

تأثیر بیودیزل تولیدشده از میکروجلبک بر متغیرهای عملکرد و آلاینده‌گی یک موتور دیزل پاشش غیرمستقیم

بهمن نجفی^{۱*}، مهدی ترکیان^{۱**}، محمدامین حجازی^{۲***} و امیرعلی زمزمیان^{۳****}

۱- دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی

۲- پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی شمال غرب و غرب کشور

۳- پژوهشگاه مواد و انرژی

(دریافت: ۱۳۹۰/۲/۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۰/۱۰/۱، پذیرش: ۹۰/۱۱/۱۳)

میکروجلبک‌ها، با قابلیت رشد سریع و تولید حجم بالای روغن، می‌توانند به عنوان منبعی جدید برای بیودیزل مطرح باشند. در این تحقیق، از میکروجلبک کلرلا ولگاریس برای تولید بیودیزل استفاده شد. بیودیزل تولیدشده با درصد‌های حجمی مختلف (۲، ۵ و ۸ درصد) به گازوییل اضافه شد و در موتور دیزل M8/1 استفاده شد. موتور دیزل در سه بار مختلف (۸۲/۹، ۸/۶ و ۱۰۰ درصد) و دور ثابت ۷۵۰ rpm، بر اساس استاندارد ECE R-96، مورد آزمون قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که استفاده مخلوط‌های سوخت بیودیزل B2، B5 و B8 تأثیر محسوسی بر توان ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی ندارد. با استفاده از سوخت B8 در بارهای مختلف ۸/۶، ۸۲/۹ و ۱۰۰ درصد بار نهایی دینامومتر، انتشار منوکسیدکربن به ترتیب ۴۰، ۲۰ و ۱۸ درصد و انتشار هیدروکربن‌های نسوخته به ترتیب ۲۰، ۲۷/۲ و ۲۰ درصد کاهش پیدا می‌کنند، ولی انتشار اکسیدهای نیتروژن به میزان ۲۰، ۱۳/۷ و ۱۲/۵ درصد افزایش می‌یابد.

کلیدواژه: سوخت‌های جایگزین، بیودیزل، میکروجلبک، عملکرد، آلاینده‌گی، موتور دیزل

مقدمه

منابع انرژی زیستی از مدت‌ها قبل شناخته شده بود و بشر همواره از آن سود می‌جسته است، اما امروزه این انرژی‌ها به صورت‌های جدیدتری وارد عرصه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به بیودیزل اشاره کرد. بیودیزل استرهای اسید چرب است که از روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تولید شده و به عنوان سوخت در موتورهای دیزل قابل استفاده است. این سوخت بسیار شبیه به گازوییل متداول بوده و برای استفاده از آن نیازی به ایجاد تغییرات اساسی در موتور دیزل نیست [۱].

هنگام احتراق، بیودیزل آلودگی کمتری نسبت به گازوییل تولید می‌کند، لذا سوختی دوستدار محیط زیست به‌شمار می‌رود. برای تولید بیودیزل لازم است تا ساختار تری‌گلیسیریدهای موجود در روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی به اجزای ساده‌تری شکسته شوند. این کار به سه روش پیرولیز، میکروامولسیون و ترانس‌استریفیکاسیون انجام می‌شود. از بین این روش‌ها، روش ترانس‌استریفیکاسیون، به لحاظ سادگی و اقتصادی، کاربرد بیشتری دارد. بدین منظور مولکول‌های ترکیبات روغن یا چربی با یک الکل مانند متانول یا اتانول در حضور یک کاتالیزور اسیدی یا قلیایی شرکت کرده و در نتیجه استرهای با ساختمان مولکولی جدید به نام استرهای آلکیل اسید چرب به‌وجود می‌آید [۲].

روغن‌های گیاهی در زنجیره غذایی انسان قرار می‌گیرند و تولید بیودیزل از آن باعث افزایش قیمت روغن و ایجاد رقابت خواهد شد؛ لذا باید منابعی به عنوان منبع تولید بیودیزل مطرح شوند که باعث ایجاد رقابت نشوند، از جمله می‌توان به روغن

* استادیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: najafib@uma.ac.ir)

** کارشناسی ارشد (ایمیل: mhdorkian@yahoo.com)

*** استادیار (ایمیل: aminhejazi@abrii.ac.ir)

**** استادیار (ایمیل: azamzaman@merc.ac.ir)

میکروجلبک اشاره کرد. جلبک‌ها به عنوان یک منبع جدید تولید روغن و به تبع آن تولید بیودیزل بسیار مورد توجه‌اند. گونه‌ای از جلبک‌ها به نام میکروجلبک‌ها قادر به تولید روغن زیادند، به طوری که نوعی از این میکروجلبک‌ها قادرند تا ۷۰ درصد وزن خشک خود روغن تولید کنند [۳]. علاوه بر این، میکروجلبک‌ها قابلیت سازگاری با محیط‌های مختلف را دارند و در شرایط مختلف قادر به رشدند. فرمول شیمیایی کلی آن $O_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}$ است و برای پرورش آن نیاز به نور، آب، دی‌اکسیدکربن و مواد مغذی مانند آهن، فسفر و نیترات است که در آب تالاب‌ها به فراوانی یافت می‌شود [۴]. لذا، برای کشت میکروجلبک، نیازی به زمین کشاورزی نیست و می‌توان از مواد آلوده و فاضلاب برای تغذیه آن استفاده کرد. با این خصوصیات به نظر می‌رسد که میکروجلبک‌ها می‌توانند به عنوان منبع تولید بیودیزل در ایران مطرح شوند [۵].

عوامل متعددی در رشد میکروجلبک می‌تواند موثر باشد. اسیدیته محیط رشد در متابولیسم رشدی جلبک تاثیر دارد و باید در محدوده ۶/۷ باشد. دمای محیط کشت در تولید مواد ذخیره‌ای میکروجلبک به شدت تاثیر می‌گذارد؛ دمای مناسب برای رشد میکروجلبک $25^{\circ}C$ است [۵]. سرعت فتوسنتز ارتباط مستقیمی با شدت نور دارد. نور تا حد زیادی بر ترکیبات بیوشیمیایی میکروجلبک تاثیر می‌گذارد. مقدار اسیدهای چرب غیراشباع با شدت نور کاهش، ولی میزان رشد سلول افزایش می‌یابد. تقریباً ۵۰ درصد زیست‌توده (Biomass) میکروجلبک‌ها را کربن تشکیل می‌دهد، لذا کربن بیشترین ماده مورد مصرف در پرورش میکروجلبک کربن است. منبع معدنی کربن برای رشد میکروجلبک گاز دی‌اکسیدکربن است، ولی منابع آلی کربن مانند قندها نیز می‌تواند استفاده شوند. از دی‌اکسیدکربن تولیدشده از احتراق موتورهای دیزل و کارخانجات برای این کار می‌توان استفاده کرد. بعد از کربن، بیشترین عنصر تشکیل دهنده میکروجلبک نیتروژن است که می‌توان آن را به صورت کود اوره در اختیار جلبک قرار داد. با افزایش میزان نیتروژن در محیط کشت، رشد سلول افزایش می‌یابد، ولی میزان تولید چربی آن کاهش می‌یابد. فسفر در تمام فعالیت‌های سلول، از جمله در تولید لیپید و چربی، نقش حیاتی ایفا می‌کند. فسفر در طبیعت به میزان کم وجود دارد و به صورت کود به محیط کشت افزوده می‌شود. آهن نیز در ترکیبات بیوشیمیایی سلول نقشی مهم بازی می‌کند به طوری که کمبود آن فتوسنتز و تولید کلروفیل جلبک را دچار مشکل می‌کند. عناصر کم‌مصرف دیگر مانند کلسیم، سدیم، گوگرد و منیزیم نیز برای رشد و تولید میکروجلبک مورد نیازند. این مواد به میکرومغذی‌ها معروف‌اند و به صورت ترکیب با مواد اصلی به محیط کشت افزوده می‌شوند [۶].

مواد و روش‌ها

کشت و پرورش میکروجلبک

در این تحقیق از میکروجلبک سبز کلرلا ولگاریس (*Chlorella Vulgaris*) استفاده شد، زیرا این میکروجلبک بومی ایران است [۷] و تقریباً در هر آب‌وهوایی قابل کشت است و به راحتی و با سرعت زیاد رشد می‌کند. میزان روغن قابل استحصال از این نوع میکروجلبک ۲۸ تا ۳۲ درصد وزن خشک زیست‌توده است. با پرورش این نوع میکروجلبک در یک هکتار زمین زراعی می‌توان 7573 kg روغن برداشت کرد که ۲۰ برابر منابع گیاهی مرسوم است [۵].

محیط کشت مناسب برای پرورش این میکروجلبک از پنج محلول تشکیل شده است. مشخصات این پنج نوع محلول در جدول ۱ آورده شده است. برای تهیه یک لیتر محیط کشت، ۰/۱ درصد از محلول شماره دو و ۱ درصد از محلول شماره سه به محلول شماره یک اضافه شدند. آنگاه محلول به خوبی به هم زده شد تا یک محیط کشت یکنواخت حاصل شود. سپس pH محیط کشت (با استفاده از محلول سود ۲ نرمال) روی ۷ تنظیم شد و جهت استریل شدن در داخل دستگاه اتوکلاو به مدت ۳۰ دقیقه در دمای $120^{\circ}C$ قرار داده شد. برای ممانعت از رسوب آهن، محلول شماره چهار و پنج به صورت مجزا اتوکلاو شدند. محیط‌های کشت استریل شده به زیر هود منتقل شدند، سپس محلول استریل شماره ۴ و ۵ هر کدام به میزان ۰/۱ درصد به آن‌ها اضافه شد و pH محلول حاصل مجدداً تنظیم و بر روی ۷ قرار داده شد. البته این محلول برای تهیه محیط کشت به حجم یک لیتر است و برای محیط کشت با حجم بالا باید به تناسب از درصدهای ذکر شده استفاده شود.

جدول ۱- مشخصات پنج نوع محلول استفاده شده برای محیط کشت میکروجلبک کلرلا

محلول شماره یک	۶۰۰mg کلرید سدیم + ۴۰mg کلریدکلسیم + ۵۰mg سولفات منیزیم + ۱ لیتر آب مقطر
محلول شماره دو	۱۳/۶ gr فسفات دی هیدروژن پتاسیم + ۱ لیتر آب مقطر
محلول شماره سه	۱۰۱/۰۹۸ gr نیترات پتاسیم + ۱ لیتر آب مقطر (نیترات پتاسیم یک مولار)
محلول شماره چهار	۲۸۶ mg سولفات منگنز هیدراته (4H ₂ O) + ۳۲۰mg سولفات روی هیدراته (7H ₂ O) + ۱۸۳ mg سولفات مس هیدراته (5H ₂ O) + ۲/۱mg مولیبدات سدیم + ۲/۱mg کلریدکالت هیدراته (6H ₂ O) + ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر (مواد مغذی کمیاب)
محلول شماره پنج	۱۵۰mg از اسید استیک اتیل اندیامین تترا (EDTA)* سدیم + ۲/۵ gr سولفات آهن هیدراته (7H ₂ O) + ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر

* Ethylenediaminetetra Acetic Acid

برای کشت و تولید میکروجلبک کلرلا از یک دستگاه فتوبیوراکتور موجود در پژوهشکده بیوتکنولوژی غرب و شمال غرب کشور، استفاده شد (شکل ۱). این دستگاه فتوبیوراکتور شامل یک کانال روبسته بود که آب به کمک یک چرخ پدالی، که به یک الکتروموتور متصل شده بود، به گردش در می آمد. سرعت گردش چرخ پدالی ۱۷۰rpm بود که موجب ایجاد جریانی با سرعت ۱m/s می شد. نور مورد نیاز برای کشت از طریق تلفیق نور زرد معمولی و تعدادی لامپ فلورسنت مهیا می شد. نور با شدت ۲۳۰ (μ.mol.photon/m².s) به آن تابیده می شد. دستگاه مجهز به سیستم گرمایش و سرمایش خودکار بود که کنترل دما را به صورت اتوماتیک انجام می داد. دما در شرایط بهینه برای کشت میکروجلبک همواره در ۲۵ °C نگه داشته می شد. با تزریق گاز دی اکسیدکربن، اسیدیته محلول در حد ۶/۷ کنترل می شد. هوادهی در دو نقطه، یکی قبل از چرخ پدالی و دیگری بعد از چرخ پدالی، با شدت ۳ L/min صورت می گرفت. متوسط میزان مصرف دی اکسیدکربن برابر ۰/۵ لیتر در ثانیه بود.



شکل ۱- نمایی از فتوبیوراکتور استفاده شده در این تحقیق

مساحت سطح فتوبیوراکتور ۰/۶ m² است و تا ارتفاع ۱۵ cm پر می شود، لذا حجم محیط کشت میکروجلبک برابر ۹۰ لیتر است.

برای جبران تبخیر آب، همواره، به همان میزان، آب مقطر به سیستم اضافه می شد تا حجم آب فتوبیوراکتور ثابت بماند. برای کشت میکروجلبک در فتوبیوراکتور، ابتدا مقداری از آن تحت شرایط کنترل شده و بهینه کشت داده شد و بعد از آنکه به غلظت مناسب رسید به داخل فتوبیوراکتور انتقال یافت. این کشت اول مایه تلقیح گفته می شود که به عنوان بذر در دستگاه

فتویوراکتور محسوب می‌شود. برای این کار ابتدا سه محیط کشت یک لیتری کاملاً استریل شده آماده شد و سپس به هر یک از آن‌ها به میزان ۵۰ CC میکروجلبک زنده اضافه شد و این محیط‌ها به مدت دو هفته در اتاق فتوترون (Phototeron) در دمای ۲۵°C قرار داده شدند تا به غلظت مناسب برسند (شکل ۲).



شکل ۲- میکروجلبک کشت شده در ارلن به عنوان مایه تلقیح

به منظور تعیین میزان رشد میکروجلبک، از چگالی نوری محیط کشت استفاده شد. در هر ۲۴ ساعت، مقداری از محیط کشت فتویوراکتور در داخل دستگاه اسپکتروفوتومتر قرار داده می‌شد و چگالی نوری آن مشخص می‌شد. با افزایش غلظت محیط کشت میزان نور جذب شده بیشتر می‌شد. دوران رشد تاخیری میکروجلبک دو روز طول کشید و سپس رشد لگاریتمی آن شروع شد. با رشد میکروجلبک غلظت محیط کشت افزایش می‌یابد و به دلیل مصرف مواد غذایی و همچنین نفوذ نکردن نور به قسمت‌هایی پایینی، رشد آن‌ها متوقف شده و مرگومیر میکروجلبک‌ها شروع می‌شود و عملاً غلظت ثابت می‌ماند. در این زمان میکروجلبک‌ها برداشت می‌شود. به منظور جداسازی میکروجلبک، محیط کشت به مدت دو روز در حالت سکون قرار داده شد تا میکروجلبک رسوب کند. بدین ترتیب دو فاز کاملاً مشخص به وجود آمد. فاز بالایی، با رنگ سبز روشن، محیط کشت بود و فاز پایین، با رنگ سبز تیره، مربوط به میکروجلبک می‌شد. فاز رویی به کمک پمپ مکشی از قسمت زیری جدا شد و بدین ترتیب ۱۰ لیتر میکروجلبک (به همراه آب) به دست آمد. از دستگاه سانتریفوژ (مدل Allegra X-22r) با دور ۴۰۰۰ rpm برای جداسازی زیست توده میکروجلبک استفاده شد. بعد از سانتریفوژ کردن، میکروجلبک کلرلا در ته ظرف جمع شد. بدین ترتیب خمیر میکروجلبک کلرلا به دست آمد. در نهایت توده سلولی میکروجلبک در دستگاه فریزدرایر (مدل Savant Novalyphe NL lyophilizer) تحت خلا ۰/۱ mbar و در دمای ۴۰°C- به مدت ۱۲ ساعت خشک شد. بعد از اینکه زیست توده میکروجلبک از دستگاه خارج شد، به مدت ۳۰ دقیقه در داخل دستگاه دسیکاتور قرار داده شد تا با محیط هم‌دما شود.

رشد میکروجلبک به صورت لگاریتمی است و بیشترین رشد آن در روزهای چهارم تا هفتم اتفاق می‌افتد و بعد از آن رشد میکروجلبک، به دلیل بالا رفتن غلظت محیط کشت و عدم نفوذ نور، متوقف می‌شود. در یک هفته میزان میکروجلبک تولید شده بر اساس وزن خشک برابر ۴۵/۱ گرم به دست آمد. در این تحقیق، طول مدت پرورش میکروجلبک یک هفته بود و در طی دو ماه هشت مرتبه تولید انجام گرفت و ۳۶۰ گرم میکروجلبک خشک تولید شد.

تولید بیودیزل

برای تولید بیودیزل، ابتدا باید روغن میکروجلبک را خارج کرده و سپس به روش ترانس‌استریفیکاسیون روغن استخراج شده را به بیودیزل تبدیل کرد، اما در این تحقیق روغن میکروجلبک در داخل خودش متیل شده و سپس متیل استر اسید چرب (بیودیزل) از میکروجلبک استخراج شد. در این روش ابتکاری، عمل متیلاسیون در داخل زیست توده میکروجلبک صورت گرفت و در نتیجه مرحله روغن‌گیری حذف شد. از الکل متانول و کاتالیزور هیدروکسید سدیم استفاده شد. مراحل تولید بیودیزل بدین صورت بود که ابتدا مقدار ۱۰ gr گرم هیدرواکسید سدیم وزن شد و سپس به آرامی به ۱۰۰ cc متانول اضافه شد و برای انحلال

بهتر، محلول به آرامی گرم شد. میکروجلبک کلرلا دارای دیواره سلولی سختی است و استخراج متیل استر اسید چرب مشکل است. لذا، برای شکستن دیواره سلولزی آن، اندکی آب مقطر به میکروجلبک خشک اضافه شد تا خمیر میکروجلبک به دست آید. سپس خمیر به دست آمده در داخل دستگاه آلتراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه و در دمای 40°C قرار داده شد. بدین ترتیب دیواره سلولی میکروجلبک تخریب شد. سپس متوکسیدسدیم به آن اضافه شد تا یک سوسپانسیون به دست آید. برای تکمیل واکنش ترانس استریفیکاسیون، سوسپانسیون به دست آمده به مدت ۴ ساعت به هم زده شد. برای خارج کردن متیل استر اسید چرب، به آن حلال هگزان نرمال اضافه شد. بعد از افزودن هگزان به مخلوط، درب ظرف محکم بسته شد و برای اطمینان از تخریب سلولی، ظرف دوباره در داخل دستگاه آلتراسونیک قرار داده شد و دما بر روی 80°C درجه و فشار بر روی ۳ اتمسفر تنظیم شد. بعد از رسیدن فشار به ۳ اتمسفر، ظرف فشار به حمام آب سرد منتقل شد. سپس از اسید کلریدریک برای انجام عملیات خنثی سازی اثر هیدروکسیدسدیم استفاده شد و pH به ۷ رسانده شد. به منظور جداسازی بیودیزل تولیدشده، ابتدا مخلوط به مدت ۵ ساعت به حالت سکون قرار داده شد تا میکروجلبک و مواد جامد آن رسوب کند. به این ترتیب دو فاز کاملاً مشخص به وجود آمد؛ فاز مایع که در بالا قرار داشت بیودیزل و فاز پایینی گلیسرین و زیست توده میکروجلبک بود. بیودیزل تولیدشده به دلیل داشتن کلروفیل رنگ سبز تیره دارد. برای جدا کردن کلروفیل، از عمل فیلتراسیون با استفاده از ذغال اکتیو به میزان ۵ درصد وزنی استفاده شد. هگزان موجود در بیودیزل نیز با استفاده از دستگاه پمپ خلا (Rotary vacuum) به روش تبخیر در خلا از بیودیزل جدا شد. بیودیزل نهایی رنگی سبز مایل به زرد داشت. از ۳۶۰ گرم میکروجلبک خشک، در حدود ۷۰ گرم بیودیزل خالص به دست آمد (شکل ۳).



۳) رسوب میکروجلبک



۲) شکستن دیواره سلولی میکروجلبک



۱) افزودن متوکسیدسدیم



۶) بیودیزل تولیدشده نهایی



۵) جداسازی هگزان، آب و الکل از بیودیزل



۴) جداسازی بیودیزل تولیدشده

شکل ۳- مراحل تولید بیودیزل از میکروجلبک کلرلا ولگاریس

مخلوط سوخت بیودیزل و گازوییل

در این تحقیق، از بیودیزل میکروجلبک به عنوان یک افزودنی در موتور استفاده شد. به دلیل اینکه مقدار بیودیزل تولیدشده از میکروجلبک کم بود، بیودیزل در سه سطح ۲، ۵ و ۸ درصد حجمی با گازوییل مخلوط شد که با B2، B5 و B8 نمایش داده می شوند. آزمون اولیه موتور با سوخت گازوییل نشان داد که در سه بار $8/6$ ، $82/9$ و ۱۰۰ درصد، مصرف سوخت ویژه به ترتیب ۳۵۵، ۳۰۰ و 900 gr/kW.hr و توان تولیدشده ۴۹۰۰، ۳۶۰۰ و 400 W است؛ در نتیجه مصرف سوخت موتور به ترتیب ۱۷۴۰،

۱۰۸۰ و ۳۶۰ gr/hr به دست آمد. با توجه به استاندارد آزمون، هر نمونه سوخت فقط به مدت ۲ دقیقه آزمون می‌شود. لذا مقدار مورد نیاز هر نمونه سوخت (در سه بار ۸/۶، ۸۲/۹ و ۱۰۰ درصد) برابر مجموع ۵۸، ۳۶ و ۱۲۰ گرم یعنی ۲۱۴ گرم است. در نتیجه مقدار سوخت بیودیزل مورد نیاز برای سوخت B2، B5 و B8 به ترتیب برابر ۴/۲۸، ۱۰/۷ و ۱۷/۱۲ گرم است. در کل ۳۲/۱ گرم بیودیزل مورد نیاز است، در صورتی که در حدود ۷۰ گرم بیودیزل خالص تولید شده است. لذا این مقدار سوخت بیودیزل امکان تکرار آزمون را در دو یا سه تکرار می‌دهد. از سوخت گازوییل خالص نیز به عنوان سوخت شاهد استفاده شد.

تعیین خواص سوخت مخلوط

ترکیبات سوخت بیودیزل حاصل از میکروجلبک، با استفاده از دستگاه GC-MASS، بر اساس استاندارد ASTM D6586 اندازه‌گیری شد. برای هر نمونه از مخلوط سوخت، خواص فیزیکی شامل چگالی، گرانروی، نقطه ابری شدن و نقطه ریزش مطابق با استاندارد ASTM اندازه‌گیری شد و با گازوییل خالص مقایسه شد. چگالی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D4052 با استفاده از روش وزنی اندازه‌گیری شد. گرانروی نیز مطابق استاندارد ASTM D445 به کمک ویسکومتر موپین در دمای ۴۰°C اندازه‌گیری شد [۹۸]. ارزش حرارتی سوخت، مطابق استاندارد ASTM D240، به وسیله بمب کالریتر نوع Pars Paygeer مدل PM-52 اندازه‌گیری شد و عدد ستان، به روش خفانش هوای ورودی و با استفاده از موتور CFR ستان سنج موجود در گروه مکانیک دانشگاه تبریز، مطابق استاندارد ASTM-D613 اندازه‌گیری شد. موتور CFR موتوری تک‌سیلندر، پاشش غیرمستقیم IDI، چهار زمانه، قطر سیلندر ۹۵ mm، کورس پیستون ۱۲۰ mm، حجم سیلندر ۸۵۰ cc با نسبت تراکم ۱۷ است.

آزمون موتور

نمونه‌های مخلوط سوخت بیودیزل حاصل از میکروجلبک و گازوییل، بر روی موتور تک سیلندر لیستر با پاشش غیرمستقیم (IDI) از نوع M8/1 موجود در آزمایشگاه ماشین‌های حرارتی دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز، آزمایش شدند. آزمون‌ها بر اساس آزمایش کوتاه‌مدت موتور و بر مبنای استاندارد ECE R-96 انجام گرفت. این استاندارد به آزمون ۸ مود موتور نیز معروف است که در آن موتور در چهار بار (بدون بار، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد بار نهایی) و دو دور (دور حداکثر توان و دور حداکثر گشتاور) مورد آزمون قرار می‌گیرد. در این تحقیق، با توجه به این که تنها بارهای قابل کنترل با دینامومتر ۸/۶، ۸۲/۹ و ۱۰۰ درصد بار نهایی بود، که منطبق با شرایط بدون بار، بار حداکثر گشتاور و بار حداکثر توان است، از این سطوح بار استفاده شد. موتور مذکور از نوع موتور کشاورزی است و کاربرد آن بیشتر برای پمپاژ آب است، لذا فقط در یک دور ثابت ۷۵۰ rpm کار می‌کند.

جدول ۲- مشخصات فنی موتور مورد آزمون

مشخصه	مقدار	واحد	مشخصه	مقدار	واحد
تعداد سیلندر	۱	-	حجم سیلندر	۱/۵۰۶۶	L
نسبت تراکم	۱ : ۱۷/۵	-	حداکثر توان ترمزی	۵	kW
قطر پیستون	۱۱۴/۳	mm	مصرف سوخت ویژه	۳۰۲	gr/kW.h
کورس پیستون	۱۳۹/۷	mm			

تجهیزات آزمون موتور

در این تحقیق، از دینامومتر مغناطیسی مدل Plint TE9 برای اعمال بار استفاده شد. این دینامومتر دارای یک کلید برای اعمال بار است که فقط در سه وضعیت ۸/۶، ۸۲/۹ و ۱۰۰ درصد بار نهایی قابل تنظیم است. از آلایندسنج نوع Cussons مدل P8333 برای اندازه‌گیری CO و UHC با دقت ± 2 درصد و از آلایندسنج نوع سیگنال مدل VM4000 برای اندازه‌گیری آلایندسنگ‌های NO_x با دقت ± 10 ppm استفاده شد. دی‌سنج استفاده‌شده از نوع استوانه‌ای مدرج بود. از یک پیت نازک ۱ cc،

که در دو سر آن شیری متصل شده بود، برای اندازه‌گیری میزان سوخت مصرفی استفاده شد. بدین نحو که پیپت مدرج در مسیر سوخت به موتور قرار می‌گرفت و در حین کار موتور شیر بالایی بسته می‌شد و مدت زمان مصرف سوخت اندازه‌گیری می‌شد و سپس شیر بالایی باز می‌شد. به دلیل قطر باریک پیپت، دقت اندازه‌گیری مصرف سوخت در حدود 0.05 gr/sec است. دور موتور نیز با استفاده از یک تاکومتر نوع Gaebridge مدل 45HD اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری دمای هوا و گازهای خروجی اگزوز، به ترتیب از ترموکوپل نوع J و K با دقت ± 0.1 درجه استفاده شد.

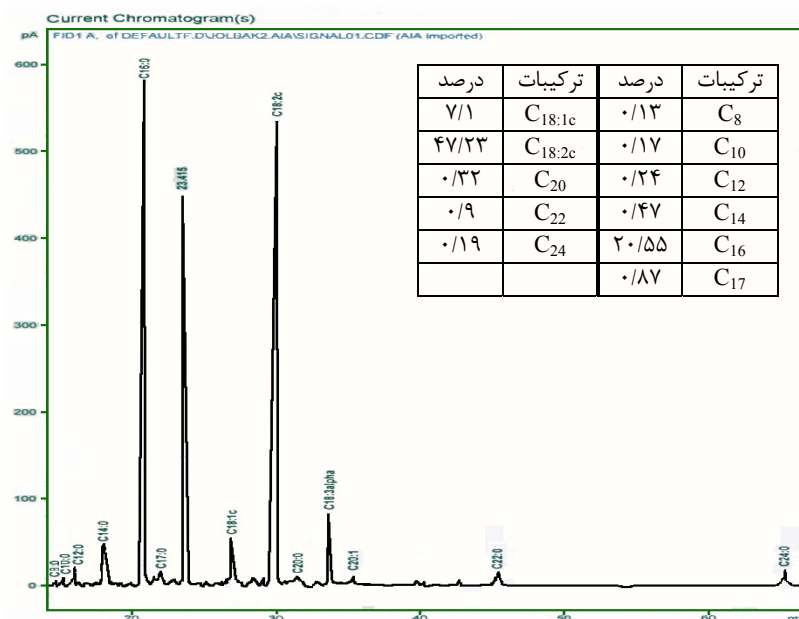
نحوه انجام آزمون موتور

ابتدا موتور با سوخت گازوییل روشن شده و به مدت ۱۵ دقیقه در شرایط تمام بار (۱۰۵ N-m) قرار داده شد تا کاملاً گرم شده و آماده انجام آزمایش شود. سپس موتور خاموش شده، سوخت گازوییل از باک تخلیه شده و مخلوط سوخت بیودیزل و گازوییل در آن ریخته شد و موتور مجدداً روشن شده و شروع به کار کرد. مقدار باری که باید به موتور اعمال شود بر حسب درصد بار نهایی تنظیم شده و موتور به مدت ۲ دقیقه در این حالت کار کرد تا به دور نهایی و پایدار (دور ثابت 750 rpm) برسد (به دلیل اینکه میزان سوخت بیودیزل تولیدشده از میکروجلبک بسیار کم بود، لذا آزمون موتور به صورت کوتاه‌مدت انجام گرفت). سپس تمام داده‌های مورد نظر به صورت دستی یادداشت شد. این کار برای هر یک از نمونه‌های مخلوط سوخت بیودیزل و گازوییل عیناً تکرار شد. جهت کنترل و به حداقل رساندن خطا، آزمایش‌ها در سه تکرار انجام گرفت و در هر تکرار متغیرهای توان حرارتی ترمزی، گشتاور، مصرف سوخت، دمای گازهای خروجی از اگزوز و آلایندگیهای CO ، NO_x و UHC اندازه‌گیری شد.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج آزمون کرماتوگرافی گازی

نتایج حاصل از آزمون GC-MASS نشان می‌دهد که در ترکیب بیودیزل حاصل از میکروجلبک، اسیدهای چرب لینولئیک ($\text{C}_{18:2}$)، پالماتیک (C_{16})، لینوسریک (C_{24}) و اولئیک ($\text{C}_{18:1}$) به ترتیب، با $47/33$ ، $20/55$ ، 19 و $7/1$ درصد، بیشترین سهم را دارند.

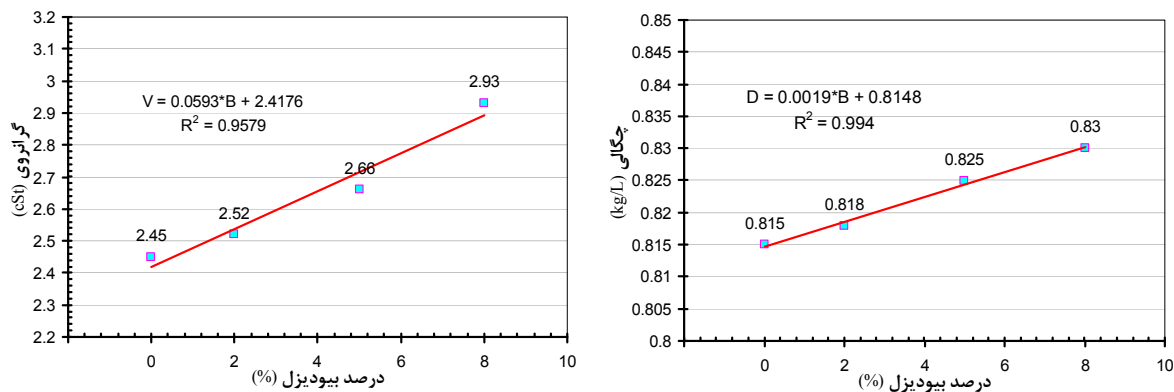


شکل ۴- نتایج آزمون GC-MASS ترکیبات اسید چرب موجود در بیودیزل میکروجلبک

با توجه به درصد اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل، فرمول کلی $C_{19}H_{36}O_2$ با جرم مولی ۲۹۶ gr/mol به دست می‌آید. تعداد هیدروژن‌های کمتر نسبت به کربن بیان‌کننده وجود پیوندهای دوگانه در استر تولیدی است. همچنین، این بیودیزل دارای ۱۰/۸ درصد اکسژن در ساختار خود است که بر فرآیند احتراق تاثیر می‌گذارد.

تاثیر بیودیزل حاصل از میکروجلبک بر گرانروی و چگالی

بیودیزل، در مقایسه با گازوییل، گرانروی بالایی دارد، زیرا زنجیره هیدروکربنی طولانی‌تری دارد. بیش از ۸۵ درصد بیودیزل حاصل از میکروجلبک دارای زنجیره هیدروکربنی طویل $C_{18:2}$ ، C_{16} ، C_{24} و $C_{18:1}$ است، در صورتی که زنجیره هیدروکربنی گازوییل متداول بین C_{10} تا C_{22} است. در این تحقیق، گرانروی بیودیزل حاصل از میکروجلبک ۶/۲۸ cSt به دست آمد. گرانروی بالای بیودیزل نسبت به گازوییل (۳/۰۹cSt) موجب افزایش مصرف انرژی پمپ انژکتور برای پاشش به داخل هوای متراکم می‌شود. همچنین، گرانروی بالای بیودیزل می‌تواند موجب نقص در پودرسازی (Atomization) سوخت شود و پودرشدن ناقص سوخت موجب افزایش تاخیر فیزیکی اشتعال می‌شود. در نتیجه بیشینه فشار و دما در مرحله احتراق در مقایسه با سوخت گازوییل افزایش می‌یابد، ولی از طرف دیگر بیودیزل دارای عدد ستان بالاتری است که موجب کاهش مدت زمان تاخیر در اشتعال و کاهش بیشینه فشار داخل سیلندر می‌شود. در عمل، بسته به مقدار این دو متغیر (گرانروی و عدد ستان)، ممکن است فشار داخل محفظه احتراق افزایش یا کاهش داشته باشد. چگالی نمونه‌های مخلوط سوخت رابطه مستقیمی با درصد بیودیزل موجود در آن دارد، لذا، با افزایش سهم بیودیزل در مخلوط سوخت، چگالی نیز افزایش پیدا می‌کند. بیودیزل در مقایسه با گازوییل از زنجیره‌های هیدروکربنی طولانی تشکیل شده است و در نتیجه چگالی بالایی دارد. در این تحقیق، چگالی بیودیزل حاصل از میکروجلبک ۰/۸۷۸ kg/L به دست آمد که در حد مجاز استاندارد ASTM D4052 است، محدوده مجاز برای چگالی بیودیزل ۰/۸۶-۰/۹ kg/L است.

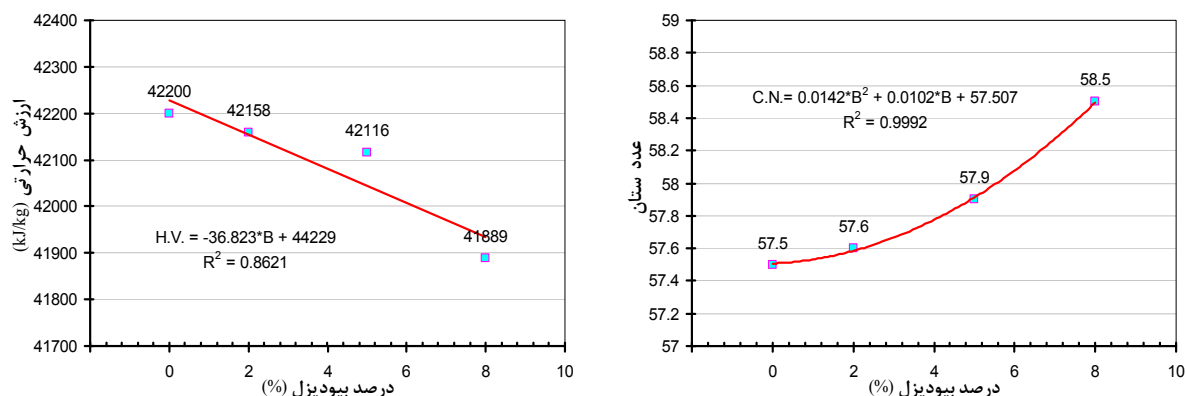


شکل ۵- تاثیر بیودیزل بر گرانروی سینماتیکی (در ۴۰°C) و چگالی (در ۱۵°C) مخلوط سوخت

تاثیر بیودیزل حاصل از میکروجلبک بر عدد ستان و ارزش حرارتی سوخت

مهم‌ترین مشخصه احتراقی مخلوط سوخت گازوییل و بیودیزل عددستان آن است. عدد ستان سوخت بیودیزل حاصل از میکروجلبک ۵۸/۴ است و با افزایش سهم بیودیزل در مخلوط سوخت عددستان افزایش می‌یابد. در نتیجه مدت زمان تاخیر در اشتعال کمتر می‌شود و میزان سوخت آماده‌شده برای احتراق پیش‌آمیخته کاهش می‌یابد؛ لذا بیشینه فشار داخل سیلندر کاهش یافته که به دنبال آن دمای گازهای سوخته اولیه نیز کاهش می‌یابد. این پدیده موجب می‌شود تا در مخلوط حاوی مقادیر بالای بیودیزل فشار در داخل محفظه احتراق، قبل از TDC، افزایش یافته و در نتیجه بیشینه فشار و دما کاهش یابد. شایان ذکر است که بالابودن عدد ستان سوخت بیودیزل می‌تواند در نتیجه محتویات اکسیژن سوخت بیودیزل باشد. وجود

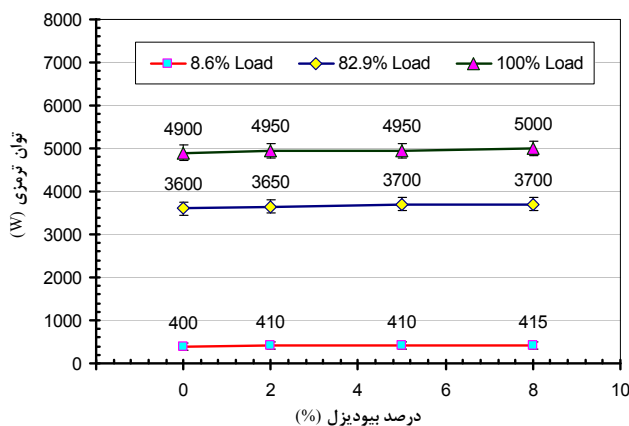
۱۰/۸ درصد اکسیژن در سوخت بیودیزل حاصل از میکروجلبک کاهش تاخیر شیمیایی اشتعال می‌شود، لذا احتراق سوخت سریع شروع شده و فشار داخل سیلندر افزایش می‌یابد [۱۰]. از طرف دیگر گرانی بالایی بیودیزل می‌تواند موجب افزایش تاخیر فیزیکی اشتعال و افزایش بیشینه فشار و دما در مرحله احتراق شود. بالا بودن چگالی این سوخت باعث کاهش تفاوت ارزش حرارتی آن در مقایسه با گازوییل در حجم معین می‌شود. ارزش حرارتی بیودیزل حاصل از میکروجلبک ۳۹۱۸۰ kJ/kg به دست آمد.



شکل ۶- تاثیر بیودیزل بر عدد ستان و ارزش حرارتی مخلوط سوخت

تاثیر بیودیزل حاصل از میکروجلبک بر توان ترمزی موتور

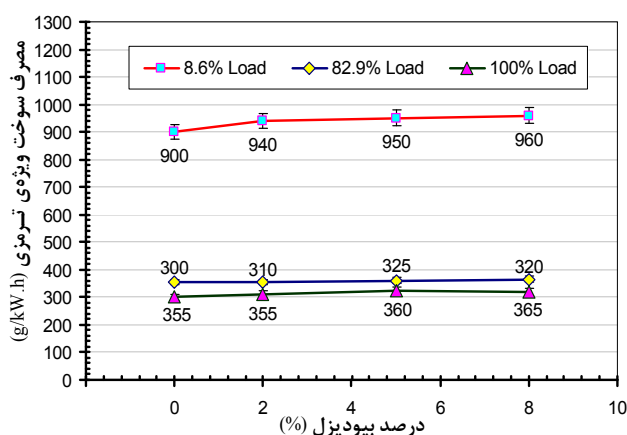
ارزش حرارتی بیودیزل نسبت به گازوییل کمتر است، ولی عدد ستان، چگالی و گرانی بالاتری دارد. وجود ۱۰/۸ درصد وزنی اکسیژن در سوخت بیودیزل و عدد ستان بالاتر آن (۵۸/۵) موجب می‌شود تا احتراق مخلوط سوخت با کیفیت بهتری انجام شود و برعکس گرانی بالایی بیودیزل (۶/۲۸ cSt) می‌تواند موجب کاهش کیفیت احتراق شود. چگالی بیشتر بیودیزل (۰/۸۷۸ kg/L) نسبت به سوخت گازوییل (۰/۸۳۹ kg/L) باعث می‌شود تا ارزش حرارتی پایین آن (۳۹۱۸۰ kJ/kg) تاثیر کمتری در توان حرارتی ترمزی داشته باشد. هر چند خصوصیات سوخت بیودیزل (ارزش حرارتی، محتوای اکسیژن، عدد ستان، چگالی و گرانی) تاثیر متناقضی بر بیشینه فشار و توان موتور دارد، ولی آزمایش‌های تجربی حاکی از این واقعیت است که افزودن ۲، ۵ و ۸ درصد سوخت بیودیزل حاصل از میکروجلبک به گازوییل متداول در ایران بر توان ترمزی موتور تاثیر معنی‌داری ندارد.



شکل ۷- تاثیر بیودیزل بر توان ترمزی موتور

تاثیر بیودیزل حاصل از میکروجلبک بر مصرف سوخت ویژه ترمزی

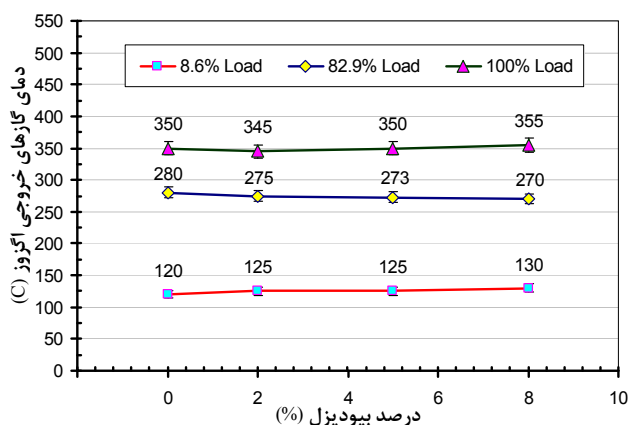
مصرف سوخت ویژه ترمزی رابطه مستقیم با چگالی سوخت و رابطه عکس با ارزش حرارتی سوخت دارد؛ یعنی با افزایش چگالی سوخت در صورتی که حجم معینی از سوخت سوزانده شود، مصرف سوخت ویژه افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش ارزش حرارتی سوخت، چون توان تولیدشده به ازای واحد حجم سوخت افزایش می‌یابد، لذا مصرف سوخت ویژه کاهش می‌یابد. بنابراین، سوختی که دارای چگالی کمتر و ارزش حرارتی بالاتری باشد، مصرف سوخت ویژه کمتری خواهد داشت. در ضمن میزان آزادشدن انرژی و کیفیت احتراق سوخت تاثیر بیشتری، نسبت به ارزش حرارتی و چگالی آن، بر مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی دارد؛ زیرا اگر سوختی با ارزش حرارتی بالا با کیفیت پایین‌تری محترق شود، تمام انرژی شیمیایی خود را آزاد نکرده و در نتیجه، جهت جبران افت توان ناشی از استفاده از چنین سوختی، الزاما باید مصرف سوخت را افزایش داد. هر چند بیودیزل نسبت به گازوییل دارای ارزش حرارتی پایین‌تری است، ولی در عوض چگالی بیشتری داشته و مهم‌تر از آن، به دلیل وجود ۱۰/۸ درصد اکسیژن در ساختار شیمیایی آن، کیفیت احتراق بهتری دارد و این دو عامل (چگالی بالا و کیفیت احتراق بهتر) تاثیر منفی ارزش حرارتی پایین سوخت را خنثی می‌کند. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نیز حاکی از این واقعیت است که استفاده از سوخت بیودیزل حاصل از میکروجلبک به مقدار کمتر از ۱۰ درصد حجمی، به صورت مخلوط با سوخت گازوییل، در تمام بارهای دینامومتر، تاثیر معنی‌داری بر مصرف سوخت ویژه ترمزی ندارد. مصرف سوخت ویژه ترمزی در شرایط بار جزئی (۸/۶ درصد بار نهایی) بیشتر از شرایط تمام‌بار (۱۰۰ درصد بار نهایی) است، زیرا در شرایط بار جزئی موتور با تولید توان کمتر، سوخت مصرف می‌کند که مطابق با ادبیات فن است.



شکل ۸- تاثیر بیودیزل بر مصرف سوخت ویژه ترمزی

تاثیر بیودیزل حاصل از میکروجلبک بر دمای گازهای خروجی

دمای گازهای خروجی از موتور با کیفیت احتراق سوخت رابطه مستقیم دارد. وجود بیودیزل در سوخت گازوییل تا حدی خواص فیزیکی آن را بهبود داده و باعث احتراق بهتر سوخت می‌شود. عدد ستان بالاتر سوخت بیودیزل، بر خلاف تاثیر گرانشی، موجب می‌شود مدت زمان تاخیر در اشتعال کاهش یابد. لذا، پس از پاشش سوخت به محفظه احتراق، میزان سوخت آماده‌شده برای احتراق پیش‌آمیخته مقدار کمتری خواهد داشت و در نتیجه بیشینه فشار داخل سیلندر و به دنبال آن دمای گازهای سوخته اولیه نیز کاهش می‌یابد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که، با استفاده از مقادیر کمتر از ۱۰ درصد حجمی بیودیزل، تاثیر عدد ستان و گرانشی بر تاخیر اشتعال اثر هم‌دیگر را خنثی می‌کند و برآیند تاثیر آن دو موجب می‌شود تغییر محسوسی در دمای خروجی آگزوز موتور مشاهده نشود.

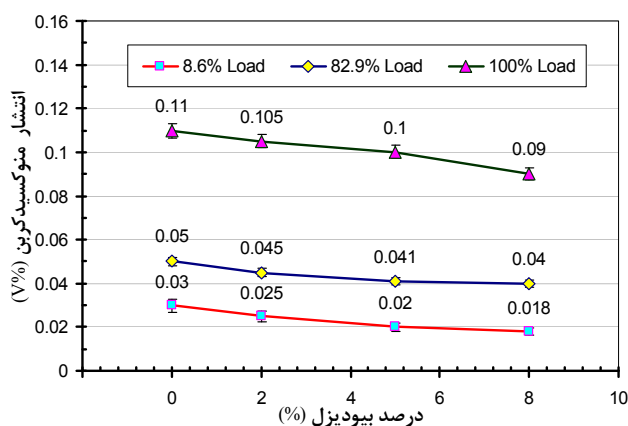


شکل ۹- تاثیر بیودیزل بر دمای گازهای خروجی از آگروز

تاثیر بیودیزل حاصل از میکروجلبک بر انتشار منوکسیدکربن

هر چه میزان اکسیژن در مرحله احتراق بیشتر باشد، مقدار تولید منوکسیدکربن نیز پایین خواهد آمد. بیودیزل حاوی ۱۰/۸ درصد اکسیژن در ساختمان مولکولی خود است که موجب می شود اکسیداسیون سوخت به طور کامل انجام شود و در نتیجه انتشار منوکسیدکربن کاهش می یابد. از طرف دیگر عدد ستان بالاتر بیودیزل موجب کوتاه تر شدن زمان تاخیر در اشتعال شیمیایی می شود و در نتیجه بیشینه فشار و دما در محفظه احتراق اندکی کاهش می یابد و به دنبال آن میزان منوکسیدکربن خروجی سیر نزولی پیدا می کند. در این تحقیق، با وجود اینکه مقدار کمی از بیودیزل به سوخت گازوییل افزوده شد، ولی میزان کاهش انتشار منواکسیدکربن کاملاً مشهود است، بیشترین کاهش منوکسیدکربن در مخلوط سوخت B8 مشاهده شد. در بارهای ۸/۶، ۸۲/۹ و ۱۰۰ درصد بار نهایی دینامومتر، انتشار منوکسیدکربن به ترتیب ۰.۴۰، ۲۰ و ۱۸ درصد، نسبت به گازوییل خالص، کاهش دارد. این امر نشان می دهد که در صورت افزودن بیودیزل به گازوییل، با حفظ توان موتور، انتشار منوکسیدکربن کاهش می یابد.

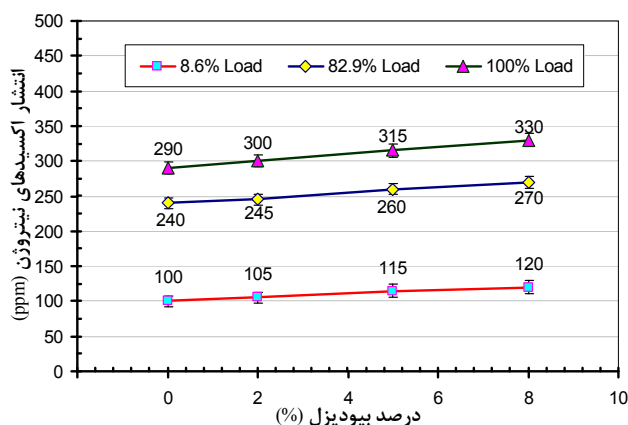
همچنین، با افزایش بار موتور، انتشار منوکسیدکربن افزایش می یابد، زیرا موتور در شرایط غنی کار می کند و برای تبدیل تمامی کربن موجود در سوخت به دی اکسیدکربن اکسیژن کافی در محفظه احتراق وجود ندارد. این پدیده مشخصه بارز تمام موتورهای احتراق داخلی است.



شکل ۱۰- تاثیر بیودیزل بر انتشار منوکسیدکربن

تأثیر بیودیزل حاصل از میکروجلبک بر انتشار اکسیدهای نیتروژن

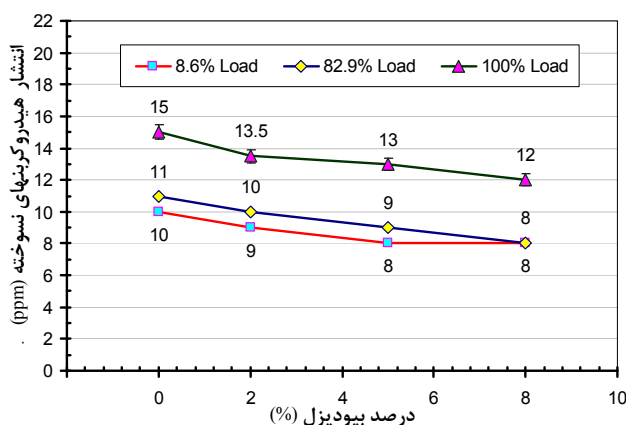
در دمای بالای محفظه احتراق، نیترات موجود در هوا با اکسیژن واکنش داده و تشکیل NO_x می‌دهد. لذا تشکیل اکسیدهای نیتروژن، با وجود اکسیژن و دمای بالای محفظه احتراق، افزایش می‌یابد. با افزایش سهم بیودیزل در مخلوط سوخت، عدد ستان سوخت افزایش یافته و بیشینه دما در داخل محفظه احتراق اندکی کاهش می‌یابد. لذا انتظار می‌رود، با افزایش سهم بیودیزل در مخلوط سوخت، میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن کاهش یابد، ولی نتایج آزمایش‌های تجربی نشان‌دهنده افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن است. البته با توجه به اینکه بیشتر موتورهای نظمی می‌شوند که آلاینده NO_x را کاهش دهند، تأثیر عدد ستان بر روی NO_x ثابت است. معمولاً، به ازای هر ۱۰ عدد افزایش در عدد ستان، انتشار آلاینده NO_x در حدود ۲ تا ۴ درصد کاهش می‌یابد [۱۱]. این درحالی است که نتایج تحقیقات نشان می‌دهند، با استفاده از سوخت اکسیژن‌دار، فرآیند احتراق شتاب می‌گیرد و فشار سیلندر افزایش می‌یابد و موجب افزایش انتشار آلاینده NO_x می‌شود [۱۲ و ۱۳]. در اینجا، تأثیر وجود ۱۰/۸ درصد اکسیژن در سوخت بیودیزل بر افزایش NO_x بیشتر از تأثیر کاهش عدد ستان است و لذا انتشار آلاینده NO_x در سوخت‌های حاوی بیودیزل افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش NO_x در مخلوط سوخت B8 مشاهده شد که در بارهای ۸/۶، ۸۲/۹ و ۱۰۰ درصد بار نهایی دینامومتر، به ترتیب ۲۰، ۱۳/۷ و ۱۲/۵ درصد نسبت به گازوییل خالص، است. همچنین، با افزایش بار موتور، انتشار NO_x افزایش می‌یابد، زیرا نسبت هم‌ارزی افزایش پیدا کرده و منجر به افزایش دمای گازهای داخل محفظه احتراق و تشکیل NO_x می‌شود.



شکل ۱۱- تأثیر بیودیزل بر انتشار اکسیدهای نیتروژن

تأثیر بیودیزل حاصل از میکروجلبک بر انتشار هیدروکربن‌های نسوخته

هیدروکربن‌های نسوخته از مهم‌ترین آلاینده‌های خروجی از آگروز موتورهایست که علاوه بر ایجاد آلودگی موجب کاهش عملکرد می‌شود، زیرا قسمتی از انرژی سوخت آزاد نمی‌شود. هیدروکربن‌های نسوخته، در اثر احتراق ناقص سوخت طی فرآیند احتراق، در مرحله تولید توان ایجاد می‌شوند. سوخت بیودیزل حاوی ۱۰/۸ درصد اکسیژن در ساختمان مولکولی خود بوده و دارای عدد ستان بالاتری است؛ در نتیجه باعث بهبود کیفیت احتراق شده و بخش بیشتری از سوخت اکسید می‌شود و به دنبال آن درصد هیدروکربن‌های نسوخته کاهش پیدا می‌کند. نتایج تجربی نیز مؤید این موضوع است که با افزایش سهم بیودیزل در مخلوط سوخت، به دلیل کیفیت بهتر احتراق، میزان انتشار هیدروکربن‌های نسوخته کاهش می‌یابد. کمترین میزان انتشار هیدروکربن‌های نسوخته مربوط به B8 است. میزان کاهش UHC، در بارهای ۸/۶، ۸۲/۹ و ۱۰۰ درصد بار نهایی دینامومتر، به ترتیب ۲۰، ۲۷/۲ و ۲۰ درصد نسبت به گازوییل خالص است. با افزایش بار موتور، مصرف سوخت افزایش یافته و در نتیجه انتشار UHC افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲- تاثیر افزایش بیودیزل بر انتشار هیدروکربن‌های نسوخته

نتیجه‌گیری

بیودیزل حاصل از میکروجلبک نسبت به سوخت گازوییل گرانبوی و چگالی بالاتری دارد، اما ارزش حرارتی آن نسبت به سوخت گازوییل پایین‌تر است. همچنین، سوخت بیودیزل نسبت به سوخت گازوییل نقطه ابری شدن و نقطه ریزش بالاتری دارد که استفاده از این سوخت را در مناطق سردسیر محدود می‌کند. برای بهبود خواص سوخت بیودیزل مانند چگالی، گرانبوی، نقطه ابری شدن و نقطه ریزش، بیودیزل با سوخت گازوییل مخلوط می‌شود و در نتیجه گرانبوی، چگالی، نقطه ابری شدن و نقطه ریزش آن افزایش می‌یابد، اما میزان ارزش حرارتی سوخت کاهش پیدا می‌کند.

نتایج آزمون‌های تجربی نشان داد که با افزودن ۲، ۵ یا ۸ درصد سوخت بیودیزل حاصل از میکروجلبک به گازوییل، توان و گشتاور موتور حفظ شده و مصرف سوخت ویژه ترمزی نیز تغییر معنی‌داری پیدا نمی‌کند، ولی انتشار آلاینده‌هایی منوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش منوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته در مخلوط ۸ درصد سوخت بیودیزل با گازوییل (B8) مشاهده شد. در بارهای ۸/۶، ۸۲/۹ و ۱۰۰ درصد بار نهایی دینامومتر، میزان کاهش انتشار CO به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۱۸ درصد و میزان کاهش انتشار UHC به ترتیب ۲۰، ۲۷/۲ و ۲۰ درصد نسبت به گازوییل خالص است. به علت کاهش قابل توجه آلاینده‌هایی چون هیدروکربن‌های نسوخته و منوکسیدکربن، استفاده از این سوخت به عنوان یک افزودنی به سوخت گازوییل مطلوب است و با توجه با مسایل زیست‌محیطی استفاده از ۸ درصد بیودیزل برای کاهش آلودگی به عنوان یک افزودنی پیشنهاد می‌شود. شایان ذکر است که که استفاده از سوخت بیودیزل حاصل از میکروجلبک به عنوان افزودنی گازوییل مقدار انتشار آلاینده NO_x را افزایش می‌دهد که در حال حاضر تحقیقات برای اصلاح آن ادامه دارد. با توجه به ظرفیت تالاب‌های کشور برای پرورش این گونه میکروجلبک و استفاده از منابع انرژی بازگشت‌پذیر مانند انرژی خورشیدی، می‌توان در گام نخست استفاده از سوخت B2 را هدف گذاری کرد.

منابع

1. B. Najafi and M. Khani, "Study of the Effect of Ethyl Ester of Sunflower Oil and Its Different Mixtures with Diesel on Performance and Emission Parameters of a Turbocharged Direct Injection Diesel Engine, Fuels," *Fuel and Combustion*, 4, No. 4, 2011, pp. 45-55, (in Farsi).
2. B. Najafi, V. Piroozpanah and B. Ghobadian, "Experimental Investigation of Diesel Engine Performance Parameters and Pollution Using Biodiesel," *Modares Technical and Engineering*, Special Issue on Mechanical Engineering, 28, 2007, pp. 78-101, (in Farsi).
3. A. Omidvar and E. Amini, "Predicting of Physical Properties and Atomization Characteristics of the Biofuel Derived from Chlamydomonas Microalga, Fuels", *Fuel and Combustion*, 3, No. 2, 2009, pp. 47-58, (in Farsi).

4. Y. Chisti, "Biodiesel from Microalgae," *Biotechnology Advances*, 25, 2007, pp. 294-306
5. M. Tabatabaei, M. Tohidfar, G. Salehi Jouzani, M. Safarnejad and M. Pazouki, "Biodiesel Production from Genetically Engineered Microalga Future of Bioenergy in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, No. 4, 2011, pp. 1918-1927.
6. Z. Tarik, *Microalgae Grown in Photobioreactor for Mass Production of Biodiesel*, Rutgers University Press, U.S.A, 2008.
7. S. Z. Masoumizadeh, "Isolation of Native Species of Phytoplankton from Arvand and Bahmanshir Rivers, *Pajouhesh & Sazandegi*, No. 73, 2006, pp. 147-154, (in Farsi).
8. J. Van Gerpen, B. Shanks and R. Pruszko, "Biodiesel Analytical Methods," Subcontractor Report, Iowa State University, 2004.
9. Y. Chen, B. Huang, T. Chiang and T. Tang, "Fuel Properties of Microalgae (*Chlorella Protothecoides*) Oil Biodiesel and Its Blends with Petroleum Diesel," *Fuel*, 94, 2012, pp. 270-273.
10. Y. Icingur and D. Altiparma, "Effect of Fuel Cetane Number and Injection Pressure on a DI Diesel Engine Performance and Emission," *Energy Convergent and Management*, 44, 2003, pp. 389-397.
11. D. Yuanwang, Z. Meilin, X. Dong and C. Xiaobei, "An Analysis for Effect of Cetane Number on Exhaust Emissions from Engine with the Neural Network," *Fuel*, 81, 2002, pp. 1963-1970.
12. T. C. Zannis, D. T. Hountalas and D. A. Kouremenos, "Experimental Investigation to Specify the Effect of Oxygenated Additive Content and Type on DI Diesel Engine Performance and Emissions," *SAE Paper 2004-01-0097*, 2004.
13. X. Li, W. L. Chippior and O. L. Gulder, "Effects of Fuel Properties on Exhaust Emissions of a Single Cylinder DI Diesel Engine," *SAE Technical Paper 962116*, 1996.

English Abstract

Effect of Microalgae Biodiesel on Performance Parameters and Exhaust Emissions from IDI Diesel Engine

B. Najafi, M. Torkian, M. A. Hejazi and A. A. Zamzamin
Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili
(Received: 2011.4.25, Received in revised form: 2011.12.21, Accepted: 2012.2.1)

Microalgae, with high growing capability and high level of oil yield can be considered as a new source for biodiesel production. In this research, Chlorella vulgaris microalgae was used for biodiesel production. Biodiesel fuel produced was added to diesel fuel with different volume percentages (B2, B5, and B8) and used in the M8/1 diesel engine. The diesel engine was tested at three loads (8.6, 82.9, and %100) and constant engine speed (730 rpm) conditions based on the ECE R-96 standard. Experimental results indicated that using B2, B5, and B8 biodiesel blends does not have a significant effect on brake power and brake Specific fuel consumption. Using B8 at 8.6, 82.9, and %100 loads, the CO emission respectively decreased to 40, 20, and 18%; and the HC emission decreased to 20, 27.2, and 20%, respectively. However, the NOX emission increased to 20, 13.7, and 12.2%, respectively.

Keywords: Alternative fuels, Biodiesel, Microalgae, Performance, Exhaust emission, Diesel engine