



## بررسی تجربی تاثیر استفاده از بیودیزل و بیوگاز به جای گازوئیل و گاز طبیعی در موتور دیزل دوگانه سوز

بهمن نجفی<sup>۱</sup>

دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی  
Najafib@uma.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق با انجام یک سری تغییرات اساسی در سیستم سوخت‌رسانی موتور دیزل، استفاده از هر دو سوخت جایگزین بیودیزل و بیوگاز در موتور دیزل دوگانه‌سوز (موتور دیزل دوگانه‌سوز بیولوژیک) میسر شد. سوخت بیودیزل مورد استفاده، از روغن پسماند رستوران به روش ترنس‌استریفیکاسیون تولید شده و سوخت بیوگاز نیز از طریق تخمیر بی‌هوازی فضولات دامی تهیه گردید. سوخت بیوگاز شامل ۷۰٪ گاز متان و ۳۰٪ دی‌اکسیدکربن بود و از نظر تولید انرژی تا ۹۰ درصد، جایگزین سوخت گاز طبیعی گردید، مابقی ۱۰ درصد انرژی نیز توسط سوخت بیودیزل به عنوان سوخت آتشنا تامین شد که جایگزین سوخت گازوئیل شده بود. به منظور مقایسه تاثیر 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 آلاینده‌گی، در بار کامل و در دور ثابت ۷۵۰ rpm برای هر یک از سوختهای فسیلی (گازوئیل و گاز طبیعی) و بیولوژیک (بیودیزل و بیوگاز) صورت گرفت. نتایج تجربی نشان داد که استفاده همزمان از سوختهای بیولوژیک بیودیزل و بیوگاز در موتور دوگانه‌سوز امکانپذیر بوده ولی موجب افت توان موتور می‌شود، در این حالت انتشار آلاینده NO<sub>x</sub>، بر خلاف CO<sub>2</sub> و UHC کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بیودیزل - بیوگاز - موتور دیزل دوگانه‌سوز

### ۱- 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 نامحدود و پایان‌پذیر نیستند. عدم درک این واقعیت در کشورهایی چون ایران که کشوری در حال توسعه است، می‌تواند علاوه بر خساراتی که هم اکنون بر اقتصاد کشور وارد می‌کند، زندگی و اقتصاد نسل‌های آینده را به طور جدی به مخاطره افکند. لذا تولید سوخت‌هایی با منشأ طبیعی [منشاء گیاهی] و با خاصیت تجدیدپذیری، نه تنها یک انتخاب بلکه یک اجبار است. در این میان موتورهای دیزل به عنوان یک بخش 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 بوده و یکی از عوامل ایجاد کننده آلودگی نیز می‌باشند. جستجو برای یافتن و استفاده از سوخت‌های جایگزین به واسطه دو عامل محدودیت منابع فسیلی و نیز مشکلات جدی آلودگی محیط زیست، بشدت دنبال می‌شود. در یک دیدگاه ایده‌آل، سوخت جایگزین مناسب برای موتورهای دیزل باید حفظ مزایای این موتورها را تضمین نماید.

۱- استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی



انجمن احتراق ایران

FCCI2010-3114

## سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
دانشکده مهندسی هوافضا

موضوع استفاده از سوخت گازی در موتورهای احتراق داخلی به سال ۱۹۰۱ میلادی برمی‌گردد. رادولف دیزل در نظر داشت با وارد کردن یک سوخت ثانویه مایع به داخل مخلوط متراکم سوخت گازی و هوا یک احتراق منظم ایجاد نماید. آزمایش‌های وی چندان موفقیت آمیز نبود چرا که موتور وی با کوبش‌های شدید همراه بود. در نهایت وی تصمیم گرفت که به اجبار از مقدار گاز همراه با هوا تا حد زیادی بکاهد تا کنترل احتراق به نحوی مطلوب انجام گیرد. گاز بکار رفته در آن زمان گاز حاصل از زغال سنگ بود که اصولاً شامل متان و برخی از هیدروکربن‌های دیگر بود که باعث کوبش می‌شده است. تحقیقات انجام شده بر روی موتورهای دوگانه‌سوز از زمان ابداع تا کنون حاکی از این واقعیت است که، قدرت ترمزی و گشتاور ترمزی موتور دیزل بطور عمومی بالاتر از دوگانه‌سوز است. بدلیل تفاوت ارزش حرارتی سوخت گازوئیل و گاز طبیعی، توان ترمزی نسبت به کل مقدار سوخت پاشیده شده (یعنی مجموع سوخت دیزل و سوخت گاز طبیعی) برابر بوده و نسبت استوکیومتری حالت دوگانه‌سوز در تمام سرعت‌های موتور کمتر از دیزل خالص است. حداکثر فشار با افزایش سوخت گازی افزایش می‌یافت. نمودارهای فشار و دمای محفظه احتراق در موتور دوگانه‌سوز، دارای دو نقطه حداکثر می‌باشد که اولی بعلت تأخیر در اشتعال سوخت مایع آتش‌زا بوده و دومی ناشی از آزادسازی انرژی بوسیله احتراق سوخت گازی می‌باشد. داشتن دو نقطه پیک فشار، از مشخصه‌های احتراق دوگانه می‌باشد. آلاینده‌های NOx و CO در موتور دیزل همواره بالاتر از موتور دوگانه‌سوز می‌باشد. افزایش دور موتور یا بار موتور، باعث افزایش عملکرد حرارتی موتور دوگانه‌سوز می‌شود. افزایش مقدار سوخت آتش‌زا، باعث افزایش گشتاور خروجی، عملکرد حرارتی و فشار حداکثر شده ولی موجب کاهش سر و صدای احتراق می‌شود. بنابراین، سروصدای احتراق در موتورهای دوگانه‌سوز بیشتر از موتور دیزل خالص می‌باشد. در موتورهای دوگانه‌سوز اگر از یک نسبت تراکم بالاتری استفاده شود، شروع کوبش زودتر اتفاق می‌افتد فلذا برای کار کردن بدون کوبش موتورهای دوگانه‌سوز، می‌بایست از نسبت تراکم پایین استفاده شود [۱۱-۱].

در ایران نیز استفاده از گاز طبیعی سال‌ها است که به عنوان سوختی مناسب برای جایگزینی گازوئیل مطرح شده است زیرا دارای آلاینده‌گی کمتر بوده و به فراوانی در منابع زیرزمینی یافت می‌شود. ماده اصلی تشکیل دهنده گاز طبیعی، ساده‌ترین هیدروکربن موجود در طبیعت، یعنی گاز متان می‌باشد (۹۵ درصد حجمی گاز طبیعی، گاز متان می‌باشد)، در نتیجه انتشار آلاینده‌های مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن در موتورهای گازسوز به دلیل احتراق بهتر گاز متان نسبت به سوخت‌هایی با زنجیره هیدروکربنی بلند مانند گازوئیل، کمتر است. هر چند جایگزینی گاز طبیعی به جای گازوئیل می‌تواند به لحاظ اقتصادی و کاهش انتشار آلاینده‌ها در ایران موجه باشد ولی باید توجه داشت که سوخت گاز طبیعی نیز نوعی سوخت فسیلی بوده و تجدیدپذیر نمی‌باشد و مهمتر از آن می‌توان به مشکل عدم توزیع گاز در تمام نقاط کشور، افت فشار در روزهای سرد سال و عدم دسترسی آسان و کمبود تعداد جایگاه‌های سوخت‌گیری اشاره کرد. همچنین در بحث امنیت پایدار انرژی، وابستگی به سوخت گاز طبیعی می‌تواند در شرایط بحرانی، تهدیدی جدی است، فلذا فراهم آوردن سوخت‌های جایگزین ارزان قیمت و در دسترس (مانند سوخت‌های بیولوژیک) در سبد سوختی کشور، قابل تامل است.

امکان جایگزینی سوخت‌های بیولوژیک بجای سوخت‌های مایع نفتی در موتورهای دیزل به دو صورت کلی امکان‌پذیر است: بصورت مایع (بیودیزل) و بصورت گازی (بیوگاز). جهت استفاده از سوخت بیودیزل در موتورهای دیزل بجای سوخت گازوئیل، اصولاً هیچ تغییر اساسی در موتور لازم نیست ولی جهت استفاده از سوخت بیوگاز لازم است تا موتور دیزل خالص به دیزل دوگانه‌سوز تبدیل گردد. در این حالت، سوخت بیودیزل به عنوان عامل اشتعال یا آتش‌زا (پایلوت) بوده و سوخت بیوگاز به منظور ادامه دهنده احتراق و سوخت اصلی می‌باشد. در این تحقیق سوخت بیودیزل و گازوئیل، سوخت آتش‌زا بوده و از سوخت بیوگاز و گاز طبیعی به عنوان سوخت اصلی استفاده گردید. جایگزینی سوخت بیودیزل و بیوگاز به جای گازوئیل و گاز طبیعی، شرایط جدیدی را بر موتور دیزل دوگانه‌سوز تحمیل می‌کند. تا کنون کارهای تحقیقاتی زیادی بر روی استفاده از سوخت گاز طبیعی در موتورهای دیزل دوگانه‌سوز (با سوخت پایلوت گازوئیل)، در دنیا انجام شده است ولی در مورد استفاده از سوخت‌های بیولوژیک (بیودیزل و بیوگاز) در موتور دوگانه‌سوز، تحقیقاتی انجام نگرفته و در صورت اجرا، هنوز وارد ادبیات فن نشده است.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- بیوگاز، سوخت جایگزین حالت گازی

بیوگاز به گازهای اطلاق می‌شود که در اثر تخمیر مواد آلی بوسیله باکتریهای بی‌هوازی تولید می‌گردند، گازهای تولید شده بدون بو، تمیز، احتراق پذیر و سبک‌تر از هوا می‌باشد. بیوگاز از تخمیر مواد آلی (سلولوزی) حیوانی یا گیاهی و در غیاب هوا بوسیله باکتری‌های متانولوژیک (Methanologonic) بوجود می‌آید. بیوگاز با اسامی دیگری مانند: گاز مرداب، گاز باتلاق، Wispgas، Willogas و Goborgas نیز شناخته می‌شود. از نظر شیمیایی بخش قابل استفاده بیوگاز، گاز متان است. بیوگاز با یک شعله آبی رنگ که دارای حرارتی برابر  $800^{\circ}\text{C}$  می‌سوزد. این گاز با نسبت ۱ با ۲۰ با هوا مخلوط شده و دارای سرعت اشتعال بالایی است و هر متر مکعب از آن دارای ارزش حرارتی  $5650 \text{ KCal}$  می‌باشد. تکنولوژی تولید این نوع سوخت، تخمیر بی‌هوازی مواد آلی می‌باشد که در چهار مرحله، تحت تاثیر چهار گروه از باکتری‌های بی‌هوازی، انجام می‌گیرد: (۱) تجزیه کردن ملکول‌های سنگین مواد اولیه (سلولز، پروتئین، نشاسته، چربی) به یک ملکول کوچک‌تر (هیدروژن، دی‌اکسیدکربن، اسیدهای چربی و اسیدهای آمینه) بوسیله 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 بدست آمده در مرحله اول و دوم به نمک جوهر سرکه به کمک ساختاری به نام اسیدزا (Homoacetogens) و (۴) تبدیل نمک جوهر سرکه و تعدادی از ترکیبات دیگر نظیر دی‌اکسیدکربن و هیدروژن به متان، به کمک باکتری‌های متان‌زا (Methanologonic). بطور کلی، تولید بیوگاز یک فرآیند پیچیده است ولی تمام این مراحل را می‌توان بصورت ساده زیر بیان کرد:



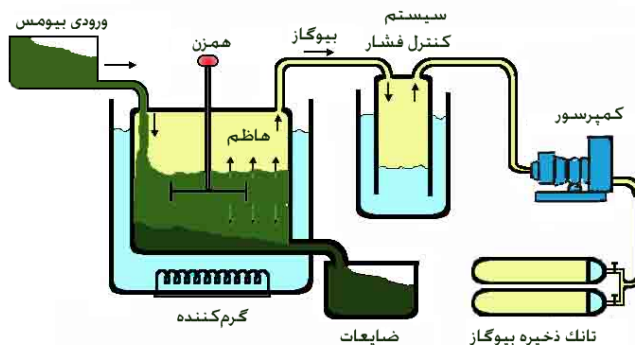
### ۲-۲- طراحی و ساخت دستگاه تولید بیوگاز

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 رآکتور اصلی، سیستم گرم‌کننده، سیستم همزن، سیستم جمع‌آوری بیوگاز و کنترل فشار می‌باشد. واکنشهای غیر هوازی در دستگاه بیوگاز در دمای معادل  $37^{\circ}\text{C}$  در محدوده فعالیت باکتری‌های مزوفیلیک (Mesophilic) صورت می‌گیرد لذا برای نگهداری رآکتور در دمای مذکور یک سیستم گرم‌کننده الکتریکی طراحی و ساخته شد که بطور غیر مستقیم محتویات رآکتور 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 حرارت بالا موجب هزینه زیاد می‌شود. مواد خام مورد مصرف دستگاه بیوگاز، فضولات گاو می‌باشد، پهن گاو شامل ترکیبات آمونیاکی است در صورتیکه باکتریهای غیر هوازی 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 می‌باشد. در صورتیکه این نسبت بیشتر شود، مقدار نیتروژن (ازت) تمام شده 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 برای برقراری تعادل در محیط تخمیری مجدداً با صرف زمان بیشتری برقرار گردد. در حالت دیگر اگر مقدار ازت در محیط تخمیر زیاد باشد (نسبت C/N کمتر از ۳۰).

FCCI2010-3114

واکنشهای تخمیری به علت عدم وجود کربن کافی متوقف شده و ازت موجود در محیط بصورت گاز آمونیاک متصاعد می‌گردد، 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 می‌باشد و در این تحقیق برای برقراری نسبت C/N در محدوده ۳۰، از مخلوط گاو گندم ۹۰ درصد و پهن گاو ۱۰ درصد وزنی به عنوان ماده اولیه خام استفاده شد ( $30 = 150 \times 10\% + 90 \times 18\%$ ). استفاده خالص از این مواد خام جامد در دستگاه بیوگاز بدلیل داشتن غلظت زیاد، مانع از رشد باکتریها می‌شد، بنابراین ضروری است این مواد با آب رقیق شود. البته غلظت کم نیز موجب لایه لایه شدن محلول موجود در رآکتور می‌شود که مستلزم به هم زدن مداوم می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که بهترین غلظت برای تخمیر بی‌هوازی در دستگاه بیوگاز، در حدود ۷ تا ۹ درصد مواد جامد است. بدلیل که این مواد اولیه استفاده شده در این تحقیق پهن گاو و گاو گندم تازه بوده و این مواد حاوی مقداری آب در بافت خود هستند لذا از ۵۰ درصد آب، ۴۵ درصد گاو گندم و ۵ درصد پهن تازه گاو در داخل رآکتور استفاده گردید.

رآکتور ساخته شده در این تحقیق از نوع پیوسته (continuous) بوده و می‌بایست هر روز مخلوط فضولات گاوی و گاو گندم به همراه آب وارد آن شود، مزیت اصلی این نوع رآکتور، تولید پیوسته بیوگاز می‌باشد. مقدار بیوگاز تولید شده بستگی به زمان ماند و دمای رآکتور و نوع مواد اولیه دارد، فلذا 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 تک سیلندر دیزل لیستر M8/1 در بار کامل و در حالت دوگانه‌سوز (۹۰ درصد انرژی از سوخت گاز طبیعی و مابقی از گازوئیل تامین می‌شد) ۴۲۵ لیتر سوخت گاز طبیعی مصرف می‌شود، و با توجه به اینکه ارزش حرارتی بیوگاز به دلیل وجود دی‌اکسید کربن در ترکیب آن، تقریباً ۸۰ درصد گاز طبیعی است لذا 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 می‌باشد، در نتیجه برای تولید ۵۳۲ لیتر بیوگاز، لازم است تا روزانه ۱۲ لیتر مخلوط فضولات گاوی و گاو گندم به رآکتور وارد شود ( $532 \div 45 \approx 12$ ). این مخلوط باید به همراه ۱۲ لیتر آب در داخل رآکتور تخلیه شود، لذا رآکتور باید بطور روزانه ۲۴ لیتر تغذیه شود، که ۱۲ لیتر آب (۵۰٪)، ۱۰/۸ لیتر گاو گندم (۴۵٪) و ۱/۲ لیتر پهن تازه گاو (۵٪) می‌باشد، با احتساب ۳۰ روز زمان ماند، حجم رآکتور برابر ۷۲۰ لیتر محاسبه می‌گردد ( $720 = 24 \div 30$ ). 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 دیگری به قطر ۱۲۰ cm و ارتفاع ۱۵۰ cm ساخته شد که رآکتور در داخل آن قرار گرفت. مابین دو استوانه با آب پر می‌شود که از قسمت پایین توسط المنت حرارتی گرم می‌شود. حجم استوانه بیرونی برابر ۱/۳ متر مکعب می‌باشد و با فرض اینکه کل محفظه استوانه بیرونی را آب تشکیل می‌دهد، توان المنت حرارتی برابر ۲۰۰۰ kW بدست می‌آید.



شکل ۲ - شماتیک واحد آزمایشگاهی تولید بیوگاز



حجم مخزن ورودی و خروجی از رآکتور، معادل با تغذیه روزانه مخلوط فضولات گاوی و کاه گندم و آب بوده و برابر ۲۴ لیتر می‌باشد. برای به هم‌زدن رآکتور یک 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 ( $320 = 532 \div 0.6$ )، در نتیجه از یک استوانه به قطر ۶۵cm و ارتفاع ۱۰۰cm استفاده شد که این استوانه بصورت معکوس بر روی استوانه فلزی دیگری به قطر ۸۵cm و ارتفاع ۱۲۰cm قرار می‌گرفت، فاصله بیم دو استوانه با آب پر می‌شد تا مانع از خروج بیوگاز شود. بدیهی است که در این حالت، با تولید شدن بیوگاز، ابداع استوانه وسطی (معکوس) به طرف پایین حرکت کرده و بجای آن بیوگاز جانشین می‌شود. فشار بیوگاز متناسب با اختلاف ارتفاع آب استوانه داخلی و خارجی قابل کنترل و تنظیم است. باکتری‌های متان‌زا نسبت به PH محیط بسیار حساس بوده و تنها در محدوده ۶/۸ تا ۷/۲ فعالیت دارند، محیط اسیدی باعث توقف عمل تخمیر شده و محیط بازی باعث کندی عمل تخمیر شده و موجب تولید گاز دی‌اکسید کربن می‌شود. باید یادآور شد که همراه بیوگاز، گازهای  $CO_2$  و  $SH_2$  نیز تولید می‌شود، حتی ۳۰ تا ۴۰ درصد سوخت بیوگاز را تشکیل می‌دهند. برای جذب  $CO_2$  جریان بیوگاز از درون آب آهک عبور داده شده و گاز بد بوی  $SH_2$  نیز بوسیله براده‌های آهن جذب گردید.

### ۳-۱- بیودیزل، سوخت جایگزین مایع

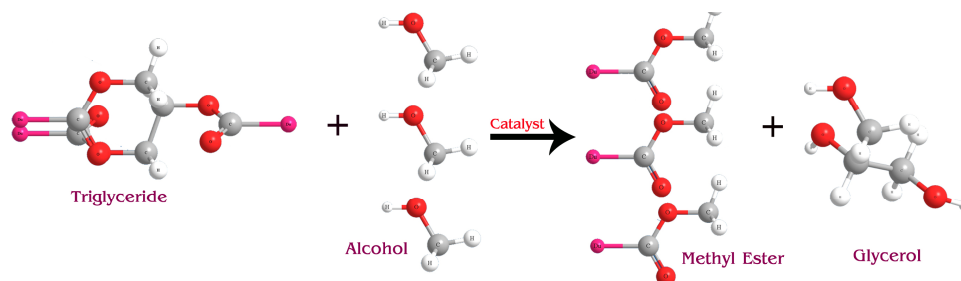
بیودیزل عبارت است از استرهای منواکلیل اسیدهای چرب با زنجیر طویل که از منابع طبیعی تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تهیه شده و دارای فرمول شیمیایی  $3CH_3COOC_{19}H_{35}$  می‌باشد. جهت استفاده از این بیودیزل در موتور دیزل بجای سوخت گازوئیل، اصولاً هیچ تغییر اساسی در موتور لازم نیست. این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

### ۴-۲- تولید سوخت بیودیزل

برای تهیه بیودیزل، از روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی استفاده می‌شود. به منظور بکارگیری مستقیم این ترکیبات به عنوان منبع انرژی در موتورهای احتراق داخلی و دارا بودن شرایط احتراق مناسب، لازم است تا ساختار ملکولی این ترکیبات متعادل شود، بدین منظور ملکول‌های ترکیبات روغن با الکل نظیر متانول (یا اتانول) در یک واکنش ترنس‌استریفیکاسیون (Transesterification) شرکت کرده و ترکیبات شیمیایی به نام استرهای متیل اسید چرب را به وجود می‌آورند. این واکنش در حضور کاتالیزورهای اسیدی و بازی انجام گرفته و الکل مورد استفاده جایگزین الکل اولیه می‌شود و در نتیجه استر جدیدی حاصل می‌گردد که بیودیزل نام دارد.

در این فرآیند گلیسریدهای موجود در روغن با توجه به نوع و تعداد اسیدهای چرب موجود در ساختمان خود، با الکل موجود در واکنش شرکت کرده و استرهای با ساختمان ملکولی جدید بوجود می‌آورند، در نتیجه ساختمان ترکیبات روغن خام به ترکیبات ساده‌تری شکسته می‌شود و به تبع آن خواص ترموفیزیکی و احتراقی روغن بهبود می‌یابد تا به عنوان سوخت جایگزین گازوئیل قابل استفاده گردد. روغن‌های گیاهی شامل ترکیبات مختلفی از زنجیرهای اسیدهای چرب می‌باشند. خصوصیات سوخت بیودیزل بطور قابل ملاحظه‌ای به زنجیرهای اسیدهای چرب موجود در خوراک مورد استفاده بستگی دارد.

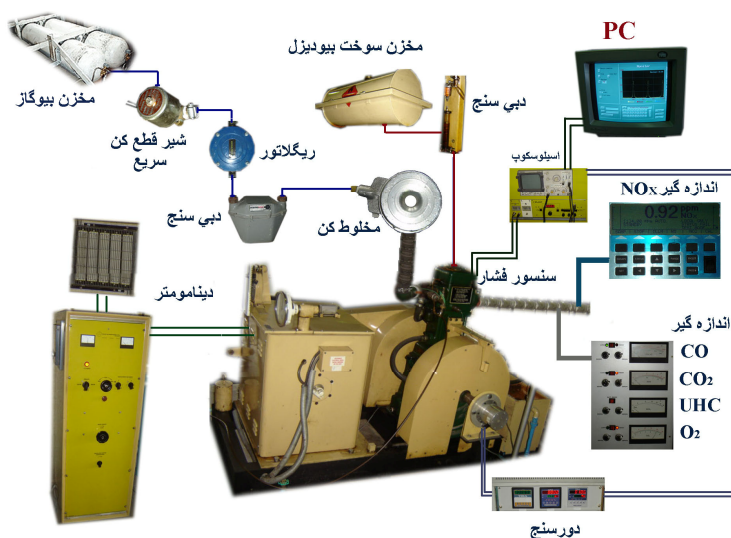
در این تحقیق بیودیزل مورد نیاز از روغن پسماند رستوران (با پایه روغن آفتابگردان) به روش ترنس استریفیکاسیون در دانشگاه محقق اردبیلی تولید گردید و از سوخت گازوئیل متداول در ایران نیز به عنوان سوخت مرجع استفاده شد.



شکل ۳ - فرآیند تولید سوخت بیودیزل با استفاده از الکل متانول

## ۵-۲- موتور تحت آزمایش و تجهیزات اندازه گیری

موتور مورد استفاده در این آزمایش از نوع موتور لیستر مدل M8/1 می باشد که موتوری تک سیلندر، چهار زمانه با تنفس طبیعی و با محفظه احتراق توربولانت، پاشش غیرمستقیم (IDI) با حداکثر توان ۸ اسب بخار در سرعت ۸۵۰ دور بر دقیقه، ساخت کارخانه لیستر انگلستان می باشد. 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 می باشد. موتور دیزل پایه، با اضافه کردن تجهیزاتی مانند ریگلاتور فشار گاز، فیلتر، شیر قطع کن سریع و یک مخلوط کن سوخت گازی و هوا در ورودی منیفولد هوا، توانایی استفاده از سوخت گازی را پیدا کرده و تبدیل به «موتور دیزل دوگانه سوز» شد.



شکل ۲- شماتیک تجهیزات مورد استفاده در تست موتور

تجهیزاتی که برای اندازه گیری و ثبت اطلاعات پارامترهای عملکردی و غلظت انتشار آلاینده ها در آزمون موتور دیزل خالص (با سوخت بیودیزل و گازوئیل) و موتور دیزل دوگانه سوز (با سوختهای بیودیزل و بیوگاز و همچنین با سوختهای گازوئیل و گاز طبیعی) مورد استفاده قرار گرفتند، عبارتند از: ۱) دینامومتر الکتریکی مدل TE-9 ساخت کارخانه Plint & Partners برای اندازه گیری قدرت خروجی ترمزی موتور، ۲) زاویه سنج از نوع Gaebbridge مدل 45HD و با قابلیت تشخیص نقطه TDC برای



انجمن احتراق ایران

FCCI2010-3114

## سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
دانشکده مهندسی هوافضا

اندازه‌گیری زاویه میل‌لنگ، ۳) مبدل فشار از نوع پیژوالکتریک با کریستال‌های کوارتز مدل Kistler-6123 برای اندازه‌گیری فشار داخل سیلندر، ۴) تقویت کننده مدل Kistler-5041b برای تقویت سیگنال خروجی سنسور پیژوالکتریک، ۵) اسیلوسکوپ برای تنظیم و نمایش داده‌های آنالوگ، ۶) مبدل انتقال داده‌ها (ADC) برای تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال (۷) سیستم جمع‌آوری اطلاعات به همراه یک کامپیوتر PC برای نمایش، رکوردگیری داده‌ها، ۸) ترموکوپل نوع J برای اندازه‌گیری دمای سوخت‌گازی و هوای منیفولد ورودی، ۹) ترموکوپل نوع K برای اندازه‌گیری دمای خروجی آگزوز، 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) آلایندگی‌سنج نوع کاسنس (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) آلایندگی‌سنج نوع سیگنال مدل VM 4000 برای اندازه‌گیری غلظت اکسیدهای ازت (NO, NO<sub>2</sub>)، ۱۵) دبی‌سنج سوخت‌گازی از نوع فلومتر مدل G4 برای اندازه‌گیری دبی سوخت‌گازی، 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 و ۱۸) ترکیب‌کننده سوخت و هوا (Mixer) برای اختلاط سوخت‌گازی و هوا.

### ۶-۲- شرایط و روش انجام آزمون موتور

در تمام آزمایش‌ها، از سوخت‌گازی بیوگاز به عنوان 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 به عنوان سوخت آتش‌زا تامین می‌کرد. همچنین برای مقایسه سوخت‌گازی طبیعی و گازوئیل نیز مطابق با روش فوق‌الذکر مورد آزمون قرار گرفت. آزمون‌ها برای هر یک از موارد تست ۳ بار تکرار شد. در هر یک از آزمون‌ها، ابتدا موتور بصورت دیزل خالص و فقط با سوخت مایع گازوئیل (یا بیودیزل)، تحت بار ۸۲/۹٪ بار نهایی دینامومتر (بار کاری موتور که قبل از رسیدن موتور به حد دود، با دینامومتر قابل تنظیم است) قرار گرفت. با معلوم بودن میزان بار دینامومتر و سرعت دورانی آن، توان تولید شده موتور محاسبه شده و سپس، آهنگ مصرف سوخت مایع به کمک شانه سوخت تا جایی کاهش پیدا کرد که توان ترمزی تولید شده، به ۱۰٪ توان تولید شده در حالت قبل رسید. باید یادآور شد که بار اعمال شده در تمامی حالتها، همواره ثابت بوده ولی با کاهش مقدار سوخت مصرفی، دور موتور افت پیدا می‌کرد که این امر موجب به افت توان می‌گردید. در نهایت، برای جبران ۹۰٪ افت توان از حالت دیزل خالص، سوخت‌گازی طبیعی (یا بیوگاز) وارد موتور می‌شد تا دوباره موتور با همان دور قبلی کار کرده و در نتیجه همان توان موجود در حالت دیزل خالص، حاصل می‌گردید. بدیهی است که در این حالت، ۹۰٪ توان کل از طریق سوخت‌گازی و ۱۰٪ آن از طریق سوخت آتش‌زا تامین می‌شد. در هر یک از مراحل آزمون، پس از تنظیم شانه سوخت‌رسانی، موتور بمدت ۵ دقیقه در حالت ثابت با هر یک از مخلوط‌های سوخت مایع آتش‌زا، کار می‌کرد 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.

### ۳- بحث و نتایج

#### ۱-۳- مشخصات سوخت بیوگاز و بیودیزل تولید شده

نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص سوخت بیوگاز و بیودیزل که بر اساس استاندارد ASTM انجام گرفت حاکی از این واقعیت است که: ترکیبات بیوگاز شدیداً وابسته به نوع خوراک اولیه می‌باشد و شامل ۵۰ تا ۷۰ درصد متان، ۳۰ تا ۴۰ درصد دی‌اکسیدکربن و ۵ تا ۱۰ درصد هیدروژن است، به دلیل وجود دی‌اکسیدکربن در سوخت بیوگاز، عموماً ارزش حرارتی آن نسبت به سوخت‌گازی 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٪)، پروپان (۱٪ تا ۲٪) و بوتان نیز می‌باشد. به علاوه، سوخت بیودیزل دارای وزن

مخصوص و چگالی، بیشتری نسبت به گازوئیل می باشد که موجب پاشش نامطلوب سوخت می شود. ویسکوزیته سینماتیک بیودیزل نیز بیشتر از گازوئیل است و این عامل محدوده کننده ای در کارکرد مناسب پمپ انژکتور می باشد و ممکن است در سیستم سوخت رسانی فشارهای فوق العاده زیادی را بوجود آورد. تاثیر دیگر ویسکوزیته زیاد، بر کیفیت اتمایزه شدن سوخت در هنگام پاشش انژکتور است، به طوریکه انژکتورها دیگر قادر به عمل پودرکردن سوخت برای تبخیر و احتراق مناسب نخواهند بود. ارزش حرارتی 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 می شود. شاخص ستان بیودیزل بیشتر از سوخت گازوئیل است و می توان نتیجه گرفت که کیفیت احتراق بیودیزل بهتر از گازوئیل می باشد. میزان کربن موجود در ساختار اتمی بیودیزل کمتر از گازوئیل بوده و در نتیجه مقدار خاکستر آن نیز کمتر است که باعث افزایش طول عمر سیستم احتراق می شود، زیرا خاکستر حاوی رسوبات معدنی و اکسیدهای فلزی حل شده در سوخت است که مقدار زیاد آن در سوخت های مایع باعث فرسودگی قسمت های متحرک را فراهم می سازد.

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

بیوگاز [۲]	گاز طبیعی [۸]	بیودیزل	گازوئیل	خصوصیت	
				جرمی	ارزش حرارتی 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)		ویسکوزیته 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 تشکیل دهنده
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 نرمال)

### ۲-۳ - تاثیر سوخت های بیولوژیک (بیودیزل و بیوگاز) بر پارامترهای عملکرد موتور

آزمونهای تجربی حاکی از این واقعیت است که در صورت استفاده از سوخت های گازی، گشتاور و توان ترمزی موتور نسبت به موتور دیزل خالص، افت می کند (جدول ۴) که دلیل آن، چگالی کم سوخت های گازی و جایگزینی آن به جای قسمتی از هوای ورودی به داخل سیلندر و به تبع آن کاهش بازده تنفسی موتور می باشد. اگرچه چگالی سوخت بیوگاز (۱/۱۶ kg/m<sup>3</sup>) نسبت به چگالی گاز طبیعی (۰/۸۰۹ kg/m<sup>3</sup>) در حدود ۴۳ درصد بیشتر است که موجب افزایش بازده تنفسی موتور می شود ولی ارزش حرارتی بیوگاز در واحد حجم (۲۳/۴۳ MJ/m<sup>3</sup>) در حدود ۶۰ درصد کمتر از ارزش حرارتی گاز طبیعی (۳۹/۱۵ MJ/m<sup>3</sup>) می باشد، در نتیجه با مصرف یک مقدار مشخصی از دو سوخت (مصرف حجمی)، توان حرارتی معادل سوخت گاز طبیعی بیشتر می باشد. توان ترمزی موتور در حالت موتور دوگانه سوز بیولوژیک (۱۰٪ بیودیزل به عنوان سوخت آتشزا و ۹۰٪ بیوگاز به عنوان سوخت اصلی) نسبت به حالت موتور دوگانه سوز متعارف (۱۰٪ گازوئیل به عنوان سوخت آتشزا و ۹۰٪ گاز طبیعی به عنوان سوخت اصلی) به اندازه ۵/۸ درصد کاهش می یابد. با توجه به نتایج تجربی، با استفاده از سوخت بیوگاز، مصرف ویژه سوخت گازی در موتور افزایش می یابد (جدول ۴) که دلیل آن پایین بودن انرژی واحد جرم بیوگاز نسبت به گاز طبیعی و پایین بودن سرعت انتشار بیوگاز، نسبت گاز طبیعی می باشد. سرعت انتشار بیوگاز در شرایط هوای نرمال، ۳۵ درصد کمتر از گاز طبیعی می باشد که موجب کاهش راندمان ترمزی حرارتی موتور شده و به تبع آن موجب افزایش مصرف سوخت ویژه می شود. از طرف دیگر ارزش حرارتی واحد جرم سوخت بیودیزل (۳۹/۱ MJ/m<sup>3</sup>) به عنوان سوخت آتشزا کمتر از ارزش





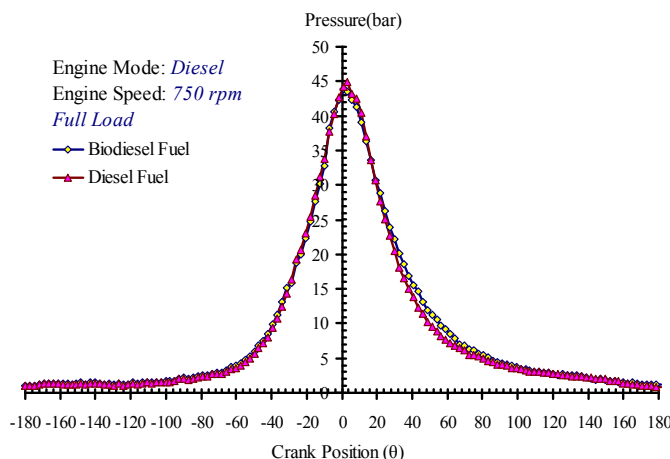
حرارتی گازوئیل ( $42/57 \text{ MJ/m}^3$ ) می‌باشد ولی در عوض چگالی سوخت بیودیزل ( $0/878 \text{ kg/Lit}$ ) بیشتر از چگالی گازوئیل ( $0/839 \text{ kg/Lit}$ ) است که تا حدودی پایین بودن ارزش حرارتی آن را جبران می‌کند. بدلیل این که مقدار پاشش سوخت به محفظه احتراق بصورت حجمی انجام می‌گیرد و در دور و بار ثابت موتور (دور  $750 \text{ rpm}$  و بار کامل)، شانه سوخت‌رسانی بطور کامل باز بوده و لذا مقدار حجم سوخت پمپاژ شده توسط پمپ انژکتور ثابت می‌باشد. در نتیجه، ارزش حرارتی واحد حجم بیودیزل ( $34/3 \text{ MJ/Lit}$ ) نسبت به گازوئیل ( $35/72 \text{ MJ/Lit}$ ) در حدود ۴ درصد کمتر است. نتایج تجربی نیز حاکی از تاثیر کم سوخت بیودیزل به عنوان سوخت آتشنا، بر احتراق سوخت بیوگاز دارد. فلذا مصرفی ویژه ترمزی در حالت دیزل دوگانه‌سوز برای دو سوخت بیودیزل و گازوئیل، تفاوت چندانی ندارد (جدول ۴). سوخت بیودیزل بدلیل داشتن عدد ستان بالا (۶۲) نسبت به گازوئیل (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) بطور کامل محترق نشده موجب افت فشار و دمای داخل محفظه احتراق می‌شود. مضاف بر آن، قابلیت اتمیزاسیون سوخت بیودیزل به دلیل بالا بودن ویسکوزیته آن ( $6/482 \text{ Cst}$ ) نسبت به گازوئیل ( $3/09 \text{ Cst}$ ) کمتر بوده و همچنین سرعت انتشار سوخت بیوگاز ( $\text{Cm/s}$ ) ۳۰-۲۵) کمتر از گاز طبیعی (۳۷-۴۵  $\text{Cm/s}$ ) می‌باشد که موجب تشدید این پدیده (احتراق ناقص) می‌شوند (جدول ۴).

جدول ۴- تاثیر سوخت بیودیزل و بیوگاز بر پارامترهای عملکرد موتور دیزل خالص و دیزل دوگانه‌سوز

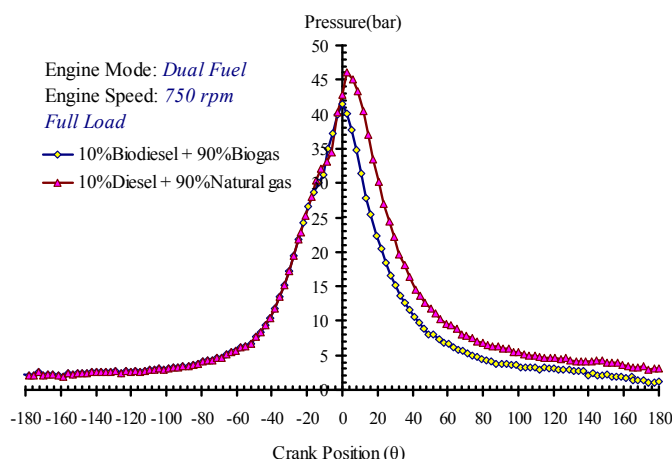
مشخصه	واحد	موتور دیزل خالص		موتور دیزل دوگانه‌سوز	
		۱۰۰٪ گازوئیل	۱۰۰٪ بیودیزل	۱۰٪ بیودیزل و ۹۰٪ گاز طبیعی	۱۰٪ بیودیزل و ۹۰٪ بیوگاز
توان ترمزی موتور	Kw	۴/۲۵	۴/۰۸	۳/۹۱	۳/۶۸
راندمان حرارتی ترمزی	%	۲۶	۲۷	۲۵	۲۳
حداکثر فشار	bar	۴۵/۲	۴۳/۸	۴۶/۱	۴۱/۵
دمای خروجی اگزوز	°C	۳۴۴	۳۱۹	۲۷۵	۲۵۵
مصرف ویژه سوخت مایع	gr/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

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 (Premixed) با استفاده از سوخت بیودیزل کوتاه‌تر می‌شود و قسمت عمده سوخت در یک دوره طولانی‌تری محترق می‌شود، در این دوره کنترل احتراق توسط فرآیند احتراق نفوذی (Diffusion) صورت می‌گیرد. تغییرات فشار داخل محفظه احتراق را در دو حالت دیزل خالص (با سوخت بیودیزل و سوخت گازوئیل) و حالت دیزل دوگانه‌سوز (با سوختهای بیوگاز و بیودیزل و سوختهای گاز طبیعی و گازوئیل) در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، در حالت موتور دیزل خالص، حداکثر مقدار فشار برای سوخت گازوئیل ( $45/2 \text{ bar}$ ) بالاتر از سوخت بیودیزل ( $43/8 \text{ bar}$ ) است، زیرا طول دوره تاخیر در احتراق سوخت بیودیزل کمتر از سوخت گازوئیل بوده و به تبع آن حداکثر مقدار نرخ آزادسازی انرژی حرارتی بیودیزل نیز کمتر از سوخت گازوئیل می‌باشد.

در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز، از طرفی استفاده از سوخت بیودیل به عنوان 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، ولی پایین بودن ارزش حرارتی سوخت بیوگاز در واحد حجم موجب کاهش مقدار نرخ آزادسازی انرژی حرارتی شده و در نتیجه حداکثر مقدار فشار برای سوخت بیودیزل و بیوگاز ( $41/5 \text{ bar}$ ) بسیار کمتر از سوخت گازوئیل و گاز طبیعی ( $46/1 \text{ bar}$ ) می‌باشد. لازم به ذکر است که عامل انتشار سریع شعله در سوخت بیوگاز موجب بروز پدیده کوبش در شرایط بار بیش از حد، نسبت به حالت استفاده از گاز طبیعی می‌شود.



شکل ۳- منحنی (P-θ) برای موتور دیزل خالص با سوخت بیودیزل و گازوئیل



شکل ۴- منحنی (P-θ) برای موتور دیزل دوگانه‌سوز با سوخت‌های بیولوژیک (بیودیزل و بیوگاز) و سوخت‌های فسیلی (گازوئیل و گاز طبیعی)

### ۳-۳- تاثیر 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 می‌باشد، بنابراین مقدار جرم کمتری در طول دوره احتراق پیش‌آمیخته محترق شده و حداکثر مقدار نرخ احتراق پایین‌تری نسبت به سوخت گازوئیل 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 دمای بالاتری تولید می‌شود (فشار بالا موجب دمای بالا می‌شود). فلذا استفاده از سوخت بیودیزل موجب کاهش آلاینده NOx تا ۱۸ درصد نسبت به استفاده از سوخت گازوئیل می‌شود. در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز، در صورت استفاده از سوخت‌های فسیلی گازوئیل و گاز طبیعی، نرخ آزادسازی انرژی در دوره احتراق پیش‌آمیخته بیشتر از حالت موتور دیزل خالص می‌باشد و در نتیجه حداکثر مقدار فشار داخل محفظه احتراق بالاتر از حالت موتور دیزل خالص بوده و موجب بالا بودن آلاینده NOx می‌شود، فلذا در در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز با سوخت‌های فسیلی گازوئیل 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. نتایج آزمونها نشان داد که در صورت استفاده از سوخت بیودیزل به جای گازوئیل در موتور دیزل خالص، مقدار انتشار آلاینده CO و CO<sub>2</sub> بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به گازوئیل کاهش می‌یابد، زیرا به ازای واحد جرم مشخصی، مقدار کربن موجود در سوخت بیودیزل کمتر از گازوئیل است و مضاف بر آن سوخت بیودیزل حاوی ۱۰ تا ۱۲ درصد اکسیژن در ساختار مولکولی خود می‌باشد که موجب سریعتر بودن دوره احتراق نفوذی نسبت به استفاده از سوخت گازوئیل می‌باشد، این پدیده باعث احتراق کامل سوخت و افزایش راندمان حرارتی می‌شود و در نتیجه مقدار ذرات کربن‌دار تولید شده 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 بدلیل وجود ۳۰ درصد گاز CO<sub>2</sub> در سوخت بیوگاز مقدار آلاینده CO و CO<sub>2</sub> بیشتری را دارد. کاهش ۷۵ درصد، انتشار هیدروکربنهای نسوخته (UHC) با استفاده از سوخت بیودیزل در حالت دیزل خالص، یکی از نتایج مهم آزمونهای تجربی می‌باشد، زیرا وجود اکسیژن در ساختار شیمیایی سوخت بیودیزل موجب احتراق کامل سوخت در دوره احتراق نفوذی و افزایش راندمان می‌شود و در نتیجه هیدروکربنهای موجود در سوخت تا حد بالایی اکسید می‌شوند. همچنین، نتایج از آزمون نشان داد که در حالت دیزل دوگانه‌سوز متعارف، با استفاده از سوختهای گازوئیل و گاز طبیعی مقدار انتشار هیدروکربنهای نسوخته تا ۳۳ درصد نسبت به حالت دیزل خالص با سوخت گازوئیل کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش دمای محفظه احتراق (در اثر افزایش فشار) است که موجب می‌شود تا در هنگام رسیدن شعله به دیواره سیلندر، دیرتر خاموشی 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.

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

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

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از این واقعیت است که استفاده همزمان از سوخت‌های بیولوژیک بیودیزل و بیوگاز در موتور دوگانه‌سوز امکانپذیر بوده ولی موجب افت توان موتور می‌شود. توان ترمزی موتور در حالت دوگانه‌سوز بیولوژیک (۱۰٪ بیودیزل به عنوان سوخت آتش‌زا و ۹۰٪ بیوگاز به عنوان سوخت اصلی) نسبت به حالت دوگانه‌سوز متعارف (۱۰٪ گازوئیل به عنوان سوخت آتش‌زا و ۹۰٪ گاز طبیعی به عنوان سوخت اصلی) به اندازه ۵/۸ درصد کمتر است، زیرا به دلیل وجود ۳۰ درصد CO<sub>2</sub> در سوخت بیوگاز، ارزش حرارتی آن در حدود ۶۰ درصد کمتر از ارزش حرارتی گاز طبیعی می‌باشد و در نتیجه با مصرف یک مقدار حجم مشخصی از هر دو سوخت، توان حرارتی معادل سوخت گاز طبیعی بیشتر می‌باشد. از طرف دیگر ارزش حرارتی واحد جرم سوخت بیودیزل به عنوان سوخت آتش‌زا کمتر از ارزش حرارتی گازوئیل می‌باشد ولی در عوض چگالی سوخت بیودیزل بیشتر از چگالی گازوئیل است که تا حدودی پایین بودن ارزش حرارتی آن را جبران می‌کند. نتایج تجربی حاکی از تاثیر کم سوخت بیودیزل به عنوان سوخت آتش‌زا، بر احتراق سوخت بیوگاز دارد، فلذا مصرف ویژه ترمزی سوخت بیودیزل و گازوئیل در حالت دیزل دوگانه‌سوز تفاوت چندانی ندارد. همچنین در حالت موتور دیزل خالص، استفاده از سوخت بیودیزل موجب کاهش آلاینده NOx تا ۱۸ درصد نسبت به استفاده از سوخت گازوئیل می‌شود ولی در حالت موتور دیزل

دوگانه‌سوز با سوخته‌های فسیلی گازوئیل و گاز طبیعی، بیشترین مقدار انتشار آلاینده NOx را داریم. ولی جالب توجه این است که در حالت موتور دیزل دوگانه‌سوز، با استفاده از سوخته‌های بیولوژیک بیودیزل و بیوگاز، مقدار آلاینده NOx کمترین مقدار را دارد، این پدیده می‌تواند رهیافتی جدید برای کاهش آلاینده NOx در موتورهای دوگانه‌سوز باشد. استفاده از سوخت بیودیزل به جای گازوئیل در موتور دیزل خالص، مقدار انتشار آلاینده CO و CO<sub>2</sub> تا ۱۰ درصد نسبت به گازوئیل کاهش می‌دهد و در حالت دیزل دوگانه‌سوز، در صورت استفاده از بیودیزل و بیوگاز، با اینکه سوخت بیودیزل موجب کاهش آلاینده CO و CO<sub>2</sub> می‌شود ولی بدلیل وجود ۳۰ درصد گاز CO<sub>2</sub> در سوخت بیوگاز، مقدار انتشار آلاینده‌های CO و CO<sub>2</sub> بیشترین مقدار را دارد. کاهش ۷۵ درصد، انتشار هیدروکربنهای نسوخته (UHC) با استفاده از سوخت بیودیزل در حالت دیزل خالص، یکی از نتایج مهم آزمایش‌های تجربی می‌باشد، 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.

سوخته‌های بیودیزل و بیوگاز، از مواد اولیه آلی و طبیعی استحصال می‌شوند، بنابراین سوختی تجدیدپذیر می‌باشند. در تولید این سوخته‌ها عموماً از ضایعات کشاورزی یا حیوانی استفاده می‌شود لذا سوختی ارزان قیمت می‌باشد 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 می‌شود بلکه انرژی ارزانی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد و به عنوان یک تکنولوژی پایدار، می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت موتورهای احتراق داخلی مطرح گردد.

## مراجع

- 1- Gebert, K. , Beck, N.J. , Barkhimer R.L. and Wong, H.C., "Strategies to improve combustion and emission characteristics of dual-fuel pilot ignited natural gas engines", SAE Paper No.971712, 1997
- 2- Henham, A. , and Makkar, M.K., "Combustion of simulated biogas in a dual fuel diesel engine", Energy conversion & management, Vol. 39, pp. 2001-2009, 1998.
- 3- Karim, G.A. , Klat, S.R. and Moor, N.P.W., "Knock in dual fuel engine", Prec. Instn. Mech. Engrs. , Vol.181, pp.453-466, 1967.
- 4- Kusaka, J , Okamoto, T. , Daisho, Y. , Kihara, R. and Saito, T., "Combustion and exhaust gas emission characteristics of a diesel engine dual fueled with natural gas", JSAE, Vol. 21, pp. 489-496, 2000.
- 5- Lee, C.S. , Hyung, L.K. and Kim, D.S., "Experimental and numerical study on the combustion characteristics of partially premixed charge compression ignition engine with dual fuel", Fuel, Vol.82, pp.553-560, 2003.
- 6- Meher, L.C. , Vidya, D. and Naik, S.N., "Technical aspects of biodiesel production by transesterification- a review", Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol.10 , pp. 248-268, 2006
- 7- Nwafor, O.M.I., "Effect of advanced injection timing on the performance of natural gas in diesel engines", Vol.25, pp.14 20, 2000.
- 8- Nwafor, O.M.I., "Effect of choice of pilot fuel on the performance of natural gas in diesel engines", Renewable Energy, Vol. 21, pp 495-504, 2000.
- 9- Nwafor, O.M.I., "Combustion characteristics of dual\_fuel diesel engine using pilot injection", IE (I) Journal-Mc, Vol. 84, pp. 22-25 2003.
- 10- Papagiannakis, R.G. and Hountalas, D.T., "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, pp. 353-365, 2003.
- 11- Selim, M.Y.E., "Pressure time characteristics in diesel engine fueled with natural gas", Energy Conversion & Management, Vol. 22, pp 473-489, 2001.
- 12- Najafi B., Piruzpanah V., and Ghobadian B., "Experimental Investigation of Performance and Emission Parameters of a Small Diesel Engine Using CNG Biodiesel", SAE Paper No. 2007-32-0075, 2007.