزایش سوخت گازی افزایش می‌یابد. نمودارهای فشار و دمای محفظه احتراق در موتور دوگانه‌سوز دارای دو نقطه بیشینه است که اولی به علت تاخیر در اشتعال سوخت مایع آتشزا و دومی ناشی از آزادسازی انرژی به وسیله احتراق سوخت گازی است. داشتن دو نقطه بیشینه فشار از مشخصه‌های احتراق دوگانه است. آلاینده‌های NOx و CO در موتور دیزل همواره بالاتر از موتور دوگانه‌سوز است. افزایش دور موتور یا بار موتور باعث افزایش عملکرد گرمایی موتور دوگانه‌سوز می‌شود [۷]. افزایش مقدار سوخت آتشزا باعث افزایش گشتاور خروجی، عملکرد گرمایی و بیشینه فشار می‌شود، ولی موجب کاهش سروصدای احتراق می‌شود. بنابراین، سروصدای احتراق در موتورهای دوگانه‌سوز بیشتر از موتور دیزل خالص است [۸].

در تحقیقی، مصطفی و راین انتشار گازهای آلاینده خروجی از آگروز یک موتور دیزل دوگانه‌سوز را با استفاده از سوخت گاز طبیعی و بیوگاز مطالعه کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد، با استفاده از سوخت بیوگاز و بدون هیچ‌گونه تغییری در ساختار موتور، عملکرد موتور حفظ می‌شود، ولی آلاینده‌های PM و NOx در شرایط کاری یکسان (دور، بار و مقدار سوخت آتشزا) کاهش می‌یابد [۹]. ماجی و همکارانش نیز در تحقیقی سروصدا و مصرف سوخت ویژه موتور دیزل را با استفاده از سوخت گاز طبیعی فشرده بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که انتشار گاز UHC در حالت دوگانه‌سوز نسبت به حالت دیزل خالص کاهش می‌یابد [۱۰]. شن و همکارانش در تحقیقی تجربی نشان دادند که نسبت سوخت گاز طبیعی، مقدار سوخت آتشزا (گازوییل) و زمان تزریق بر حداکثر دمای محفظه احتراق و در نتیجه بر تشکیل و انتشار آلاینده‌ها و همچنین بر عملکرد موتور نقش مهمی دارند. در این تحقیق، سوخت بیودیزل و گازوییل، سوخت آتشزا بوده و از سوخت بیوگاز و گاز طبیعی به‌عنوان سوخت اصلی استفاده شد. جایگزینی سوخت بیودیزل و بیوگاز به جای گازوییل و گاز طبیعی شرایط جدیدی را بر موتور دیزل دوگانه‌سوز تحمیل می‌کند [۱۱].

## مواد و روش‌ها

### بیوگاز، سوخت جایگزین حالت گازی

بیوگاز به گازهایی اطلاق می‌شود که در اثر تخمیر مواد آلی به وسیله باکتری‌های بی‌هوازی تولید می‌شوند. گازهای تولیدشده بدون بو، تمیز، احتراق‌پذیر و سبک‌تر از هواست. بیوگاز از تخمیر مواد آلی (سلولزی) حیوانی یا گیاهی و در غیاب هوا به وسیله باکتری‌های متانولوزیک (Methanologonic) به وجود می‌آید. بیوگاز با اسامی دیگری مانند گاز مرداب و گاز باتلاق نیز شناخته می‌شود. از نظر شیمیایی، بخش قابل استفاده بیوگاز گاز متان است. بیوگاز با یک شعله آبی‌رنگ با دمای  $800^{\circ}\text{C}$  می‌سوزد. این گاز با نسبت ۱ به ۲۰ با هوا مخلوط شده و دارای سرعت اشتعال بالایی است و هر متر مکعب از آن دارای ارزش گرمایی ۵۶۵۰ Kcal است. فناوری تولید این نوع سوخت تخمیر بی‌هوازی مواد آلی است که در چهار مرحله، تحت تأثیر چهار گروه از باکتری‌های بی‌هوازی، انجام می‌گیرد:

- ۱- تجزیه کردن مولکول‌های سنگین مواد اولیه (سلولز، پروتئین، نشاسته، چربی) به یک ملکول کوچک‌تر (هیدروژن، دی‌اکسیدکربن، اسیدهای چربی و اسیدهای آمینه) به وسیله گروهی از باکتری‌ها به نام باکتری‌های آبی (Hydrolytic)
  - ۲- تبدیل محصول مرحله اول به نمک جوهر سرکه و هیدروژن به وسیله باکتری‌های استات‌زا
  - ۳- تبدیل هر چه بیشتر هیدروژن، کربن و سایر ترکیبات به دست‌آمده در مرحله اول و دوم به نمک جوهر سرکه به کمک ساختاری به نام اسیدزا (Homoacetogens)
  - ۴- تبدیل نمک جوهر سرکه و تعدادی از ترکیبات دیگر نظیر دی‌اکسیدکربن و هیدروژن به متان به کمک باکتری‌های متان‌زا (Methanologonic)
- به طور کلی، تولید بیوگاز یک فرایند پیچیده است، ولی تمام این مراحل را می‌توان به صورت ساده زیر بیان کرد:



شکل ۱- فرایند تشکیل بیوگاز

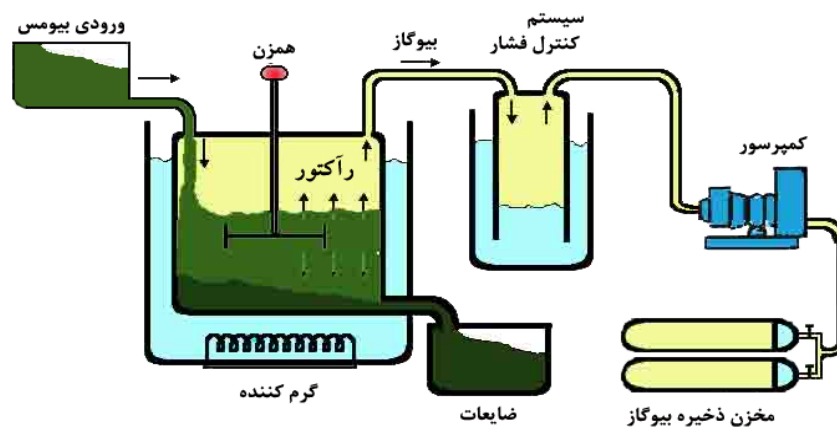
### طراحی و ساخت دستگاه تولید بیوگاز

در این تحقیق، برای تولید سوخت بیوگاز مورد نیاز، ابتدا یک واحد آزمایشگاهی در دانشگاه محقق اردبیلی طراحی و ساخته شد. دستگاه تولید بیوگاز شامل راکتور اصلی، سیستم گرم‌کننده، سیستم همزن، سیستم جمع‌آوری بیوگاز و کنترل فشار است. واکنش‌های غیرهوازی در دستگاه بیوگاز در دمای معادل  $37^{\circ}\text{C}$  در محدوده فعالیت باکتری‌های مزوفیلیک (Mesophilic) صورت می‌گیرد. لذا برای نگهداری راکتور در دمای مذکور یک سیستم گرم‌کننده الکتریکی طراحی و ساخته شد که به طور غیرمستقیم محتویات راکتور را گرم می‌کند، البته در طرح تکمیلی برای کاهش هزینه تولید بیوگاز می‌توان از انرژی خورشیدی استفاده کرد. میزان تولید بیوگاز در دماهای بالاتر از  $37^{\circ}\text{C}$  بیشتر است، ولی نگهداری سیستم در گرمای بالا موجب هزینه زیاد می‌شود. مواد خام مورد مصرف دستگاه بیوگاز فضولات گاو است. پهن گاو شامل ترکیبات آمونیاکی است در صورتی که باکتری‌های غیرهوازی برای انجام فعالیت‌های خود نیاز به کربن هم دارند؛ بنابراین مواد خام گیاهی مانند بقایای کاه و کلش به آن افزوده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که بهترین نسبت کربن به نیتروژن (C/N) در حدود ۳۰ است. در صورتی که این نسبت بیشتر شود، مقدار نیتروژن تمام می‌شود و در نتیجه کربن بیشتری در محیط باقی می‌ماند. در این حالت بسیاری از باکتری‌ها تلف شده و ازت ذخیره شده در سلول آزاد می‌شود. این عمل موجب می‌شود تا برقراری تعادل در محیط تخمیری

مجدداً با صرف زمان بیشتری برقرار شود. در حالت دیگر، اگر مقدار ازت در محیط تخمیر زیاد باشد (نسبت C/N کمتر از ۳۰)، واکنش‌های تخمیری به علت نبود کربن کافی متوقف شده و ازت موجود در محیط به صورت گاز آمونیاک متصاعد می‌شود. بدین ترتیب، با از دست دادن ازت تولید بیوگاز متوقف می‌شود. بدیهی است که مقدار کربن و ازت بستگی به نوع فضولات دامی و گیاهی دارد. آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که نسبت کربن به ازت در پهن گاو تقریباً برابر ۱۸ بوده و در گاو گندم برابر ۱۵۰ است. در این تحقیق، برای برقراری نسبت C/N در محدوده ۳۰، از مخلوط ۹۰ درصد وزنی گاو گندم و ۱۰ درصد پهن گاو به‌عنوان ماده اولیه خام استفاده شد ( $30 = 10 \times 150 + 90 \times 18$ ). استفاده خالص از این مواد خام جامد در دستگاه بیوگاز، به دلیل داشتن غلظت زیاد، مانع از رشد باکتری‌ها می‌شود؛ بنابراین ضروری است این مواد با آب رقیق شود. البته غلظت کم نیز موجب لایه‌لایه شدن محلول موجود در رآکتور می‌شود که مستلزم به هم زدن مداوم است. تحقیقات نشان می‌دهد که بهترین غلظت برای تخمیر بی‌هوازی در دستگاه بیوگاز حدود ۷ تا ۹ درصد مواد جامد است. به دلیل اینکه مواد اولیه استفاده شده در این تحقیق پهن گاو و گاو گندم تازه است و این مواد حاوی مقداری آب در بافت خود هستند، از ۵۰ درصد آب، ۴۵ درصد گاو گندم و ۵ درصد پهن تازه گاو در داخل رآکتور استفاده شد.

رآکتور ساخته شده در این تحقیق از نوع پیوسته است و می‌بایست هر روز مخلوط فضولات گاوی و گاو گندم به همراه آب وارد آن شود. مزیت اصلی این نوع رآکتور تولید پیوسته بیوگاز است. مقدار بیوگاز تولید شده بستگی به زمان ماند و دمای رآکتور و نوع مواد اولیه دارد؛ لذا حجم رآکتور نیز با توجه به آن محاسبه می‌شود. در این تحقیق، رآکتور تولید بیوگاز برای استفاده از مخلوط فضولات گاوی و گاو گندم، با توجه به زمان ماند ۳۰ روز و دمای رآکتور  $37^{\circ}\text{C}$ ، طراحی و ساخته شد. آزمایش‌های اولیه نشان داد که برای یک ساعت کار موتور تک‌سیلندر دیزل لیستر M8/1 در بار کامل و در حالت دوگانه‌سوز (۹۰ درصد انرژی از سوخت گاز طبیعی و مابقی از گازوییل) ۴۲۵ لیتر سوخت گاز طبیعی مصرف می‌شود. با توجه به اینکه ارزش گرمایی بیوگاز، به دلیل وجود دی‌اکسید کربن در ترکیب آن، تقریباً ۸۰ درصد گاز طبیعی است، رآکتور بیوگاز باید توانایی تولید ۵۳۲ لیتر بیوگاز را برای یک ساعت کار موتور فراهم آورد ( $532 \approx 425 \div 0.8$ ). تحقیقات نشان می‌دهد که میزان گاز تولید شده در دمای  $37^{\circ}\text{C}$  و زمان ماند ۳۰ روز، برای مخلوط فضولات گاوی و گاو گندم، برابر ۴۵ لیتر در کیلوگرم در روز است. در نتیجه، برای تولید ۵۳۲ لیتر بیوگاز لازم است تا روزانه ۱۲ لیتر مخلوط فضولات گاوی و گاو گندم به رآکتور وارد شود ( $12 \approx 45 \div 532$ ). این مخلوط باید به همراه ۱۲ لیتر آب در داخل رآکتور تخلیه شود. لذا رآکتور باید به طور روزانه ۲۴ لیتر تغذیه شود که ۱۲ لیتر آب (۵۰ درصد)، ۱۰/۸ لیتر گاو گندم (۴۵ درصد) و ۱/۲ لیتر پهن تازه گاو (۵ درصد) است. با احتساب ۳۰ روز زمان ماند، حجم رآکتور برابر ۷۲۰ لیتر محاسبه می‌شود ( $720 = 30 \div 24$ ). بنابراین، دستگاه رآکتور بیوگاز به شکل استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ cm و ارتفاع ۱۰۰ cm از جنس ورق گالوانیزه ساخته شد. برای گرم کردن یکنواخت رآکتور، یک استوانه دیگر به قطر ۱۲۰ cm و ارتفاع ۱۵۰ cm ساخته شد که رآکتور در داخل آن قرار گرفت. بین دو استوانه با آب پر شد که از قسمت پایین توسط المنت گرمایی گرم می‌شد. حجم استوانه بیرونی برابر ۱/۳ متر مکعب است و با فرض اینکه کل محفظه استوانه بیرونی را آب تشکیل می‌دهد، توان المنت گرمایی برابر ۲۰۰۰ kW به دست می‌آید.

حجم مخزن ورودی و خروجی از رآکتور، معادل با تغذیه روزانه مخلوط فضولات گاوی، گاو گندم و آب، برابر ۲۴ لیتر است. برای به هم زدن رآکتور یک از همزن دستی استفاده شد. برای جمع‌آوری بیوگاز تولید شده و کنترل فشار آن، از یک سیستم کنترل فشار مطابق با شکل (۲) استفاده شد. حجم سیستم کنترل فشار متناسب با بیوگاز تولید شده روزانه و با فرض ضریب مخزن ۰/۶ برابر ۳۲۰ لیتر محاسبه شد ( $320 = 0.6 \div 532$ ). در نتیجه، از یک استوانه به قطر ۶۵ cm و ارتفاع ۱۰۰ cm استفاده شد که این استوانه به صورت معکوس بر روی استوانه فلزی دیگری به قطر ۸۵ cm و ارتفاع ۱۲۰ cm قرار می‌گرفت. فاصله بین دو استوانه با آب پر می‌شد تا مانع از خروج بیوگاز شود. بدیهی است که در این حالت، با تولید شدن بیوگاز، آب داخل استوانه وسطی (معکوس) به طرف پایین حرکت کرده و به جای آن بیوگاز جانشین می‌شود. فشار بیوگاز، متناسب با اختلاف ارتفاع آب استوانه داخلی و خارجی، قابل کنترل و تنظیم است.



شکل ۲- طرحواره واحد آزمایشگاهی تولید بیوگاز

باکتری‌های متان‌زا نسبت به PH محیط بسیار حساس‌اند و تنها در محدوده ۶/۸ تا ۷/۲ فعالیت دارند. محیط اسیدی باعث توقف عمل تخمیر می‌شود و محیط بازی باعث کندی عمل تخمیر و تولید گاز دی‌اکسیدکربن می‌شود. باید یادآور شد که همراه بیوگاز گازهای  $CO_2$  و  $SH_2$  نیز تولید می‌شود که حتی ۳۰ تا ۴۰ درصد سوخت بیوگاز را تشکیل می‌دهند. برای جذب  $CO_2$  جریان بیوگاز از درون آب آهک عبور داده شد و گاز بدبوی  $SH_2$  نیز به وسیله براده‌های آهن جذب شد.

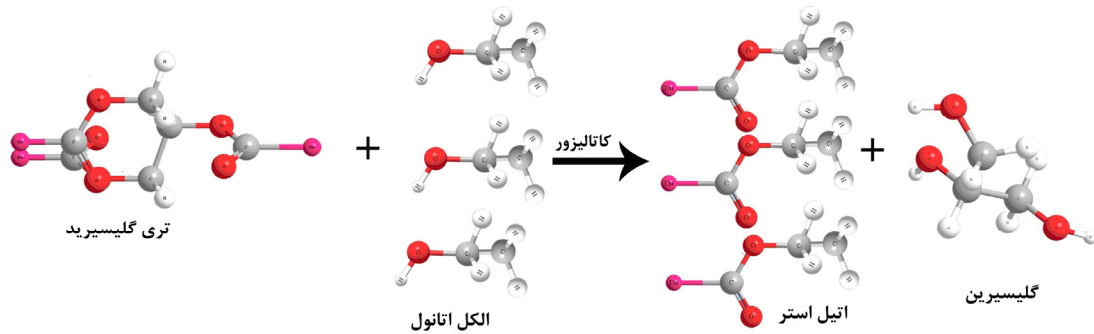
## بیودیزل، سوخت جایگزین مایع

بیودیزل عبارت است از استرهای منوآلیلی اسیدهای چرب با زنجیر طولی که از منابع طبیعی تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تهیه می‌شود و دارای فرمول شیمیایی  $3CH_3COOC_{19}H_{35}$  است. جهت استفاده از این بیودیزل در موتور دیزل به جای سوخت گازوییل، اصولاً هیچ تغییر اساسی در موتور لازم نیست. این سوخت، در مقایسه با گازوییل که جایگزینش می‌شود، سوختی پاک به حساب می‌آید. تفاوت اساسی بیودیزل و گازوییل در محتوای اکسیژن آن است. میزان اکسیژن موجود در گازوییل صفر است در حالی که بیودیزل حاوی ۱۰ تا ۱۲ درصد وزنی اکسیژن است که باعث کاهش دانسیته انرژی و انتشار ذرات معلق می‌شود. به علاوه، بیودیزل عاری از گوگرد است در حالی که در گازوییل گوگرد وجود دارد. همچنین، گازوییل دارای ۲۰ تا ۴۰ درصد حجمی آروماتیک است که باعث افزایش انتشار آلاینده‌هایی نظیر  $NO_x$  و ذرات معلق می‌شود، ولی بیودیزل اساساً عاری از آروماتیک است. در گازوییل هیچ پیوند دوگانه (الفینی) وجود ندارد در حالی که بیودیزل، به دلیل حضور قابل ملاحظه‌ای از محلول‌های غیر اشباع، پایداری در مقابل اکسیداسیون کمتری دارد.

## تولید سوخت بیودیزل

برای تهیه بیودیزل، از روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی استفاده می‌شود. به منظور به‌کارگیری مستقیم این ترکیبات به‌عنوان منبع انرژی در موتورهای احتراق داخلی و دارابودن شرایط احتراق مناسب، لازم است تا ساختار ملکولی این ترکیبات متعادل شود. بدین منظور، ملکول‌های ترکیبات روغن با الکی نظیر اتانول (یا متانول) در یک واکنش ترنس‌استریفیکاسیون (Transesterification) شرکت کرده و ترکیبات شیمیایی به نام استرهای اتیل اسید چرب را به‌وجود می‌آورند. این واکنش در حضور کاتالیزورهای اسیدی و بازی انجام می‌گیرد و الکل مورد استفاده جایگزین الکل اولیه می‌شود و استر جدیدی حاصل می‌شود که بیودیزل نام دارد. در این فرایند، گلیسریدهای موجود در روغن، با توجه به نوع و تعداد اسیدهای چرب موجود در ساختمان خود، با الکل موجود در واکنش شرکت کرده و استرهایی با ساختمان ملکولی جدید به‌وجود می‌آورند. در نتیجه ساختمان ترکیبات روغن خام به ترکیبات ساده‌تری شکسته می‌شود و به دنبال آن خواص ترموفیزیکی و احتراقی روغن بهبود

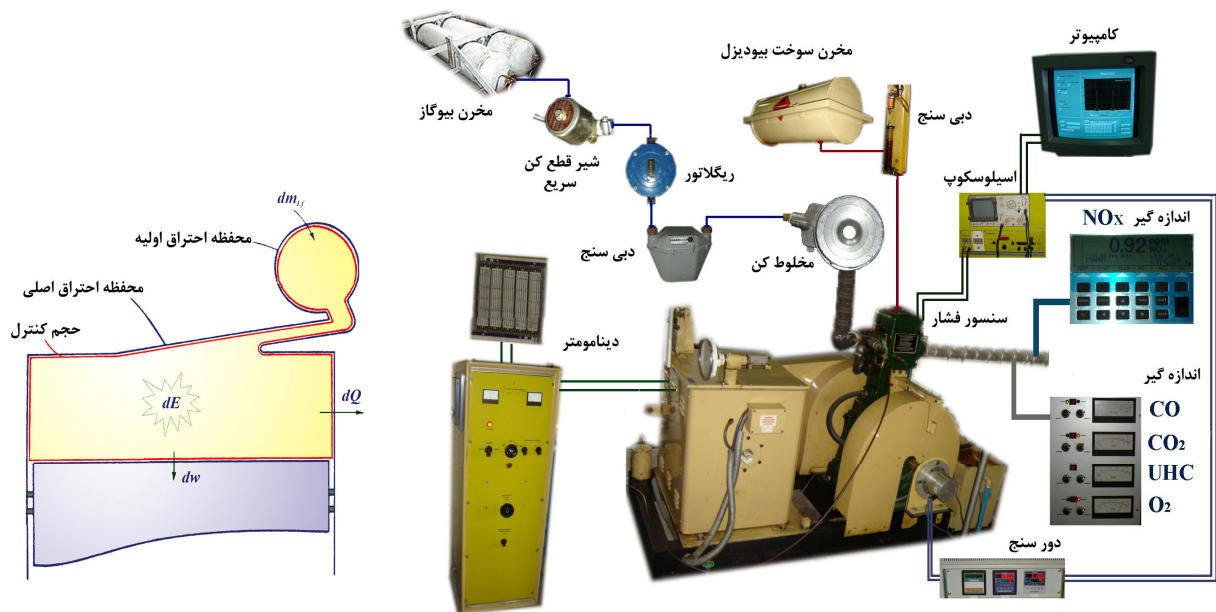
می‌باید تا به‌عنوان سوخت جایگزین گازوییل قابل استفاده شود. روغن‌های گیاهی شامل ترکیبات مختلفی از زنجیره‌های اسیدهای چرب‌اند. خصوصیات سوخت بیودیزل به طور قابل ملاحظه‌ای به زنجیره‌های اسیدهای چرب موجود در خوراک مورد استفاده بستگی دارد. در این تحقیق، بیودیزل مورد نیاز از روغن پسماند رستوران (با پایه روغن آفتاب‌گردان) به روش ترنس‌استریفیکاسیون تولید شد و از سوخت گازوییل متداول در ایران نیز به‌عنوان سوخت مرجع استفاده شد.



شکل ۳- فرایند تولید سوخت بیودیزل با استفاده از الکل اتانول

### موتور تحت آزمایش و تجهیزات اندازه‌گیری

موتور استفاده‌شده در این آزمایش از نوع موتور لیستر مدل M8/1 است که موتوری تک‌سیلندر، چهار زمانه با تنفس طبیعی و با محفظه احتراق آشفته، سیستم پاشش غیرمستقیم (IDI) با حداکثر توان ۸ اسب بخار در سرعت ۸۵۰ دور بر دقیقه، ساخت کارخانه لیستر انگلستان است. در این موتور، قطر پیستون ۱۱۴/۳ mm، کورس پیستون ۱۳۹/۷ mm، طول شاتون ۳۷۹/۴ mm، ظرفیت سیلندر ۱/۵۰۶۶ لیتر و مصرف ویژه در حداکثر توان ۲۲۷ gr/hp.hr است. موتور دیزل پایه، با اضافه کردن تجهیزاتی مانند ریگلاتور فشار گاز، فیلتر، شیر قطع‌کن سریع و یک مخلوط‌کن سوخت گازی و هوا در ورودی چندراهه (Manifold) هوا، توانایی استفاده از سوخت گازی را پیدا کرده و تبدیل به "موتور دیزل دوگانه‌سوز" شد.



شکل ۴- طرحواره تجهیزات استفاده‌شده در آزمون موتور و نمایی از محفظه احتراق اصلی، فرعی و سیستم پاشش سوخت

تجهیزاتی که برای اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات متغیرهای عملکردی و غلظت انتشار آلاینده‌ها در آزمون موتور دیزل خالص (با سوخت بیودیزل و گازوییل) و موتور دیزل دوگانه‌سوز (با سوخت‌های بیودیزل و بیوگاز و همچنین با سوخت‌های گازوییل و گاز طبیعی) مورد استفاده قرار گرفتند عبارت‌اند از:

- ۱- دینامومتر الکتریکی مدل TE-9 ساخت کارخانه Plint & Partners برای اندازه‌گیری قدرت خروجی ترمزی موتور
- ۲- زاویه‌سنج از نوع Gaebridge مدل 45HD و با قابلیت تشخیص نقطه مرگ بالا برای اندازه‌گیری زاویه میل‌لنگ
- ۳- مبدل فشار از نوع پیزوالکتریک با کریستال‌های کوارتز مدل Kistler-6123 برای اندازه‌گیری فشار داخل سیلندر
- ۴- تقویت‌کننده مدل Kistler-5041b برای تقویت سیگنال خروجی حسگر پیزوالکتریک
- ۵- اسیلوسکوپ برای تنظیم و نمایش داده‌های آنالوگ
- ۶- مبدل انتقال داده‌ها برای تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال
- ۷- سیستم جمع‌آوری اطلاعات به همراه یک رایانه PC برای نمایش و رکوردگیری داده‌ها
- ۸- ترموکوپل نوع J برای اندازه‌گیری دمای سوخت گازی و هوای چندراهه ورودی
- ۹- ترموکوپل نوع K برای اندازه‌گیری دمای خروجی اگزوز
- ۱۰- مخزن سوخت مایع و گازی
- ۱۱- دبی‌سنج سوخت مایع از نوع استوانه‌ای اندازه‌گیری برای اندازه‌گیری دبی سوخت مایع
- ۱۲- دبی‌سنج هوا از نوع تانک هوا با روزنه لبه‌تیز جهت اندازه‌گیری دبی هوای ورودی
- ۱۳- آلاینده‌سنج نوع کاسنز (Cussons) مدل P8333 برای اندازه‌گیری درصد حجمی گاز CO و CO<sub>2</sub>، غلظت UHC برحسب ppm و درصد حجمی گاز O<sub>2</sub>
- ۱۴- آلاینده‌سنج نوع سیگنال مدل VM 4000 برای اندازه‌گیری غلظت اکسیدهای ازت (NO<sub>2</sub>، NO)
- ۱۵- دبی‌سنج سوخت گازی از نوع فلومتر مدل G4 برای اندازه‌گیری دبی سوخت گازی
- ۱۶- فیلتر تصفیه گاز مدل 121GAZ برای تصفیه گاز ورودی
- ۱۷- شیر قطع‌کن سریع جریان گاز نوع SKH 56 برای قطع کردن جریان گاز در شرایط بحرانی
- ۱۸- ترکیب‌کننده سوخت و هوا برای اختلاط سوخت گازی و هوا

## شرایط و روش انجام آزمون موتور

در تمام آزمایش‌ها، از سوخت بیوگاز به‌عنوان سوخت اصلی استفاده شد. به نحوی که سوخت بیوگاز در حد ۹۰ درصد کل انرژی موتور را تشکیل داده و مابقی ۱۰ درصد انرژی موتور را نیز سوخت بیودیزل به‌عنوان سوخت آتش‌زا تامین می‌کرد. برای مقایسه، سوخت گاز طبیعی و گازوئیل نیز مطابق روش فوق مورد آزمون قرار گرفت. آزمون‌ها برای هر یک از موارد ۳ بار تکرار شد. در هر یک از آزمون‌ها، ابتدا موتور به صورت دیزل خالص و فقط با سوخت گازوییل (یا بیودیزل)، تحت بار ۸۲/۹ درصد بار نهایی دینامومتر (بار موتور قبل از رسیدن موتور به حد دود که با دینامومتر قابل تنظیم است) قرار گرفت. با معلوم بودن میزان بار دینامومتر و سرعت دورانی آن، توان تولیدشده موتور محاسبه شد و سپس آهنگ مصرف سوخت مایع به کمک شانه سوخت تا جایی کاهش پیدا کرد که توان ترمزی تولیدشده به ۱۰ درصد توان تولیدشده در حالت قبل رسید. باید یادآور شد که بار اعمال‌شده در تمامی حالت‌ها همواره ثابت بود، ولی با کاهش مقدار سوخت مصرفی دور موتور افت پیدا می‌کرد که این امر موجب افت توان می‌شد. در نهایت، برای جبران ۹۰ درصد افت توان از حالت دیزل خالص، سوخت گاز طبیعی (یا بیوگاز) وارد موتور می‌شد تا دوباره موتور با همان دور قبلی کار کند و در نتیجه همان توان موجود در حالت دیزل خالص حاصل می‌شد. بدیهی است که در این حالت ۹۰ درصد توان کل از طریق سوخت گازی و ۱۰ درصد آن از طریق سوخت آتش‌زا تامین می‌شد. در هر یک از مراحل آزمون، پس از تنظیم شانه سوخت‌رسانی، موتور به مدت ۵ دقیقه در حالت ثابت، با هر یک از مخلوط‌های

سوخت مایع آتش‌زا، کار می‌کند تا بار و دور موتور به حالت پایدار برسد. مرحله گرم کردن موتور نیز شامل ۱۵ دقیقه کارکردن موتور با هر یک از مخلوط سوخت‌های بیودیزل و گازوئیل در حالت دیزل خالص بود.

## بحث و نتایج

### مشخصات سوخت بیوگاز و بیودیزل تولیدشده

نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص سوخت بیوگاز و بیودیزل که براساس استاندارد ASTM انجام گرفت حاکی از این واقعیت است که:

- ترکیبات بیوگاز به‌شدت وابسته به نوع خوراک اولیه است و شامل ۵۰ تا ۷۰ درصد متان، ۳۰ تا ۴۰ درصد دی‌اکسیدکربن و ۱۰ تا ۱۰ درصد هیدروژن است.

- به دلیل وجود دی‌اکسیدکربن در سوخت بیوگاز، عموماً ارزش گرمایی آن نسبت به سوخت گاز طبیعی ۸۰ درصد کمتر است. از طرفی، ۸۰ تا ۹۵ درصد حجم کل گاز طبیعی را گاز متان تشکیل می‌دهد. علاوه بر متان، گاز طبیعی شامل اتان (۲ تا ۸ درصد)، پروپان (۱ تا ۲ درصد) و بوتان نیز است.

- به علاوه، سوخت بیودیزل دارای چگالی بیشتری نسبت به گازوئیل است که موجب پاشش نامطلوب سوخت می‌شود.  
- گرانشی سینماتیک بیودیزل نیز بیشتر از گازوئیل است و این عامل محدودکننده‌ای در کارکرد مناسب پمپ افشانه است و ممکن است در سیستم سوخت‌رسانی فشارهای بسیار زیادی را پدید آورد. تأثیر دیگر گرانشی زیاد بر کیفیت پودرشدن سوخت در هنگام پاشش افشانه است به طوری که افشانه‌ها دیگر قادر به عمل پودرکردن سوخت برای تبخیر و احتراق مناسب نخواهند بود.

- ارزش گرمایی سوخت بیودیزل کمتر از گازوئیل است؛ لذا جهت تولید توان یکسان در موتور نیاز به مصرف بالاتری دارد.  
- افزایش دمای شروع و انتهای تقطیر سوخت بیودیزل باعث افزایش شاخص ستان سوخت می‌شود. شاخص ستان بیودیزل بیشتر از سوخت گازوئیل است و می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت احتراق بیودیزل بهتر از گازوئیل است.  
- میزان کربن موجود در ساختار اتمی بیودیزل کمتر از گازوئیل است. در نتیجه مقدار خاکستر آن نیز کمتر است که باعث افزایش طول عمر سیستم احتراق می‌شود، زیرا مقدار زیاد خاکستر حاوی رسوبات معدنی و اکسیدهای فلزی حل‌شده در سوخت‌های مایع باعث فرسودگی قسمت‌های متحرک می‌شود.

جدول ۲- مشخصات سوخت بیودیزل و گازوئیل و بیوگاز و گاز طبیعی

بیوگاز	گاز طبیعی	بیودیزل	گازوئیل	خصوصیت	
				جرمی	ارزش گرمایی پایین
۲۰/۲ MJ/kg	۴۸/۴ MJ/kg	۳۹/۱ MJ/kg	۴۲/۵۷ MJ/kg	حجمی	
۲۳/۴۳ MJ/m <sup>3</sup>	۳۹/۱۵ MJ/m <sup>3</sup>	۳۴/۳ MJ/Lit	۳۵/۷۲ MJ/Lit		
۱/۱۶ kg/m <sup>3</sup>	۰/۸۰۹ kg/m <sup>3</sup>	۰/۸۷۸ kg/Lit	۰/۸۳۹ kg/Lit		چگالی (دمای ۲۵ °C و فشار ۱ bar)
-	-	۶/۴۸۲ Cst	۳/۰۹ Cst		گرانشی سینماتیکی (۴۰ °C)
-	-	۶۲	۵۷/۳۱		عدد ستان
CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CH <sub>3</sub> COOC <sub>19</sub> H <sub>35</sub>	C <sub>10.8</sub> H <sub>18.7</sub>	عناصر	ترکیبات تشکیل‌دهنده
۷۰، ۳۰	۹۳، ۵، ۲، ۱	۱۰۰	۱۰۰	درصد	
۷/۳۲	۱۷/۱۹	۴۱/۵۵	۱۲/۵۷		نسبت هوا به سوخت استوکیومتریکی
۳۰-۲۵ Cm/s	۴۵-۳۷ Cm/s	-	-		سرعت انتشار (شرایط هوای استاندارد)

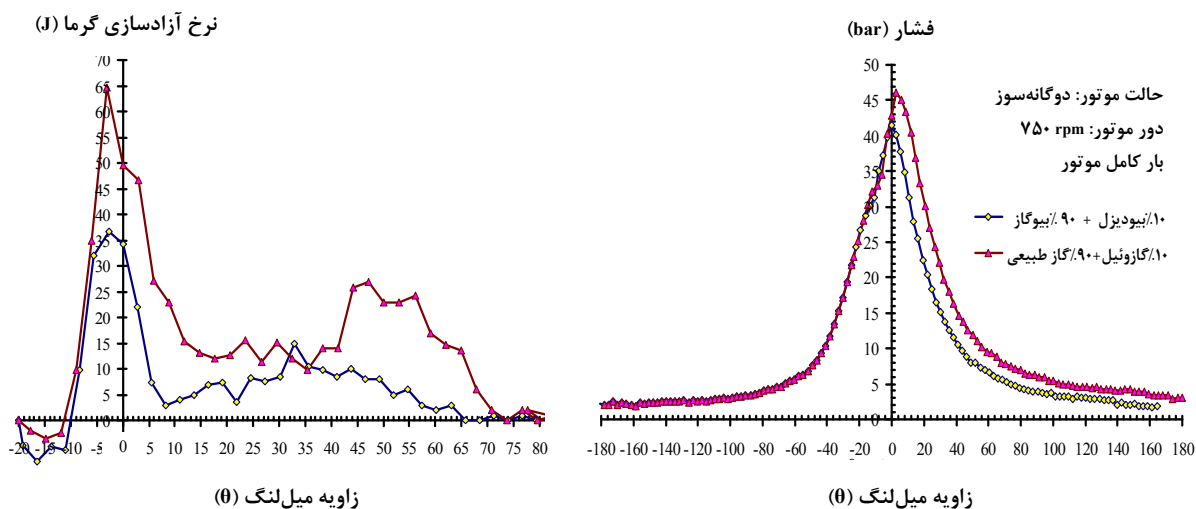
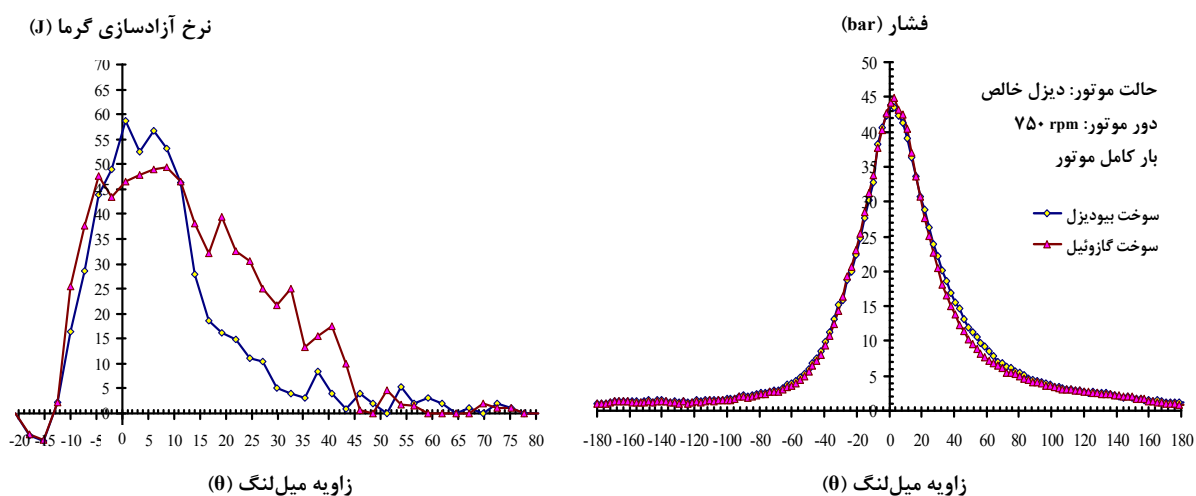
### تأثیر سوخت‌های بیولوژیک (بیودیزل و بیوگاز) بر متغیرهای عملکرد موتور

آزمون‌های تجربی حاکی از این واقعیت است که در صورت استفاده از سوخت‌های گازی گشتاور و توان ترمزی موتور، نسبت به موتور دیزل خالص، افت می‌کند (جدول ۴) که دلیل آن چگالی کم سوخت‌های گازی و جایگزینی آن به جای قسمتی از هوای ورودی به داخل سیلندر و در نتیجه کاهش بازده تنفسی موتور است. اگر چه چگالی سوخت بیوگاز ( $1/16 \text{ kg/m}^3$ ) نسبت به چگالی گاز طبیعی ( $0/809 \text{ kg/m}^3$ ) در حدود ۴۳ درصد بیشتر است و موجب افزایش بازده تنفسی موتور می‌شود، ولی ارزش گرمایی بیوگاز در واحد حجم ( $23/43 \text{ MJ/m}^3$ ) در حدود ۶۰ درصد کمتر از ارزش گرمایی گاز طبیعی ( $39/15 \text{ MJ/m}^3$ ) است؛ در نتیجه با مصرف یک مقدار مشخصی از دو سوخت (مصرف حجمی) توان گرمایی معادل سوخت گاز طبیعی بیشتر است. توان ترمزی موتور در حالت موتور دوگانه‌سوز بیولوژیک (۱۰ درصد بیودیزل به‌عنوان سوخت آتش‌زا و ۹۰ درصد بیوگاز به‌عنوان سوخت اصلی) نسبت به حالت موتور دوگانه‌سوز متعارف (۱۰ درصد گازوییل به‌عنوان سوخت آتش‌زا و ۹۰ درصد گاز طبیعی به‌عنوان سوخت اصلی) به اندازه ۵/۸ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج تجربی، با استفاده از سوخت بیوگاز، مصرف ویژه سوخت گازی در موتور افزایش می‌یابد (جدول ۴) که دلیل آن پایین‌بودن انرژی واحد جرم بیوگاز نسبت به گاز طبیعی و پایین‌بودن سرعت انتشار بیوگاز نسبت به گاز طبیعی است. سرعت انتشار بیوگاز در شرایط هوای استاندارد ۳۵ درصد کمتر از گاز طبیعی است که موجب کاهش بازده ترمزی گرمایی موتور شده و به دنبال آن موجب افزایش مصرف سوخت ویژه می‌شود. از طرف دیگر، ارزش گرمایی واحد جرم سوخت بیودیزل ( $39/1 \text{ MJ/m}^3$ ) به‌عنوان سوخت آتش‌زا کمتر از ارزش گرمایی گازوییل ( $42/57 \text{ MJ/m}^3$ ) است، ولی در عوض چگالی سوخت بیودیزل ( $0/878 \text{ kg/Lit}$ ) بیشتر از چگالی گازوییل ( $0/839 \text{ kg/Lit}$ ) است که تا حدودی پایین‌بودن ارزش گرمایی آن را جبران می‌کند، زیرا ارزش حرارتی واحد حجم بیودیزل ( $34/3 \text{ MJ/Lit}$ ) نسبت به گازوییل ( $35/72 \text{ MJ/Lit}$ ) در حدود ۴ درصد کمتر است و هنگامی که شانه سوخت‌رسانی به طور کامل باز است (در دور ۷۵۰rpm و بار کامل) مقدار حجم سوخت پمپ‌اشده توسط پمپ افشانه ثابت است. نتایج تجربی حاکی از تأثیر کم سوخت بیودیزل، به‌عنوان سوخت آتش‌زا، بر احتراق سوخت بیوگاز است. لذا مصرف ویژه ترمزی در حالت دیزل دوگانه‌سوز برای دو سوخت بیودیزل و گازوییل تفاوت چندانی ندارد. میزان جایگزینی سوخت بیودیزل ۱/۰۷۷۴ برابر سوخت گازوییل بوده و میزان جایگزینی سوخت بیوگاز ۱/۱۴۸ برابر سوخت گاز طبیعی است (جدول ۴). سوخت بیودیزل، به دلیل داشتن عدد ستان بالا (۶۲) نسبت به گازوییل (۵۷/۲۱)، موجب کاهش زمان تاخیر در اشتعال می‌شود. با کاهش زمان تاخیر در اشتعال، سرعت شعله سوخت بیودیزل (آتش‌زا) در مخلوط سوخت بیوگاز و هوا کاهش می‌یابد و در نتیجه سوخت بیوگاز (سوخت اصلی) به طور کامل محترق نشده موجب افت فشار و دمای داخل محفظه احتراق می‌شود. علاوه بر آن، قابلیت پودرشدن سوخت بیودیزل به دلیل بالابودن گرانی آن ( $6/482 \text{ Cst}$ ) نسبت به گازوییل ( $3/09 \text{ Cst}$ ) کمتر بوده و همچنین سرعت انتشار سوخت بیوگاز ( $25-30 \text{ Cm/s}$ ) کمتر از گاز طبیعی ( $37-45 \text{ Cm/s}$ ) است که موجب تشدید این پدیده (احتراق ناقص) می‌شوند (جدول ۴).

جدول ۴- تأثیر سوخت بیودیزل و بیوگاز بر متغیرهای عملکرد موتور دیزل خالص و دیزل دوگانه‌سوز

مشخصه	واحد	موتور دیزل خالص		موتور دیزل دوگانه‌سوز	
		۱۰۰ درصد گازوییل	۱۰۰ درصد بیودیزل	۱۰ درصد گازوییل و ۹۰ درصد بیوگاز	۱۰ درصد گازوییل و ۹۰ درصد گاز طبیعی
توان ترمزی موتور	Kw	۴/۲۵	۴/۰۸	۳/۶۸	۳/۹۱
بازده گرمایی ترمزی	%	۲۶	۲۷	۲۳	۲۵
حداکثر فشار	bar	۴۵/۲	۴۳/۸	۴۱/۵	۴۶/۱
دمای خروجی اگزوز	°C	۳۴۴	۳۱۹	۲۵۵	۲۷۵
مصرف ویژه سوخت مایع	gr/ Kw.hr	۳۱۳	۳۶۸	۲۱۵	۱۹۷
مصرف ویژه سوخت گازی	gr/ Kw.hr	-	-	۲۸۵	۲۴۵

زمان تاخیر در اشتعال سوخت بیودیزل، به دلیل داشتن عدد ستان بالاتر، کوتاه‌تر از سوخت گازوئیل است. بنابراین، در حالت موتور دیزل خالص طول دوره احتراق پیش‌آمیخته با استفاده از سوخت بیودیزل کوتاه‌تر می‌شود و قسمت عمده سوخت در یک دوره طولانی‌تری محترق می‌شود. در این دوره، کنترل احتراق توسط فرایند احتراق نفوذی صورت می‌گیرد. در حالت موتور دیزل خالص، بازه احتراق (فاصله زمانی بین ۱۰ تا ۹۰ درصد احتراق سوخت) برای گازوئیل (۵- تا ۳۲ درجه) کوچک‌تر از سوخت بیودیزل (۶- تا ۴۲ درجه) است و حداکثر مقدار فشار محفظه احتراق برای سوخت گازوئیل (۴۵/۲ bar) بالاتر از سوخت بیودیزل (۴۳/۸ bar) است، زیرا طول دوره تاخیر در احتراق سوخت بیودیزل کمتر از سوخت گازوئیل است و به تبع آن حداکثر مقدار نرخ آزادسازی انرژی گرمایی بیودیزل نیز کمتر از سوخت گازوئیل است.



در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز، از طرفی استفاده از سوخت بیودیزل به‌عنوان سوخت آتشنا موجب کاهش زمان تاخیر در اشتعال شده و به تبع آن باعث افزایش نرخ آزادسازی انرژی و افزایش فشار حداکثر می‌شود ولی از طرف دیگر سرعت انتشار بالای سوخت بیوگاز موجب احتراق سریع شده و تا حدودی کاهش زمان تاخیر در اشتعال سوخت بیودیزل را جبران می‌کند.

اما پایین بودن ارزش گرمایی سوخت بیوگاز در واحد حجم موجب کاهش مقدار نرخ آزادسازی انرژی گرمایی شده و در نتیجه حداکثر مقدار فشار برای سوخت بیودیزل و بیوگاز (۴۱/۵ bar) بسیار کمتر از سوخت گازوییل و گاز طبیعی (۴۶/۱ bar) است. عامل انتشار سریع شعله در سوخت بیوگاز موجب بروز پدیده کوبش در شرایط بار بیش از حد می‌شود. در این حالت بازه احتراق برای سوخت گازوییل (۳- تا ۵۷ درجه) بزرگ‌تر از سوخت بیودیزل (۴- تا ۴۸ درجه) است.

### تأثیر سوخت‌های بیولوژیک (بیودیزل و بیوگاز) بر انتشار آلاینده‌ها

نتایج تجربی حاکی از این واقعیت است که در حالت موتور دیزل خالص، در صورت استفاده از سوخت بیودیزل، طول دوره تاخیر در احتراق کوتاه‌تر بوده و در نتیجه دوره احتراق پیش‌آمیخته نیز کوتاه‌تر است. بنابراین، مقدار جرم کمتری در طول دوره احتراق پیش‌آمیخته محترق می‌شود و حداکثر مقدار نرخ احتراق پایین‌تری نسبت به سوخت گازوییل دارد. این پدیده موجب کاهش حداکثر مقدار فشار داخل محفظه احتراق شده و به تبع آن باعث کاهش سروصدا (Noise) و آلاینده NOx می‌شود، زیرا آلاینده NOx تنها در دماهای بالا تولید می‌شود (فشار بالا موجب دمای بالا می‌شود). استفاده از سوخت بیودیزل موجب کاهش آلاینده NOx تا ۱۸ درصد نسبت به استفاده از سوخت گازوییل می‌شود.

در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز، در صورت استفاده از سوخت‌های فسیلی گازوییل و گاز طبیعی، نرخ آزادسازی انرژی در دوره احتراق پیش‌آمیخته بیشتر از حالت موتور دیزل خالص است و در نتیجه حداکثر مقدار فشار داخل محفظه احتراق بالاتر از حالت موتور دیزل خالص بوده و موجب بالابودن آلاینده NOx می‌شود. لذا در در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز، با سوخت‌های فسیلی گازوییل و گاز طبیعی، بیشترین مقدار انتشار آلاینده NOx را داریم. ولی جالب توجه این است که در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز، با استفاده از سوخت‌های بیولوژیک بیودیزل و بیوگاز، حداکثر مقدار فشار داخل محفظه احتراق کمترین مقدار را داشته و در نتیجه مقدار آلاینده NOx نیز کمترین مقدار را دارد. این پدیده می‌تواند رهیافتی جدید برای کاهش آلاینده NOx در موتورهای دوگانه‌سوز باشد.

جدول ۵- تأثیر سوخت بیودیزل و بیوگاز بر انتشار آلاینده‌ها در موتور دیزل خالص و دیزل دوگانه‌سوز

موتور دیزل دوگانه‌سوز		موتور دیزل خالص		واحد	نوع آلاینده
۱۰ درصد گازوییل و ۹۰ درصد بیوگاز	۱۰ درصد گازوییل و ۹۰ درصد گاز طبیعی	۱۰۰ درصد بیودیزل	۱۰۰ درصد گازوییل		
۲۸۵	۳۵۲	۲۴۱	۲۹۲	ppm	اکسیدهای نیتروژن (NOx)
۰/۰۱۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱۰	۰/۰۱۱	%V	منوکسیدکربن (CO)
۶۰	۴۶/۱	۴۴/۸	۴۵/۲	%V	دی‌اکسیدکربن (CO <sub>2</sub> )
۳۲/۱	۴۴/۸	۱۴/۶	۵۷/۹	ppm	هیدروکربن‌های نسوخته (UHC)

نتایج آزمون‌ها نشان داد که در صورت استفاده از سوخت بیودیزل به جای گازوییل در موتور دیزل خالص، مقدار انتشار آلاینده CO و CO<sub>2</sub> به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به گازوییل کاهش می‌یابد، زیرا به ازای واحد جرم مشخصی، نسبت هیدروژن به کربن موجود در سوخت بیودیزل بیشتر از گازوییل است و علاوه بر آن سوخت بیودیزل حاوی ۱۰ تا ۱۲ درصد اکسیژن در ساختار مولکولی خود است که موجب سریع‌تر بودن دوره احتراق نفوذی نسبت به استفاده از سوخت گازوییل است. این پدیده باعث احتراق کامل سوخت و افزایش بازده گرمایی می‌شود و در نتیجه مقدار ذرات کربن‌دار تولیدشده کاهش می‌یابد. در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز، در صورت استفاده از بیودیزل و بیوگاز، با اینکه سوخت بیودیزل موجب کاهش آلاینده CO و CO<sub>2</sub> می‌شود، ولی به دلیل وجود ۳۰ درصد گاز CO<sub>2</sub> در سوخت بیوگاز مقدار آلاینده CO و CO<sub>2</sub> بیشترین مقدار را دارد.

کاهش ۷۵ درصدی انتشار هیدروکربن‌های نسوخته (UHC) با استفاده از سوخت بیودیزل در حالت دیزل خالص یکی از نتایج مهم آزمون‌های تجربی است، زیرا وجود اکسیژن در ساختار شیمیایی سوخت بیودیزل موجب احتراق کامل سوخت در دوره احتراق نفوذی و افزایش بازده می‌شود و در نتیجه هیدروکربن‌های موجود در سوخت تا حد بالایی اکسید می‌شوند. همچنین، نتایج آزمون نشان داد که در حالت دیزل دوگانه‌سوز متعارف، با استفاده از سوخت‌های گازوییل و گاز طبیعی، مقدار انتشار هیدروکربن‌های نسوخته تا ۳۳ درصد نسبت به حالت دیزل خالص با سوخت گازوییل کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش دمای محفظه احتراق (در اثر افزایش فشار) است که موجب می‌شود تا هنگام رسیدن به دیواره سیلندر شعله دیرتر خاموش شود. ولی در مورد استفاده از سوخت‌های بیودیزل و بیوگاز در حالت دیزل دوگانه‌سوز مقدار کاهش هیدروکربن‌های نسوخته به اندازه حالت دیزل دوگانه‌سوز متعارف نیست که دلیل آن پایین بودن دمای محفظه احتراق و ناخالصی‌های سوخت بیوگاز است.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از این واقعیت است که استفاده هم‌زمان از سوخت‌های بیولوژیک بیودیزل و بیوگاز در موتور دوگانه‌سوز امکان‌پذیر است، ولی موجب افت توان موتور می‌شود. توان ترمزی موتور در حالت دوگانه‌سوز بیولوژیک (۱۰ درصد بیودیزل به‌عنوان سوخت آتش‌زا و ۹۰ درصد بیوگاز به‌عنوان سوخت اصلی) نسبت به حالت دوگانه‌سوز متعارف (۱۰ درصد گازوییل به‌عنوان سوخت آتش‌زا و ۹۰ درصد گاز طبیعی به‌عنوان سوخت اصلی) به اندازه ۵/۸ درصد کمتر است، زیرا به دلیل وجود ۳۰ درصد  $CO_2$  در سوخت بیوگاز ارزش گرمایی آن در حدود ۶۰ درصد کمتر از ارزش گرمایی گاز طبیعی است و در نتیجه، با مصرف حجم مشخصی از هر دو سوخت، توان گرمایی معادل سوخت گاز طبیعی بیشتر است. از طرف دیگر، ارزش گرمایی واحد جرم سوخت بیودیزل به‌عنوان سوخت آتش‌زا کمتر از ارزش گرمایی گازوییل است، ولی در عوض چگالی سوخت بیودیزل بیشتر از چگالی گازوییل است که تا حدودی پایین بودن ارزش گرمایی آن را جبران می‌کند. نتایج تجربی نیز حاکی از تأثیر کم سوخت بیودیزل به‌عنوان سوخت آتش‌زا بر احتراق سوخت بیوگاز است. میزان جایگزینی سوخت بیودیزل ۱/۰۷۷۴ برابر سوخت گازوییل است که در حدود ۰/۰۷ بیشتر از گازوییل است. لذا مصرف ویژه ترمزی در حالت دیزل دوگانه‌سوز برای دو سوخت بیودیزل و گازوییل تفاوت چندانی ندارد. همچنین، در حالت موتور دیزل خالص استفاده از سوخت بیودیزل موجب کاهش آلاینده  $NO_x$  تا ۱۸ درصد نسبت به استفاده از سوخت گازوییل می‌شود، ولی در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز با سوخت‌های فسیلی گازوییل و گاز طبیعی بیشترین مقدار انتشار آلاینده  $NO_x$  را داریم. جالب توجه این است که در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز، با استفاده از سوخت‌های بیولوژیک بیودیزل و بیوگاز، مقدار آلاینده  $NO_x$  کمترین مقدار را دارد. این پدیده می‌تواند رهیافتی جدید برای کاهش آلاینده  $NO_x$  در موتورهای دوگانه‌سوز باشد. استفاده از سوخت بیودیزل به جای گازوییل در موتور دیزل خالص مقدار انتشار آلاینده  $CO$  و  $CO_2$  تا ۱۰ درصد نسبت به گازوییل کاهش می‌دهد. در حالت دیزل دوگانه‌سوز، در صورت استفاده از بیودیزل و بیوگاز، با اینکه سوخت بیودیزل موجب کاهش آلاینده  $CO$  و  $CO_2$  می‌شود، ولی به دلیل وجود ۳۰ درصد گاز  $CO_2$  در سوخت بیوگاز مقدار انتشار آلاینده‌های  $CO$  و  $CO_2$  بیشترین مقدار را دارد. کاهش ۷۵ درصدی انتشار هیدروکربن‌های نسوخته (UHC) با استفاده از سوخت بیودیزل در حالت دیزل خالص یکی از نتایج مهم آزمون‌های تجربی است، ولی در حالت دیزل دوگانه‌سوز بیولوژیک مقدار کاهش هیدروکربن‌های نسوخته به اندازه حالت دیزل دوگانه‌سوز متعارف نیست که دلیل آن پایین بودن دمای محفظه احتراق و ناخالصی‌های سوخت بیوگاز است.

سوخت‌های بیودیزل و بیوگاز از مواد اولیه آلی و طبیعی به دست می‌آیند؛ بنابراین سوخت‌های تجدیدپذیراند. در تولید این سوخت‌ها عموماً از ضایعات کشاورزی یا حیوانی (زباله) استفاده می‌شود؛ لذا سوخت‌های ارزان‌قیمت‌اند و در صورت توسعه صنعت تولید آن‌ها می‌توانند به آسانی در دسترس باشند. تبدیل ضایعات (زباله) به سوخت قابل استفاده در موتورهای احتراق

داخلی نه تنها باعث حذف مواد زائد می شود، بلکه انرژی ارزانی را در اختیار کاربر قرار می دهد و به عنوان یک تکنولوژی پایدار می تواند جایگزین مناسبی برای سوخت موتورهای احتراق داخلی مطرح شود.

## منابع

1. B. Najafi, V. Piruzpanah and B. Ghobadian, "Experimental Investigation of Performance and Emission Parameters of a Small Diesel Engine Using CNG and Biodiesel," *SAE Paper No. 2007-32-0075*, 2007.
2. S. H. Yoon, H. K. Suh and C. S. Lee, "Effect of Spray and EGR Rate on the Combustion and Emission Characteristics of Biodiesel Fuel in a Compression Ignition Engine," *Energy and Fuels*, 23, pp. 1486-149, 2009.
3. S. H. Park, S. H. Yoon and C. S. Lee, "Effect of the Temperature Variation on Properties of Iodiesel and Biodiesel-Ethanol Blends Fuels," *Oil & Gas Science and Technology*, 63, No. 6, pp. 737-745, 2008.
4. C. Rahmouni, M. Tazerout and O. Le Corre, "A Method to Determine Biogas Composition for Combustion Control," *SAE 2002-01-1708*, 2002.
5. C. Tricase and M. Lombardi, "State of the Art and Prospects of Italian Biogas Production from Animal Sewage: Technical-Economic Considerations," *Renewable Energy*, 34, pp. 477-485, 2009.
6. B. B. Sahoo, N. Sahoo and U. K. Saha, "Effect of Engine Parameters and Type of Gaseous Fuel on the Performance of Dual-Fuel Gas Diesel Engines-A Critical Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp. 1151-1184, 2009.
7. R. G. Papagiannakis and D. T. Hountalas, "Experimental Investigation Concerning the Effect of Natural Gas Percentage on Performance and Emissions of a DI Dual Fuel Diesel Engine," *Applied Thermal Engineering*, 23, pp. 353-365, 2003.
8. O. M. I. Nwafor, "Effect of Advanced Injection Timing on the Performance of Natural Gas in Diesel Engines," 25, pp. 11-20, 2000.
9. N. N. Mustafi and R. R. Raine, "A Study of the Emissions of a Dual Fuel Engine Operating with Alternative Gaseous Fuels," *SAE 2008-01-1394*, 2008.
10. S. Maji and B. B. Arora, "Use of CNG and Diesel in CI Engines in Dual Fuel Mode," *SAE 2008-28-0072*, 2008.
11. A. Henham and M. K. Makkar, "Combustion of Simulated Biogas in a Dual Fuel Diesel Engine," *Energy Conversion & Management*, 39, pp. 2001-2009, 1998.

## English Abstract

# Experimental Investigation of the Effect of Using Biodiesel and Biogas on Dual Fuel Diesel Engine

B. Najafi

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

(Received: 2010/7/18, Received in revised form: 2011/4/7, Accepted: 2011/4/23)

*In this study, the diesel engine fuel system was modified and the use of alternative fuels, i.e. biodiesel and biogas, was investigated in biological dual-fuel diesel engines. Biodiesel fuel from waste cooking oil was produced by transesterification method and biogas fuel was produced through anaerobic fermentation of livestock waste. Biogas comprised primarily methane (70%) and carbon dioxide (30%). In the present study, 90% of the diesel was replaced by biogas, while the remaining 10% was used as a pilot fuel. Using equipment such as mixer, regulator, filter, valve and flow meter, the basic diesel engine (Lister M8/1) was converted into dual-fuel diesel engine. Afterwards, the engine performance and emission tests at full load and at fixed speed of 750 rpm were investigated for fossil fuels (diesel and natural gas) and biofuel (biodiesel and biogas). The experimental results indicated that the simultaneous use of biofuels (biodiesel and biogas) in dual-fuel engines is possible, though it is accompanied by the loss of engine power. In these conditions, the NOx emission decreased, unlike the enhanced emission of CO, CO<sub>2</sub> and UHC.*

**Keywords:** Biodiesel, Biogas, Diesel fuel, Natural gas, Dual fuel diesel engine