

## سنتر زیست‌دیزل از روغن سویا با استفاده از فن فراصوت

لطف‌اله سوادکوهی<sup>۱</sup>، انور شلماشی<sup>۲</sup>، شیوا مسعودی<sup>۳</sup>، فاطمه امانی<sup>۳</sup>

- ۱- تهران، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، مجتمع تحقیقاتی عصر انقلاب، پژوهشکده مکانیک  
 ۲- تهران، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، مجتمع تحقیقاتی عصر انقلاب، پژوهشکده صنایع شیمیایی  
 ۳- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، مجتمع پیامبر اعظم، دانشکده علوم

پیام‌نگار: Shalmashi@irost.org

### چکیده

در این بررسی سنتر زیست‌دیزل از روغن سویا با استفاده از امواج فراصوت مورد بررسی قرار گرفت و به بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر پرداخته شد. نتایج با سنتر زیست‌دیزل به طریق سنتی، مقایسه شد. نتایج این بررسی نشان داد با استفاده از امواج فراصوت می‌توان زیست‌دیزل ۹۸ درصد را در نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱، درصد وزنی کاتالیزور ۰/۵، دمای ۲۵ درجه سلسیوس و زمان ۱۰ دقیقه سنتر کرد. نتایج در مقایسه با سنتر به شیوه معمولی کاهش قابل ملاحظه‌ای را در زمان و دمای مورد نیاز برای واکنش نشان دادند. بر اساس نتایج کسب شده یک سیستم تولید پیوسته زیست‌دیزل در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از تکنیک فراصوت طراحی و ساخته شد. آزمایش‌های بررسی پارامترهای فیزیکی و آزمون موتور برای زیست‌دیزل تولید شده به‌طور کامل انجام شد و نتایج مناسب بودن زیست‌دیزل تولید شده را به‌عنوان سوخت تایید کردند.

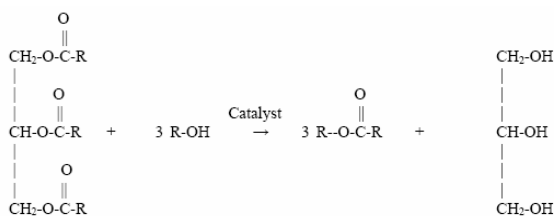
کلمات کلیدی: زیست‌دیزل، استری‌شدن ترانس، فن فراصوت

### ۱- مقدمه

سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای است و سرعت جایگزینی این سوخت‌ها حدوداً سه برابر سرعت مصرف آنها در جهان می‌باشد [۱]. زیست‌سوخت‌ها نیز به‌عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر در پیشرفت تکنولوژی کشورهای پیشرفته صنعتی و کشورهای در حال توسعه بسیار مؤثر می‌باشند، نه تنها به‌عنوان منابع انرژی ایمن، آلودگی زیست محیطی به همراه ندارند بلکه استفاده از آنها به حفظ منابع ارزی قابل توجهی منجر خواهد شد. با توجه به پاک بودن زیست‌سوخت‌ها و نداشتن آلودگی‌های زیست محیطی به همراه احتراق، به نظر می‌رسد این سوخت‌ها در چند دهه آینده رشد سریعی را در بازار فروش سوخت‌های وسایل نقلیه پیدا کنند. زیست‌سوخت‌ها به‌راحتی از منابع معمول زیستی قابل تهیه هستند و

امروزه بیش از ۸۰ درصد کل انرژی جهان را سوخت‌های فسیلی تأمین می‌کنند. سوخت‌های فسیلی از منابع تجدیدناپذیر انرژی محسوب می‌شوند. با توجه به اینکه در نهایت روزی سوخت‌های فسیلی به اتمام خواهند رسید، انرژی‌های تجدیدپذیر مانند سوخت‌هایی با پایه زیستی حاصل از زیست توده‌ها، انرژی آب، باد، خورشید، حرارت زمین، انرژی دریا و هیدروژن، در آینده در جهت تأمین انرژی، بسیار حائز اهمیت خواهند شد. تخمین زده شده که تا سال ۲۰۴۰ میلادی تقریباً نیمی از انرژی جهان و بیشتر از ۸۰ درصد از انرژی برق در جهان از منابع تجدیدپذیر تولید شود. توزیع منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح جهان، یکنواخت‌تر از

روغن‌های گیاهی طی واکنش استری شدن ترانس توسط یک الکل و کاتالیزگر به آلکیل استر اسیدهای چرب موجود در تری گلیسرید تبدیل می‌شود که در این حالت به آنها زیست‌دیزل اطلاق می‌گردد. ویژگی‌های فیزیکی زیست‌دیزل به دیزل معمولی بسیار نزدیک است [۱۰]. واکنش استری شدن ترانس برای تهیه زیست‌دیزل از تری گلیسرید در شکل (۱) نشان داده شده است. از عوامل مهم در میزان بازدهی این واکنش می‌توان به نسبت الکل به روغن، دما، زمان و مقدار کاتالیزگر اشاره کرد.



شکل ۱- واکنش تهیه الکیل استر از تری گلیسرید و الکل [۳]

### ۳- استفاده از فن فراصوت در سنتز زیست‌دیزل

همان‌طور که بیان شد سنتز زیست‌دیزل شامل واکنش الکل و روغن در حضور یک کاتالیزگر اسیدی و یا بازی است. الکل و روغن دو ماده غیر قابل امتزاج هستند، بنابراین در صورتی که بتوان یک امولسیون بسیار مؤثر از این دو ماده تهیه کرد، به گونه‌ای که تماس بسیار مؤثر میان آنها ایجاد شود سرعت واکنش افزایش می‌یابد. در فرایند متداول تولید زیست‌دیزل در بیچ، از یک همزن مکانیکی برای مخلوط کردن و سرعت بخشیدن به واکنش استفاده می‌شود، در حالی که در فن فراصوت، فرایند همزدن در اثر انتشار امواج فراصوت صورت می‌گیرد. انتشار این امواج در مخلوط واکنش، ایجاد ارتعاشات بسیار ریز و شدیدی می‌کند که سبب ایجاد آشفستگی در مخلوط واکنش می‌شود و نیرو و جریان قوی ایجاد می‌کند که باعث بر خورد مؤثر مولکول‌ها با یکدیگر می‌شود. ایجاد کاواک‌زایی ناشی از امواج فراصوت نیز از عوامل دیگری است که در این روش سبب افزایش سرعت واکنش می‌شود [۱۱-۱۳]. کاواک‌زایی به معنی رشد و ترکیدن حباب‌ها در محلول است. نیروی حاصل از ترکیدن حباب‌های ایجاد شده در اثر کاواک‌زایی خود منشاء انرژی است که می‌تواند سبب راندن مولکول‌ها در جهت بر خورد به یکدیگر با

با توجه به طبیعی بودن مواد پایه به کار رفته در تهیه آنها، چرخه تولید و مصرف دی اکسید کربن دارند و همین‌طور تجدیدپذیر و تجزیه‌پذیر هستند [۴-۲]. زیست‌دیزل به‌عنوان یک زیست‌سوخت با منشأ گیاهی امروزه در سطح جهان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. زیست‌دیزل از واکنش استری شدن ترانس (تبادل استری) روغن‌های گیاهی در حضور الکل و کاتالیزگر تهیه می‌شود. از مهم‌ترین امتیازات زیست‌دیزل‌ها به‌عنوان سوخت‌های دیزلی می‌توان به قابلیت حمل آنها، در دسترس بودن، تجدیدپذیری، بازدهی احتراق بالا، محتوای کمتر گوگرد و ترکیبات آروماتیکی، عدد ستان بالا و قابلیت تجزیه پذیری زیستی اشاره کرد [۵]. واکنش استری شدن ترانس برای تهیه زیست‌دیزل عموماً به‌صورت سنتی و غیر پیوسته در بیچ با استفاده از همزن مکانیکی و حرارت دهی صورت می‌گیرد که در این روش برای سنتز زیست‌دیزل، به ۱ تا ۸ ساعت زمان واکنش در دمای ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس نیاز است [۶] و بازدهی واکنش از ۸۵ تا ۹۸ درصد خواهد بود [۱]. در سال‌های اخیر بررسی‌هایی در زمینه استفاده از فن فراصوت برای سنتز زیست‌دیزل صورت گرفته است [۷، ۸]. مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر استفاده از امواج فراصوت در کاهش مصرف انرژی، افزایش بازدهی و افزایش سرعت واکنش استری شدن ترانس در سنتز زیست‌دیزل صورت گرفت.

### ۲- واکنش استری شدن ترانس

استفاده مستقیم از روغن‌های گیاهی به‌عنوان سوخت در موتورهای دیزل به‌علت بالا بودن گرانشی این روغن‌ها و همین‌طور پایین تر بودن فراریت آنها در مقایسه با سوخت‌های دیزلی معمولی می‌تواند مشکلاتی را برای موتورهای دیزل ایجاد کند. گرانشی روغن‌های گیاهی ۱۰ تا ۱۷ برابر بیشتر از سوخت‌های دیزلی معمولی است. مقدار چگالی روغن‌های گیاهی بین ۹۱۲ و ۹۲۱ کیلو گرم بر متر مکعب می‌باشد، در حالی که در مورد سوخت D2 این مقدار ۸۱۵ کیلو گرم بر متر مکعب است. گرانشی سینماتیک روغن‌های گیاهی بین ۳۹/۲ و ۶۵/۴ میلی‌متر مربع بر ثانیه در ۲۷ درجه سلسیوس است [۹]. روش‌های به‌کار رفته جهت کاهش گرانشی روغن‌های گیاهی عبارتند از: ریز امولسیون شدن، استری شدن ترانس و تفکافت که از این میان، استری شدن ترانس به لحاظ سهولت و ارزان تر بودن مورد توجه قرار گرفته است. در این فرایند، تری گلیسرید موجود در

سرعتی در حدود ۴۰۰ کیلومتر در ساعت شود. علاوه بر این، پدیده کاواک‌زایی باعث گرم شدن مخلوط واکنش نیز می‌شود.

#### ۴- سنتز زیست‌دیزل به روش استفاده از امواج فراصوت

در این مطالعه از یک دستگاه فراصوت مدل UP 200H، با توان ۲۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز برای سنتز زیست‌دیزل از روغن سویا و متانول (مرک) در حضور هیدروکسید سدیم (مرک) به‌عنوان کاتالیزگر استفاده شد. در این روش، محلول متوکسید سدیم از طریق حل کردن مقدار معینی سود در حجم معینی از متانول توسط اندکی حرارت‌دهی تهیه می‌شود و سپس به ۵۰ گرم روغن در راکتور افزوده می‌شود. سلول جریان یا به‌عبارتی راکتور واکنش، دو جداره است و برای تنظیم و ثابت بودن دما در طی آزمایش، آب از بن ماری در دمای مورد نظر توسط پمپ در آن جریان دارد. جهت جلوگیری از تبخیر حلال، سلول جریان به چگالنده مجهز شده است. با انتشار امواج فراصوت در مخلوط دو فاز متانول و روغن، میکرو امولسیون ایجاد می‌شود که ایجاد آن با استفاده از همزن‌های مکانیکی غیر ممکن است، ضمن اینکه این امولسیون بعد از اتمام واکنش و توقف کار دستگاه، به سرعت قابل برگشت است. بعد از اتمام زمان در نظر گرفته شده برای واکنش، برای توقف سریع واکنش از افزایش اسید کلریدریک به مقدار محاسبه شده برای خنثی‌سازی تمام کاتالیزگر (سود) استفاده می‌شود. به این ترتیب با توقف سریع واکنش از طریق خنثی‌سازی کل کاتالیزگر می‌توان میزان بازدهی واکنش را در زمان معین و کنترل شده به‌دست آورد.

سپس مخلوط واکنش جهت دو فاز شدن به ظرف سرریزکن منتقل می‌شود که در این حالت جدا شدن فاز گلیسرین و زیست‌دیزل بعد از چند دقیقه قابل رویت است. بعد از مراحل خالص‌سازی زیست‌دیزل، شامل جداسازی گلیسرین، شستشوی ملایم زیست‌دیزل با آب ولرم جهت جداسازی نمک‌ها، باقی کاتالیزگر، متانول، مونو، دی، تری گلیسرید و گلیسرین باقیمانده، درصد تبدیل واکنش به‌دست می‌آید. خالص‌سازی زیست‌دیزل مرحله بسیار مهمی در سنتز زیست‌دیزل است، زیرا مطابق با استانداردهای تعریف شده، برای هر یک از ناخالصی‌های نام برده شده در زیست‌دیزل، مقادیر مجازی تعریف شده است.

#### ۵- نتایج و نمودارها

در مطالعه حاضر به بررسی و بهینه‌سازی تأثیر چهار پارامتر در سنتز زیست‌دیزل از روغن سویا با استفاده از فنّ فراصوت پرداخته شد. این چهار پارامتر عبارت بودند از درصد وزنی کاتالیزگر، نسبت مولی متانول به روغن، زمان و دما. نتایج این بررسی‌ها در جدول‌های (۱) تا (۴) آورده شده است. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته شرایط بهینه برای تولید زیست‌دیزل به کمک امواج فراصوت، نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱، درصد وزنی کاتالیزگر ۰/۵، دمای ۲۵ درجه سلسیوس و زمان ۱۰ دقیقه به‌دست آمد (جدول (۵))، که نتایج در مقایسه با سنتز زیست‌دیزل به شیوه معمولی (جدول (۶)) کاهش قابل ملاحظه‌ای را در دما و زمان مورد نیاز برای واکنش نشان می‌دهند.

جدول ۱- آزمایش‌های بهینه‌سازی درصد وزنی کاتالیزگر در تولید زیست‌دیزل به کمک امواج فراصوت

نسبت مولی متانول به روغن	درصد وزنی کاتالیزگر	دما (درجه سلسیوس)	زمان (دقیقه)	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد زیست‌دیزل
۶:۱	۰/۵	۲۵	۸	۰/۸۷۸۹	۹۵
۶:۱	۰/۷	۲۵	۸	۰/۸۷۸۱	۹۷
۶:۱	۱/۰	۲۵	۸	۰/۸۷۸۱	۹۷

جدول ۲- آزمایش‌های بهینه‌سازی نسبت مولی متانول به روغن در تولید زیست‌دیزل به کمک امواج فراصوت

نسبت مولی متانول به روغن	درصد وزنی کاتالیزگر	دما (درجه سلسیوس)	زمان (دقیقه)	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد زیست‌دیزل
۳:۱	۰/۵	۲۵	۸	۰/۸۸۱۳	۸۹
۶:۱	۰/۵	۲۵	۸	۰/۸۷۸۹	۹۵
۹:۱	۰/۵	۲۵	۸	۰/۸۷۷۷	۹۸
۱۲:۱	۰/۵	۲۵	۸	۰/۸۷۷۷	۹۸

جدول ۳- آزمایش‌های بهینه‌سازی زمان در تولید زیست‌دیزل به کمک امواج فراصوت

نسبت مولی متانول به روغن	درصد وزنی کاتالیزگر	دما (درجه سلسیوس)	زمان (دقیقه)	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد زیست‌دیزل
۶:۱	۰/۵	۲۵	۳	۰/۸۹۵۱	۵۴
۶:۱	۰/۵	۲۵	۵	۰/۸۸۳۶	۸۳
۶:۱	۰/۵	۲۵	۸	۰/۸۷۸۹	۹۵
۶:۱	۰/۵	۲۵	۱۰	۰/۸۷۷۷	۹۸
۶:۱	۰/۵	۲۵	۱۵	۰/۸۷۷۷	۹۸
۶:۱	۰/۵	۲۵	۲۰	۰/۸۷۷۷	۹۸
۶:۱	۰/۵	۲۵	۲۵	۰/۸۷۷۷	۹۸
۶:۱	۰/۵	۲۵	۳۰	۰/۸۷۷۷	۹۸

جدول ۴- آزمایش‌های بهینه‌سازی دما در تولید زیست‌دیزل به کمک امواج فراصوت

نسبت مولی متانول به روغن	درصد وزنی کاتالیزگر	دما (درجه سلسیوس)	زمان (دقیقه)	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد زیست‌دیزل
۶:۱	۰/۵	۲۵	۱۰	۰/۸۷۷۷	۹۸
۶:۱	۰/۵	۳۵	۱۰	۰/۸۷۷۷	۹۸
۶:۱	۰/۵	۴۵	۱۰	۰/۸۷۷۷	۹۸
۶:۱	۰/۵	۵۵	۱۰	۰/۸۷۷۷	۹۸
۶:۱	۰/۵	۶۵	۱۰	۰/۸۷۷۷	۹۸

جدول ۵- شرایط بهینه در تولید زیست‌دیزل به کمک امواج فراصوت

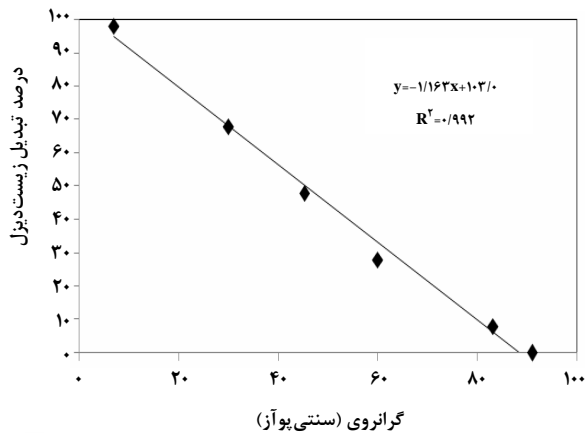
نسبت مولی متانول به روغن	درصد وزنی کاتالیزگر	زمان (دقیقه)	دما (درجه سلسیوس)
۶:۱	۰/۵	۱۰	۲۵

جدول ۶- شرایط بهینه در تولید زیست‌دیزل به روش معمولی

نسبت مولی متانول به روغن	درصد وزنی کاتالیزگر	زمان (دقیقه)	دما (درجه سلسیوس)
۶:۱	۰/۵	۴۰	۵۵

## ۶- آنالیز

در مطالعه حاضر برای به‌دست آوردن درصد تبدیل زیست‌دیزل، دو نمودار درجه‌بندی با استفاده از نمونه‌های استاندارد زیست‌دیزل رسم شد، یکی از نمودارها با استفاده از طیف‌بینی رزونانس مغناطیسی پروتون و چگالی زیست‌دیزل به‌دست آمد و دیگری با استفاده از طیف‌بینی رزونانس مغناطیسی پروتون و گرانیوی زیست‌دیزل رسم شد که نتایج به‌دست آمده از آنها برای محاسبه درصد تبدیل زیست‌دیزل سنتز شده، از تطابق خوبی با یکدیگر برخوردار بودند (شکل (۲) و (۳)). با کمک این نمودارهای درجه‌بندی می‌توان تنها با اندازه‌گیری چگالی و یا گرانیوی زیست‌دیزل سنتز شده، درصد تبدیل آن را به‌دست آورد.



شکل ۳- نمودار درصد تبدیل زیست‌دیزل بر حسب گرانیوی

مشخصات موتور دیزلی پاششی مستقیم مورد آزمایش با دو سوخت گازوئیل و سوخت زیست‌دیزل  
بررسی بسته آزمون موتوری ۴۰۰ وات طبق استاندارد ISO3046  
الف: مشخصات موتور مورد آزمایش:

تعداد سیلندر: ۴

قطر سیلندر: ۹۷ میلی‌متر

مسیر رفت‌وآمد پیستون: ۱۲۸ میلی‌متر

حجم جابه‌جایی: ۳۷۸۰ سانتی‌متر مکعب

نسبت تراکم: ۱۷:۱

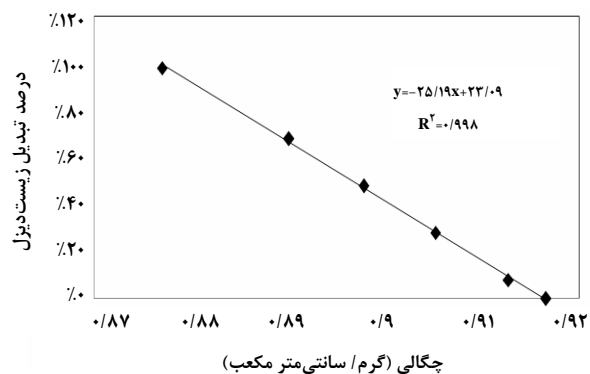
ترتیب احتراق: ۲-۴-۳-۱

حداکثر قدرت: (۲۸۰۰ rpm) ۶۳ کیلو وات

حداکثر گشتاور: (۱۸۰۰ rpm) ۲۳۵ نیوتن متر

ظرفیت کارتر روغن روانکار: ۹ لیتر

ظرفیت آب خنک کننده: ۷/۷ لیتر



شکل ۲- نمودار درصد تبدیل زیست‌دیزل بر حسب چگالی

## ۷- آزمون موتور

در این بخش طبق استاندارد (ISO3046-I-V) به بررسی و مقایسه پارامترهای فنی سوخت زیست‌دیزل سنتز شده و مقایسه آن با سوخت گازوئیل در یک موتور دیزلی پاششی مستقیم چهار سیلندر پرداخته شد. موارد مورد بررسی عبارت بودند از مصرف ویژه سوخت، مصرف سوخت، گشتاور خروجی، توان خروجی، درصد حجمی

ب: استاندارد مورد هدف:

استاندارد آزمایش طبق استاندارد (ISO3046-I-V)

پ: ویژگی‌های بسته آزمون:

مجهز به دیناموتر اری کارنت با توان ترمزی ۴۰۰ وات

سنجش مصرف هوا: Hot wire

سنجش مصرف سوخت: جرمی

سنجش گشتاور: Load cell

کنترل دمای موتور: تبادلگر حرارتی مواد آب و روغن

سنجش آلاینده‌ها: CO, NOX, HC, SOX بر حسب درصد حجمی

### ۷-۱ تحلیل نتایج آزمایش و ارزیابی عملکرد موتور دیزل

#### پاشش مستقیم

در این بخش به تحلیل مقایسه‌ای منحنی تغییرات توان، گشتاور، مصرف ویژه سوخت و آلودگی خروجی از آگروز در حالت تمام بار طبق استاندارد ISO3046 برای دو سوخت گازوئیل و زیست‌دیزل پرداخته شد.

توان ماکزیمم حاصل از عملکرد موتور با سوخت گازوئیل معادل ۵۳/۴ کیلو وات در دور ۲۸۰۰ به دست آمد که در مقایسه با سوخت زیست‌دیزل که معادل ۵۰/۲ کیلو وات در دور ۲۸۰۰ به دست آمد، افت توانی حدود شش یا هفت درصد را نشان می‌دهد. به طور کلی در کلیه دورها میزان افت توان مشاهده می‌شود. مقایسه توان خروجی موتور در مورد زیست‌دیزل و گازوئیل در شکل (۴) نمایش داده شده است.

میزان گشتاور ماکزیمم در حالت گازوئیل سوز ۲۱۴/۶ نیوتون متر در دور ۱۸۰۰ به دست آمد که در مقایسه با حالت زیست‌دیزل که ۲۰۰ نیوتون متر در دور ۱۸۰۰ حاصل شد، افتی در حدود ۷ درصد را نشان می‌دهد. به طور کلی میزان افت گشتاور در حالت زیست‌دیزل نسبت به گازوئیل مشاهده می‌شود. مقایسه گشتاور خروجی موتور در مورد زیست‌دیزل و گازوئیل در شکل (۵) نمایش داده شده است. مصرف ویژه مینییم در حالت گازوئیل سوز ۲۴۶ گرم بر کیلو وات ساعت در دور ۲۲۰۰ به دست آمد که در مقایسه با حالت زیست‌دیزل که معادل ۲۵۱ گرم بر کیلو وات ساعت حاصل گردید افزایشی حدود دو تا سه درصد را نشان می‌دهد، ولی میزان افزایش در

دوره‌های پایین‌تر و بالاتر بالغ بر ۱۰ تا ۱۵ درصد است. به طور کلی، افزایش میزان مصرف ویژه سوخت در حالت زیست‌دیزل در مقایسه با گازوئیل مشاهده شد. مقایسه مصرف ویژه سوخت و مصرف سوخت در مورد زیست‌دیزل و گازوئیل در شکل‌های (۶) و (۷) نمایش داده شده است.

مقایسه میزان آلاینده‌های آگروز موتور در مورد زیست‌دیزل و گازوئیل در شکل‌های (۸) تا (۱۱) نمایش داده شده است میزان آلاینده‌های آگروز موتور برای دو سوخت گازوئیل و زیست‌دیزل بر حسب درصد حجمی به شرح زیر است:

۱- میزان مونو اکسید کربن در حالت زیست‌دیزل افت ۵۰ درصد را

در مقایسه با گازوئیل نشان می‌دهد.

۲- میزان هیدروکربورهای نسوخته در حالت زیست‌دیزل حدود ۱۰

درصد افزایش را نشان می‌دهد.

۳- میزان اکسیدهای ازت در حالت زیست‌دیزل حدود هفت درصد

افزایش را نشان می‌دهد.

۴- میزان اکسیدهای گوگرد در حالت زیست‌دیزل نسبت به

گازوئیل، صد در صد کاهش را نشان می‌دهد به عبارتی

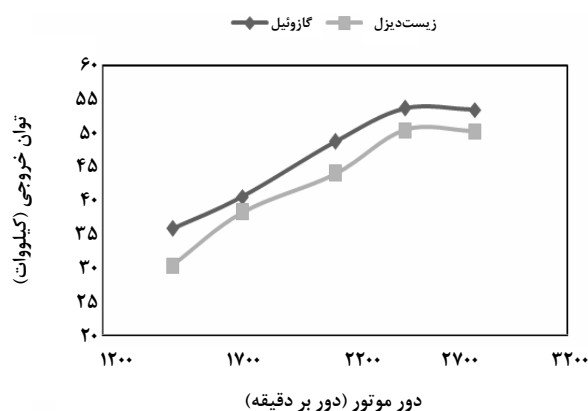
زیست‌دیزل عاری از مشتقات گوگرد است.

۵- میزان دوده در حالت سوخت گازوئیل طبق عدد بوشی بین

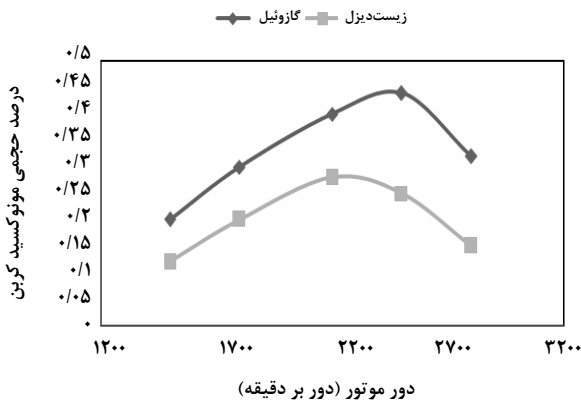
(۴-۸) به دست آمد که این میزان در حالت زیست‌دیزل حدود

(۲-۳) اندازه‌گیری شد که بنابراین کاهش چشمگیری را نشان

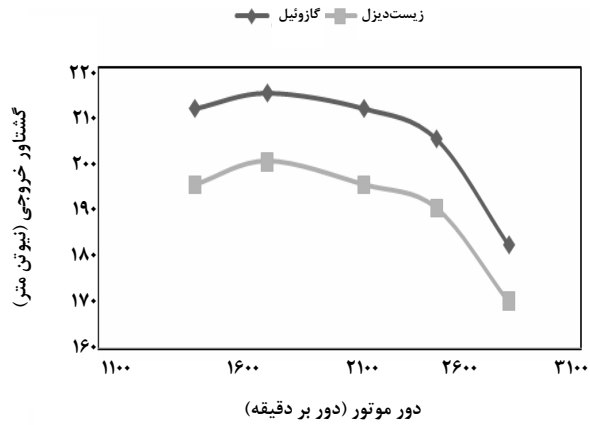
می‌دهد.



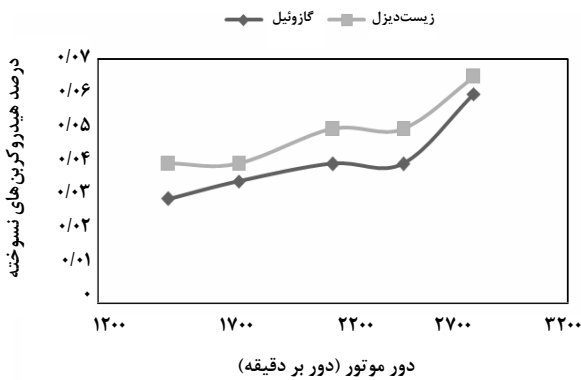
شکل ۴- مقایسه توان خروجی موتور برای گازوئیل و زیست‌دیزل در شرایط تمام بار



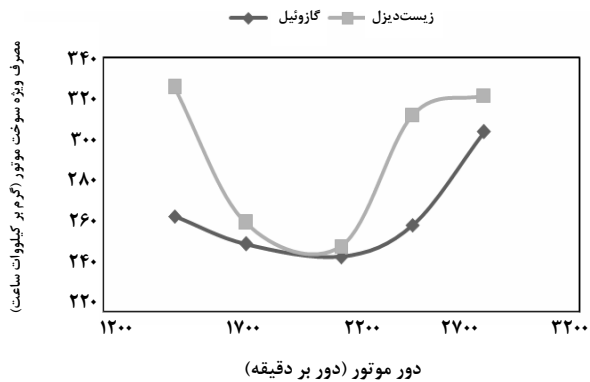
شکل ۸- مقایسه درصد حجمی مونوکسید کربن خروجی از موتور برای گازوئیل و زیست‌دیزل در شرایط تمام بار



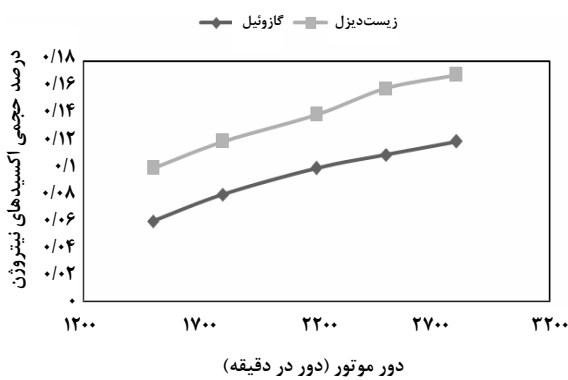
شکل ۵- مقایسه گشتاور خروجی موتور برای گازوئیل و زیست‌دیزل در شرایط تمام بار



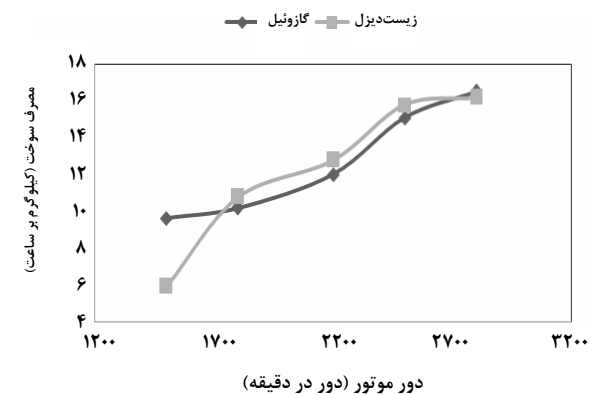
شکل ۹- مقایسه درصد حجمی هیدروکربن‌های نسوخته برای گازوئیل و زیست‌دیزل در شرایط تمام بار



شکل ۶- مقایسه مصرف ویژه سوخت برای گازوئیل و زیست‌دیزل در شرایط تمام بار



شکل ۱۰- مقایسه درصد حجمی اکسیدهای نیتروژن خروجی از موتور برای گازوئیل و زیست‌دیزل در شرایط تمام بار



شکل ۷- مقایسه مصرف سوخت برای گازوئیل و زیست‌دیزل در شرایط تمام بار

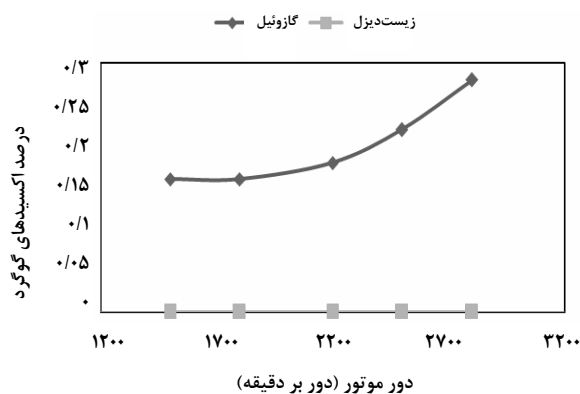
تطابق خوبی با استانداردها برخوردار است و به لحاظ کیفیت قابل تایید می‌باشد.

### ۹- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمایش‌های بهینه‌سازی برای سنتر زیست‌دیزل در این مطالعه نشان داد شرایط بهینه برای سنتر زیست‌دیزل به روش معمولی عبارت است از نسبت مولی متانول به روغن ۱:۶، درصد وزنی کاتالیزگر ۰/۵، زمان واکنش ۴۰ دقیقه و دمای ۵۵ درجه سلسیوس و در روش سنتر به کمک امواج فراصوت شرایط بهینه به‌دست آمده عبارت بودند از نسبت مولی متانول به روغن ۱:۶، درصد وزنی کاتالیزگر ۰/۵، مدت واکنش ۱۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سلسیوس. مطابق با نتایج آزمایش‌ها، در هر دو روش مقدار بهینه نسبت مولی متانول به روغن و درصد وزنی کاتالیزگر مورد نیاز یکسان بود. مهم‌ترین عامل در تبدیل مؤثر روغن به زیست‌دیزل در روش استفاده از امواج فراصوت زمان است، با در نظر گرفتن زمان ۱۰ دقیقه برای واکنش با استفاده از امواج فراصوت حتی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نیز می‌توان به زیست‌دیزل ۹۸ درصد رسید. بنابراین مهم‌ترین عامل در سنتر زیست‌دیزل از روغن سویا با استفاده از امواج فراصوت، زمان است زیرا دما خود به خود و به‌صورت بسیار مؤثر در اثر کاواک‌زایی در نقطه نقطه مخلوط واکنش ایجاد می‌شود.

سنتر زیست‌دیزل ۹۸ درصد از روغن سویا با استفاده از فن فراصوت در دمای محیط و زمان واکنش ۱۰ دقیقه بسیار ایده‌آل است. همان‌طور که آزمایش‌های صورت گرفته در این مطالعه نشان می‌دهد سنتر زیست‌دیزل ۹۸ درصد با روش معمولی در حالت بهینه، تنها در دمای ۵۵ درجه سلسیوس و در مدت ۴۰ دقیقه امکان پذیر است. در روش معمولی سنتر زیست‌دیزل، برای به هم خوردن مخلوط دو فازی (روغن- متانول) از همزن مکانیکی استفاده می‌شود که حتی در دوره‌های چرخش بالا نمی‌تواند به‌طور مؤثر باعث تماس دو فاز شود و بنابراین سرعت واکنش بسیار پایین است.

در سنتر زیست‌دیزل به کمک فن فراصوت، انتشار امواج فراصوت در مخلوط واکنش ایجاد ارتعاشات بسیار قوی و ریز می‌کند. این ارتعاشات سبب مخلوط شدن بسیار مؤثر دو فاز می‌شود به گونه‌ای که گاهی در پنج دقیقه آخر واکنش مخلوط واکنش یک فاز به نظر



شکل ۱۱- مقایسه درصد حجمی اکسیدهای گوگرد خروجی از موتور برای گازوئیل و زیست‌دیزل در شرایط تمام بار

بنابراین، مطابق با نتایج این بخش، بهره‌گیری از سوخت زیست‌دیزل به جای گازوئیل در موتور دیزلی پاشش مستقیم با دور متوسط از دیدگاه توان و گشتاور، به‌طور میانگین، افتی در حدود هفت درصد، و میزان مصرف ویژه سوخت نیز افزایشی در حدود ۱۰ درصد را نشان می‌دهد. میزان آلاینده‌های خروجی از آگروز موتور بدون عملیات پاکسازی آگروز در مجموع کاهش چشمگیری داشت، به‌خصوص میزان دوده تقریباً به نصف رسید و نکته بسیار پر اهمیت حذف کامل اکسیدهای گوگرد در حالت زیست‌دیزل نسبت به گازوئیل سوز می‌باشد. تنها میزان اکسیدهای ازت به‌طور میانگین، افزایشی حدود ۱۰ درصد را نشان داد.

### ۸- بررسی عوامل استاندارد تعریف شده برای زیست‌دیزل

کیفیت زیست‌دیزل به‌عنوان سوخت موتورهای دیزل، توسط برخی عوامل در نظر گرفته شده برای آن بررسی و بیان می‌شود. این فاکتورها عبارتند از: نقطه اشتعال، درصد آب، گراندرو، خاکستر، مقدار گوگرد، میزان خوردگی نوار مسی، باقی‌مانده کربن، عدد ستان، اسیدیته، نقطه ابری شدن و میزان فسفر. در این بخش به بررسی هر یک از این فاکتورها در زیست‌دیزل سنتر شده پرداخته شد. نتایج این بررسی در مورد زیست‌دیزل سنتر شده در این طرح و مقایسه با مقادیر ذکر شده در استانداردهای تعریف شده برای زیست‌دیزل در جدول (۷) آورده شده است. همان‌طور که این نتایج نشان می‌دهد، زیست‌دیزل سنتر شده به لحاظ پارامترهای فیزیکی از



می‌رسد که این به علت امولسیون بسیار ریز تشکیل شده می‌باشد که تماس بسیار مؤثر واکنش دهنده‌ها را افزایش می‌دهد، ضمن اینکه نیروی برشی قوی حاصل از انتشار امواج فراصوت همراه با دمای تولید شده در مخلوط واکنش ناشی از فرایند کاواک‌زایی، انرژی فعالسازی واکنش را به‌طور کاملاً مؤثر فراهم می‌کند.

جدول ۷- مقایسه پارامترهای فیزیکی برای زیست‌دیزل سنز شده و مقادیر بیان شده در استانداردها

مقدار اندازه‌گیری شده برای زیست‌دیزل سنز شده	مقدار مجاز مطابق با استاندارد ASTM	شماره استاندارد روش اندازه‌گیری	خواص فیزیکی
۱۰۵ درجه سلسیوس	حداقل ۱۰۲ درجه سلسیوس مطابق با استاندارد D 93	روش دستگاهی گلین <sup>۱</sup> طبق استاندارد ASTM	نقطه اشتعال
۳-	۲- تا ۶- درجه سلسیوس مطابق با استاندارد D 2500	AOCS-CO-6-25(97)	نقطه ابری شدن
۰/۰۴ درصد وزنی	حداکثر ۰/۰۵ درصد وزنی مطابق با استاندارد D 4530	D 4530	باقی‌مانده کربن
۴۸ دقیقه	۴۷ دقیقه مطابق با استاندارد D 613	D 613	عدد ستان
۴/۱ میلی‌متر مربع بر ثانیه	۱/۹ تا ۶/۰ میلی‌متر مربع بر ثانیه در دمای ۴۰ درجه سلسیوس مطابق با استاندارد D 445	روش بروک اسپین <sup>۲</sup> طبق استاندارد ASTM	گرانروی حرکتی
ناچیز	حداکثر ۰/۰۲ درصد وزنی مطابق با استاندارد D 874	D 874	خاکستر سولفات
ناچیز	حداکثر ۰/۰۵ درصد وزنی مطابق با استاندارد D 5453	CHN	گوگرد
No.1	حداکثر No.3 مطابق با استاندارد D 130	D130	خوردگی نوار مسی
۰/۲ میلی‌گرم سود بر گرم زیست‌دیزل	حداکثر ۰/۸۰ میلی‌گرم سود بر گرم زیست‌دیزل مطابق با استاندارد D 664	D 664	اسیدیته
۰/۰۲ درصد حجمی	حداکثر ۰/۰۵ درصد حجمی مطابق با استاندارد D 2709	کارل فیشر <sup>۳</sup>	درصد آب
ناچیز	حداکثر ۰/۰۰۱ درصد وزنی مطابق با استاندارد D 4951	ICP	فسفر

1. Instrumental Glain method ASTM method  
2. Brook Spin DV ASTM method  
3. Karl Fisher

بنابراین همان‌طور که نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد استفاده از امواج فراصوت در سنتز زیست‌دیزل از روغن سویا توسط واکنش استری شدن ترانس نسبت به استفاده از روش معمولی برای سنتز زیست‌دیزل مساوی با: کاهش زمان مورد نیاز برای انجام واکنش به ۱۰ دقیقه، انجام واکنش در دمای محیط، سرعت، سهولت و بهبود جداسازی گلیسرین از زیست‌دیزل در مدت حداکثر دو ساعت، امکان تولید زیست‌دیزل به حالت پیوسته به کمک فن فراصوت است.

### مراجع

- [1] Ayhan Demirbas, "Biodiesel A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines". Turkey, Springer-Verlag London Limited, first edition, page 2, (2008).
- [2] Kim, S., Dale, B.E., "Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing: bioethanol and biodiesel". Biomass Bioenergy 29:426-439, (2005).
- [3] Demirbas, M.F., Balat, M., "Recent advances on the production and utilization trends of biofuels: a global perspective". Energy Conversion Mgmt 47:2371-238, (2006).
- [4] Puppan, D., "Environmental evaluation of biofuels". Periodica Polytechnica Ser Soc Man Sci 10:95-116, (2002).
- [5] Goering, E., Schwab, W., Daugherty, J., Pryde, H., Heakin, J., "Fuel properties of eleven vegetable oils". Trans ASAE 25: 1472-1483, (1982).
- [6] Van Gerpen, J., Shanks, B., Prusko, R., Clements, D., Knothe, G., "Biodiesel production technology". National Renewable Energy Laboratory, page 62-63, (2004).
- [7] Francisco F.P. Santos, Sueli Rodrigues, Fabiano A.N. Fernandes. "Optimization of the production of biodiesel from soybean oil by ultrasound assisted methanolysis". Fuel Processing Technology 90: 312-316, (2009).
- [8] Priyanka Chand, Venkat Reddy Chintareddy, John G. Verkade, and David Grewell. "Enhancing Biodiesel Production from Soybean Oil Using Ultrasonics". Energy Fuels 24: 2010-2015, (2010).
- [9] Ma, F., Hanna, M.A., "Biodiesel production: a review". Bioresour Technol 70: 1-15, (1999).

مزیت مهم دیگر استفاده از فن فراصوت در سنتز زیست‌دیزل، دو فازی شدن سریع گلیسرین و زیست‌دیزل بعد از اتمام واکنش است که تنها بعد از گذشت دو الی سه دقیقه از اتمام واکنش با خط مرز کاملاً واضح قابل رویت است که حداکثر بعد از دو ساعت کامل می‌شود. ولی در روش معمولی سنتز زیست‌دیزل، دو فازی شدن مخلوط (گلیسرین- زیست‌دیزل) به آرامی صورت می‌گیرد و بعد از حدود ده دقیقه قابل رویت می‌باشد که برای کامل شدن آن به یک روز زمان نیاز است. بنابراین در سنتز زیست‌دیزل با استفاده از امواج فراصوت تنها بعد از گذشت دو ساعت از اتمام واکنش می‌توان گلیسرین را از زیست‌دیزل جدا کرد و سایر مراحل خالص‌سازی را بر روی آن انجام داد که این سبب سرعت هر چه بیشتر تولید می‌شود. در واقع در سنتز زیست‌دیزل با استفاده از امواج فراصوت خروج گلیسرین باقی‌مانده به حالت امولسیون در زیست‌دیزل بسیار سریع و راحت صورت می‌گیرد. در سنتز زیست‌دیزل با استفاده از امواج فراصوت با توجه به کاهش زمان مورد نیاز برای انجام واکنش، می‌توان سیستم تولید زیست‌دیزل را به حالت پیوسته در آورد. از دستاوردهای مهم این بررسی طراحی و ساخت یک سیستم پیوسته تولید زیست‌دیزل در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از فن فراصوت و با توجه به شرایط بهینه به‌دست آمده می‌باشد. همین‌طور در این مطالعه موفق به استفاده از روشی مناسب، آسان و ارزان برای به‌دست آوردن درصد تبدیل زیست‌دیزل سنتز شده با استفاده از اندازه‌گیری چگالی و یا گرانیوزی زیست‌دیزل شدیم. در این بررسی موفق به تولید زیست‌دیزلی شدیم که تمام عوامل فیزیکی و کیفیتی آن با مقادیر ذکر شده در استانداردها مطابقت می‌کرد و نتایج آزمون موتور نیز در مورد آن کاملاً مثبت بود که به‌طور خلاصه در زیر به آنها اشاره شده است.

الف: کاهش ۵۰ درصدی مونوکسید کربن حاصل از احتراق

ب: کاهش ۵۰ درصدی دوده

ج: کاهش صد در صدی اکسیدهای گوگرد

د: کارکرد خوب موتور با سوخت زیست‌دیزل تولید شده با تنها افت ناچیز در توان (پایین‌تر از ۱۰ درصد) و افزایش حدود پنج درصدی مصرف ویژه سوخت که در مقابل دستاوردهای زیست محیطی برتر، و توجیه اقتصادی بهینه این سوخت قابل چشم‌پوشی است.

- [10] I.M. Atadashi, M.K. Aroua, A. Abdul Aziz., High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 1999–2008, (2010).
- [11] Okitsu, K., Yue, A., "Sonolytic control of rate of gold reduction and sizes of formed nanoparticles". *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 75: 2289-96, (2002).
- [12] Stavarache, C., Vinatoru, M., "Fatty acids methyl esters from vegetable oil by means of ultrasonic energy". *Ultrasonic Sonochemistry* 12: 367-72, (2005).
- [13] Duc Hanh, H., The Dong, N., Okitsu, K., "Biodiesel production through transesterification of triolein with various alcohols in an ultrasonic field". *Renewable Energy* 34: 766-768, (2009).