

بررسی مقایسه‌ای تولید سوخت بیودیزل از روغن گیاهی آفتابگردان با استفاده از امواج فراصوت و حرارت

سهیلا ابراهیمی^۱، سید جعفر هاشمی^{۲*}، پوریا بی پروا^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
soheila.ebrahimi71@yahoo.com

^۲ دانشیار مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
szhash@yahoo.com

^۳ استادیار دانشکده علوم پایه، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
p.biparva@sanru.ac.ir

چکیده: در این تحقیق به بررسی مقایسه‌ای بیودیزل تولیدشده با استفاده از حرارت و امواج فراصوت پرداخته شد. از متانول به‌عنوان الکل با نسبت مولی الکل به روغن ۳، ۶، ۹ و از پتاسیم هیدروکسید ۰/۵، ۱ و ۱/۵ (w/w%) به‌عنوان کاتالیزور استفاده شد. در بکارگیری امواج فراصوت، از پنج دامنه نوسان پالسی و سه سطح زمانی دقیقه استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که بیودیزل تولیدشده توسط امواج فراصوت در برخی خصوصیات شامل نقطه اشتعال حدوداً به میزان ۹٪ افزایش و مقدار گرانیوی، کربن باقی‌مانده و مقدار آب موجود در سوخت به ترتیب به میزان ۲۷٪، ۵۰٪ و ۵٪ کاهش یافت. نقطه ابری بیودیزل تولیدشده با استفاده از حرارت ۲°C- و امواج فراصوت ۷°C به دست آمد. سوخت تولیدشده را می‌توان به‌عنوان یک سوخت استاندارد در موتور استفاده کرد. همچنین مشخص شد که بکارگیری امواج فراصوت به دلیل نیاز به زمان کمتر و خصوصیات کیفی بهتر، نسبت به استفاده از حرارت مناسب‌تر است.

واژه‌های کلیدی: امواج فراصوت، بیودیزل، روغن آفتابگردان، ترانس استریفیکاسیون.

* نویسنده مسئول

سدیم، هیدروکسید پتاسیم، متوکسید سدیم و متوکسید پتاسیم را در ترانس استری کردن روغن خوراکی پسماند به کار بردند که نهایتاً هیدروکسید پتاسیم با غلظت ۱٪ به‌عنوان بهترین کاتالیست انتخاب شد [۷]. انصاری و همکاران، بهترین شرایط برای تولید دیزل زیستی با استفاده از روغن ضایعات دام و طیور را با نسبت کاتالیست ۱/۲۵ (w/w%) روغن موجود در فرایند، نسبت ۶:۱ مولی الکل به روغن و دمای $60^{\circ}C$ گزارش نمودند. در این شرایط میزان تولید دیزل زیستی ۹۳ درصد بود [۸].

برای بررسی تولید بیودیزل از یک منبع، همواره بایستی از روش‌هایی استفاده کرد که مدت‌زمان واکنش و انرژی مصرفی آن را کاهش دهند. موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران یافتن راه‌حلی برای این مسئله بوده است. یکی از این روش‌های مؤثر استفاده‌شده برای تولید بیودیزل، تابش امواج فراصوت^۹ می‌باشد [۹]. در اوایل سال ۲۰۰۳، از امواج فراصوت به منظور افزایش تبادل استری از روغن‌های گیاهی به بیودیزل استفاده شده است. استوارچ و همکاران، اختراعات خود را در زمینه فرآیند تولید بیودیزل به‌وسیله اولتراسونیک ثبت کردند و بعد از آن در حوزه امواج فراصوت ادامه دادند [۱۰].

هینگو و همکاران، سوخت بیودیزل را با استفاده از سامانه فراصوت (۲۰kHz و ۲۰۰W) از روغن پسماند تولید کردند. نسبت مولی الکل به روغن (۶:۱) و درصد کاتالیزور پتاسیم هیدروکسید ۱ (w/w%) و دمای $45^{\circ}C$ به‌عنوان متغیرهای بهینه گزارش شدند [۱۱]. لئوناردو و همکاران، مقایسه‌ای در مورد واکنش ترانس استریفیکاسیون در دو حالت مرسوم و استفاده از امواج فراصوت (۲۰kHz و ۴۰۰ W) انجام دادند. زمان واکنش، درصد تبدیل و کیفیت بیودیزل تولیدی در دو حالت مقایسه شد و با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده حاصل از این تحقیق، نشان داده شد که استفاده از تابش امواج فراصوت، زمان واکنش را کاهش داده و می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش مرسوم باشد [۱۲]. حسین‌زاده سامانی و همکاران، در تولید بیودیزل از روغن پسته با استفاده از امواج فراصوت، به این نتیجه رسیدند که با افزایش دامنه و پالس^{۱۰}، محتوای متیل استر افزایش یافت. هنگامی که مدت‌زمان واکنش در محدوده ۷-۵ دقیقه و نسبت مولی الکل به روغن در محدوده ۶-۵ بود، محتوای متیل استر افزایش یافت و خارج از این محدوده، عملکرد کاهش یافت [۱۳]. کیتیچای و تاناکرن، از روغن نخل با استفاده از کاتالیزور CaO و ۶/۲ پالس امواج فراصوت تحت

با توجه به محدودیت ذخایر فسیلی و روند افزایش تقاضا برای استفاده از این انرژی‌ها، لزوم شناسایی و به‌کارگیری انرژی‌های جایگزین، از هر زمانی بیشتر احساس می‌گردد. در طول چند دهه اخیر، فعالیت‌های گسترده‌ای در راستای شناسایی و به‌کارگیری انرژی‌های جایگزین، صورت گرفته اما در این میان نقش پارامترهایی مانند شرایط محیطی، تجهیزات و امکانات برای فرآوری و تبدیل انرژی اولیه به انرژی جایگزین باعث شده تا به‌کارگیری بسیاری از این انرژی‌های جایگزین، به خاطر محدودیت‌های ذکرشده در مقیاس وسیع، عملی نگردد. از این‌رو، نیاز به استفاده از سوخت‌های جایگزین که دارای ویژگی‌هایی از قبیل دسترسی بهتر، نحوه تولید و فرآوری آسان‌تر و سریع‌تر، وجود منابع تولید و آلودگی کمتر، به شدت احساس می‌گردد [۱].

یکی از مهم‌ترین سوخت‌های زیستی، بیودیزل^۱ است. بیودیزل عبارت است از مخلوط استرهای مونوآلکیلی^۲ زنجیره بلند اسیدهای چرب^۳ حاصل از واکنش یک الکل با مواد لیپیدی تجدیدپذیر که منابع مورد نیاز جهت تولید بیودیزل می‌توانند روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی، روغن‌های مستعمل و دورریز پخت‌وپز و یا منابع جدیدی همچون جلبک‌های دریایی^۴ باشند [۳،۲]. ملکوتیان و همکاران بر اساس تحقیقی که بر روی دمای بهینه رشد ریزجلبک برای تولید بیودیزل انجام شد گزارش دادند که ریز جلبک‌ها در محدوده دمایی $25^{\circ}C$ ، حداکثر بازدهی لیپید^۵ و حداکثر تولید بیودیزل را دارا می‌باشند [۴].

امولسیفای کردن^۶ با الکل‌ها نیز به منظور برطرف کردن ویسکوزیته روغن‌های گیاهی به کار می‌رود، لیکن استریفیکه کردن تری‌گلیسریدها با متانول، اتانول، پروپانل و بوتانول امیدبخش‌ترین روش موجود می‌باشد [۵]. جین و همکارانش ابراز داشتند که با افزایش میزان کاتالیزور NaOH در ترانس استری کردن^۷ روغن خوراکی پسماند، بازده متیل استر^۸ تولیدی نیز افزایش می‌یابد و میزان بهینه کاتالیست را ۱ (w/w%) گزارش دادند. افزایش بیش از این مقدار، باعث افزایش بازده تولید نشد [۶]. انسینار و همکاران، کاتالیست‌های هیدروکسید

1. Biodiesel
2. Mono alkyl Esters
3. Fatty Acid
4. Seaweed
5. Lipid
6. Emulsified
7. Transestrification
8. Methyl Ester

9. Ultrasonic Waves
10. Pulse

و ۱/۵ (w/w%) روغن به ترتیب ۰/۲۲، ۰/۴۵ و ۰/۶۷ گرم به دست آمد [۱۷].

ابتدا بشر حاوی روغن در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C بر روی صفحه داغ قرار داده شد. به منظور یکنواخت شدن دما، از مگنت برای هم زدن محلول استفاده شد. کاتالیزور به غلظت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ (w/w%) را در فالكون با متانول با نسبت مولی الکل به روغن ۱:۳، ۱:۶ و ۱:۹ ریخته و بهم زده شد تا کاملاً حل شوند، سپس محلول به دست آمده به داخل روغن ریخته شده و عمل هم‌زدن با ۶۵۰ دور در دقیقه به مدت ۴۵ دقیقه ادامه پیدا کرد بعد از اتمام واکنش، بشر حاوی بیودیزل به مدت ۴ ساعت در جای ساکن قرار گرفت. بعد از گذشت زمان مورد نظر، گلیسرین در ته ظرف ته‌نشین شد. بیودیزل تولید شده را از گلیسرین^۴ جدا کرده و با آب مقطر آنقدر آب‌شویی شد که ناخالصی‌ها از بین رفت و رنگ بیودیزل شفاف گشت [۱۸].

۲.۲. تولید بیودیزل با استفاده از امواج فراصوت

در این فرآیند، ۵۰ سی‌سی از روغن آفتابگردان، کاتالیزور با غلظت ۱٪ و نسبت مولی الکل به روغن ۱:۶ استفاده شد. ابتدا بشر حاوی روغن بر روی صفحه داغ تحت دمای ۳۵°C قرار گرفت، سپس همانند حالت اعمال حرارت، مقدار الکل مورد نظر با مقدار کاتالیزور مشخص شده در فالكون ریخته و آنقدر بهم زده شد تا در یکدیگر حل شدند. برای شروع واکنش ترانس استریفیکاسیون، محتویات فالكون به داخل بشر ریخته شد و زیر پروب^۵ دستگاه جهت اعمال امواج فراصوت در پنج دامنه نوسان^۶ مختلف (۲۰-۱۰۰ درصد) در زمانهای ۳، ۶ و ۹ دقیقه قرار گرفت. بعد از اتمام واکنش محلول به مدت ۴ ساعت در یک جای ساکن قرار داده شد تا به دو فاز مجزا تقسیم و سپس عملیات آب‌شویی انجام گردید.

۳.۲. سنجش و اندازه‌گیری ویژگی‌های بیودیزل

پس از تولید بیودیزل با استفاده از امواج فراصوت و حرارت برای ارزیابی کیفیت محصول تولیدی، خصوصیات مربوط به سوخت تولید شده شامل گرانی، نقطه ابری، نقطه اشتعال، مقدار باقی‌مانده کربن^۷ و مقدار آب باقی‌مانده در سوخت اندازه‌گیری شد. گرانی، اندازه‌گیری مقاومت روغن در برابر سیالیت تحت فشار خاص می‌باشد یا خاصیتی است که سیال به وسیله آن در مقابل تنش برشی مقاومت

شرایط خلأ، برای تولید بیودیزل استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند بهینه شرایط در نسبت مولی ۱:۹/۶۹، غلظت کاتالیزور (w/w%) ۸/۷۷، شدت التراسونیک (w/g) ۴/۶۰ و زمان واکنش ۴۳/۰۳ دقیقه می‌باشد [۱۴]. نجفی و فیض اله زاده، در تحقیقی بر روی تاثیر اتیل استر اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل بر خواص ترموفیزیکی آن به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار اسیدهای چرب اشباع (به ویژه اتیل استتارت) گرانی، ارزش حرارتی و عدد ستان^۱ سوخت افزایش، ولی چگالی آن کاهش می‌یابد [۱۵].

کاک، تهیه بیودیزل از روغن سویا با روش اولتراسونیک توسط دستگاهی به قدرت ۱۰۰۰ W و فرکانس ۲۰kHz به مدت ۳۰ دقیقه را مورد بررسی قرار داد و با روش هم‌زدن مکانیکی مقایسه و گزارش نمود که میزان چگالی بیودیزل با استفاده از اولتراسونیک (g/cm³) ۰/۸۸ و روش مکانیکی (g/cm³) ۰/۸۶، ویسکوزیته در روش التراسونیک (mm²/s) ۶/۰۶ و در روش مکانیکی (mm²/s) ۴/۶۶ به دست آمد. همچنین راندمان تولید بیودیزل در روش فراصوت بیشتر از روش هم‌زدن مکانیکی بوده است [۱۶].

یکی از پارامترهای مهم در تولید بیودیزل، زمان انجام واکنش می‌باشد. به همین دلیل در این پژوهش، به بررسی کمی و کیفی تولید بیودیزل، با استفاده از حرارت در سطوح غلظت کاتالیزور، نسبت مولی الکل به روغن، دما و امواج فراصوت در سطوح زمان و پالس با استفاده از روغن گیاهی آفتابگردان پرداخته شد.

۲. مواد و روش‌ها

در این آزمایش، از هیدروکسید پتاسیم^۲ KOH به‌عنوان کاتالیزور، روغن آفتابگردان ماده اولیه و از متانول^۳ به‌عنوان الکل استفاده شد. همچنین برای تولید بیودیزل با استفاده از امواج فراصوت، دستگاه التراسونیک مدل KS-250F دارای توان ۲۵۰ W و فرکانس ۲۰kHz به‌عنوان منبع فراصوت به کار گرفته شد.

۱.۲. تولید بیودیزل با استفاده از حرارت

به‌منظور تولید سوخت بیودیزل، ۵۰ سی‌سی روغن به کار برده شد. برای استفاده از متانول از نسبت‌های مولی ۳، ۶ و ۹ (w/w%) الکل به روغن استفاده شد. حجم متانول مورداستفاده به ترتیب ۶، ۱۲ و ۱۸ سی‌سی محاسبه گردید. مقدار کاتالیزور شیمیایی در سه نسبت ۰/۵، ۱

4. Glycerin
5. Probe
6. Amplitude
7. Carbon Residue

1. Cetane Number
2. Potassium Hydroxide
3. Methanol

ارائه گردید. با توجه به جدول تجزیه واریانس (۱)، اثر دامنه نوسان و زمان واکنش بر روی وزن گلیسرین در با احتمال ۱٪ معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل دامنه نوسان و زمان بر روی مقدار وزن گلیسرین با احتمال ۱٪ نیز معنی‌دار شد.

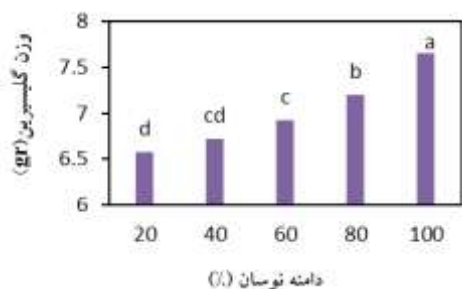
جدول (۱): تجزیه واریانس تولید بیودیزل با استفاده از امواج فراصوت بر وزن گلیسرین.

میانگین مربعات		منبع تغییرات
وزن	درجه آزادی	
**۰/۶۳۶۵۹	۴	نوسان
**۰/۲۶۰۵۸	۲	زمان
**۰/۴۴۷۴۳	۸	نوسان×زمان
۰/۰۷۸۶۵	۳۰	خطا
۸		ضریب تغییرات

ns و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار با احتمال ۵ و ۱ درصد

اثر دامنه نوسان پالسی بر وزن گلیسرین با استفاده از امواج فراصوت در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱) با افزایش دامنه نوسان میزان وزن گلیسرین به میزان ۱۶٪ افزایش پیدا کرده است. به طوری که در میان پنج دامنه مورد بررسی، دامنه نوسان پالسی ۱۰۰ درصد با میانگین ۷/۶۵ گرم بیشترین افزایش و پالس ۲۰ درصد با میانگین ۶/۵۷ گرم کمترین تاثیر را بر افزایش وزن گلیسرین داشتند.

افزایش دامنه نوسان پالسی سبب افزایش درصد تبدیل بیودیزل شده است به دلیل اینکه زمان این تیمار تحت امواج فراصوت در زمان محدود افزایش یافت که نتیجه به دست آمده با یافته‌های جی و همکاران مطابقت دارد [۲۳]. جیانینگ و همکاران، به این نتیجه رسیدند که فرکانس پالس ۱۰۰ درصد می‌تواند امولسیون قوی از متانول-روغن را در یک زمان کوتاه القا کند. همچنین دامنه نوسان ۴۰ و ۶۰ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.



شکل (۱): تأثیر دامنه نوسان بر وزن گلیسرین با اعمال امواج فراصوت.

می‌کند [۱۹]. برای اندازه‌گیری گرانشوری از استاندارد D445 ASTM استفاده شد. نقطه ابری^۱ دمایی است که اولین شبکه‌های مومی در داخل سوخت ایجاد می‌شود. همچنین برای تضمین عملکرد مطلوب موتور در دماهای پایین بسیار اهمیت دارد چراکه احتمال گرفتگی سیستم سوخت‌رسانی افزایش می‌یابد [۲۰]. نقطه ابری مطابق با استاندارد ASTM^۲ D2500 اندازه‌گیری شد.

دمای نقطه‌ی اشتعال^۳، حداقل دمایی است که به هنگام استفاده از یک منبع احتراق در شرایط خاص، سوخت در معرض آتش‌سوزی قرار می‌گیرد. به عبارتی دیگر حداقل دمای ضروری برای ایمنی مناسب در هنگام استفاده از سوخت می‌باشد. نقطه‌ی اشتعال به‌وضوح با نوسان‌پذیری سوخت متفاوت است و مطابق با استاندارد ASTM D-93 اندازه‌گیری می‌شود [۲۱]. باقی‌مانده کربن، میزان رسوبات کربن پس از احتراق می‌باشد [۲۲]. بنابراین یکی از خصوصیات مهم سوخت بیودیزل است. این آزمون با استاندارد ASTM D4530 اندازه‌گیری شد. آب اضافی می‌تواند منجر به فرسایش شیمیایی شده و سبب تولید میکروارگانیزم در سوخت بیودیزل شود. عدم دقت در حین حمل‌ونقل و ذخیره، تکنیک‌های غیر استاندارد و یا ضعیف، می‌تواند سبب افزایش آب موجود در بیودیزل گردد [۱۱]. برای اندازه‌گیری مقدار آب موجود در سوخت از استاندارد ASTM D2709 استفاده شد.

در تولید بیودیزل با استفاده از حرارت، اثر تغییرات غلظت کاتالیزور (۰/۵، ۱ و ۱/۵ w/w%)، نسبت مولی الکل به روغن (۳، ۶ و ۹) و درجه حرارت (۴۰، ۵۰ و ۶۰°C) بررسی شد. امواج فراصوت در پنج دامنه نوسان پالسی مختلف (۲۰-۱۰۰ درصد) در زمان واکنش ۳، ۶ و ۹ دقیقه اعمال شد. طرح آزمایشی مورداستفاده در این تحقیق، فاکتوریل کاملاً تصادفی با سه تکرار می‌باشد. از نرم‌افزار Genstat در تحلیل داده‌ها و از نرم‌افزار Excel برای رسم نمودارهای مرتبط استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. اثر امواج فراصوت

نتایج جدول تجزیه واریانس اثر دامنه نوسان، زمان تحت عملیات فراصوت و اثر متقابل آن‌ها بر روی وزن گلیسرین در جدول (۱)

1. Cloud Point
2. American Society for Testing and Material
3. Flash Point

۲.۳. اثر حرارت

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر غلظت کاتالیزور، نسبت مولی الکل به روغن، دمای واکنش و اثر متقابل آن‌ها بر روی وزن گلیسرین در جدول (۲) ارائه گردید. جدول تجزیه واریانس (۲) نشان می‌دهد که اثر همه پارامترها با احتمال ۱٪ معنی‌دار شد و فقط اثر متقابل نسبت مولی و دما معنی‌دار نشد.

جدول (۲): تجزیه واریانس تولید بیودیزل با استفاده از حرارت بر وزن گلیسرین.

منبع تغییرات	میانگین مربعات	درجه آزادی	وزن
غلظت	**۱۷/۹۲۰۸	۲	
نسبت مولی	**۲۵۲/۹۷۳۶	۲	
دما	**۵/۷۶۶۴	۲	
غلظت × نسبت مولی	**۱۶/۹۰۹۶	۴	
غلظت × دما	**۰/۵۳۷	۴	
نسبت مولی × دما	^{ns} ۰/۶۸۷	۴	
غلظت × نسبت مولی × دما	**۰/۹۹۰	۸	
زمان			
خطا	۰/۵۵۳۹	۵۴	

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار با احتمال ۵ و ۱ درصد

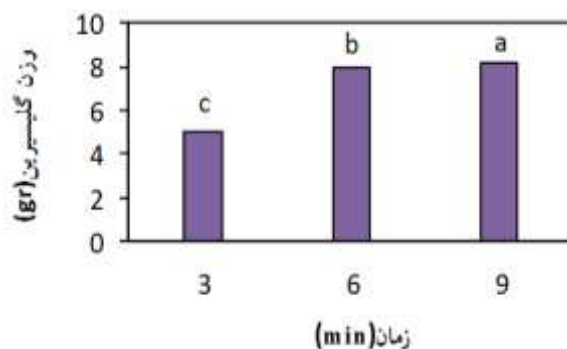
۳.۳. غلظت کاتالیزور

شکل (۴) اثر غلظت کاتالیزور بر وزن گلیسرین با اعمال حرارت را نشان می‌دهد. اثر غلظت کاتالیزور بر وزن گلیسرین با احتمال ۱٪ معنی‌دار بود. با توجه به شکل (۴) کاتالیزور ۱٪ با میانگین ۶/۴۵ بیشترین و کاتالیزور ۰/۵٪ با میانگین ۴/۲۶ کمترین تأثیر را بر وزن گلیسرین داشتند. با افزایش غلظت کاتالیزور از ۰/۵٪ به ۱٪ وزن گلیسرین به میزان ۵۱٪ افزایش یافته، زیرا با افزایش غلظت کاتالیزور میزان تبدیل تری‌گلیسرید نیز افزایش می‌یابد به همین دلیل اگر مقدار کاتالیزور در واکنش ناکافی باشد میزان تبدیل تری‌گلیسرید به استرهای اسید چرب ناقص می‌شود.

هاناسکاران و هارمندیرا، برای تولید بیودیزل در چهار غلظت ۰/۵، ۱/۵، ۲ و ۳ (w/w%) به این نتیجه رسیدند که میزان بازده تولید بیودیزل از ۰/۵٪ به ۱٪ به‌طور چشمگیری افزایش یافت. اما با افزایش غلظت کاتالیزور تا ۱/۵٪ مقدار وزن گلیسرین به میزان ۳۲٪ کاهش یافت به این علت که اگر مقدار کاتالیزور بازی در واکنش از حد بهینه بیشتر گردد، باعث تولید صابون در واکنش می‌شود بنابراین میزان

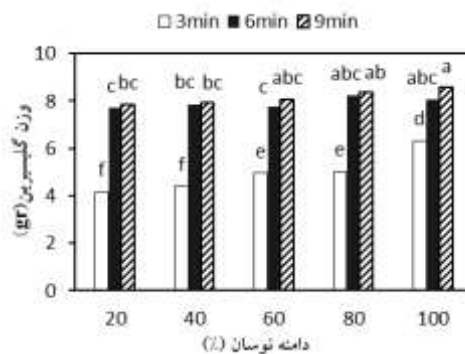
اثر زمان واکنش بر وزن گلیسرین با اعمال امواج فراصوت در شکل (۲) ارائه گردید. با توجه به شکل (۲) با افزایش زمان، میزان وزن گلیسرین نیز به میزان ۶۴٪ افزایش یافت به‌طوری که زمان ۹ دقیقه با میانگین ۸/۱۵ گرم بیشترین و زمان ۳ دقیقه با میانگین ۴/۹۷ گرم کمترین تأثیر را بر وزن گلیسرین داشتند. زیرا با افزایش مدت زمان واکنش، میزان تحت تابش بودن مخلوط واکنش افزایش می‌یابد و به همان نسبت اثرات امواج فراصوت بر مخلوط افزایش می‌یابد.

فیاضی و همکاران، برای تولید بیودیزل با چربی مرغ توسط امواج فراصوت به این نتیجه رسیدند که با افزایش زمان از ۳ تا ۹ دقیقه میزان تولید بیودیزل افزایش یافت. واکنش پس از ۳ دقیقه پیشرفت قابل توجهی می‌یابد و با گذشت زمان پیشرفت واکنش کاهش می‌یابد که تایید کننده نتایج این پژوهش می‌باشد [۲۴].



شکل (۲): تأثیر زمان واکنش بر وزن گلیسرین با اعمال امواج فراصوت.

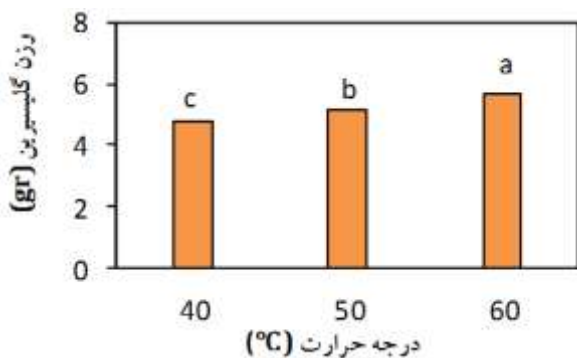
شکل (۳) اثر متقابل دامنه نوسان و زمان بر مقدار وزن گلیسرین را نشان می‌دهد. مطابق شکل، بیشترین مقدار وزن گلیسرین در زمان ۹ دقیقه و پالس ۱۰۰ درصد می‌باشد. همچنین کمترین وزن گلیسرین در زمان ۳ دقیقه و دامنه نوسان پالسی ۲۰ و ۴۰ درصد می‌باشد. همچنین نشان می‌دهد بین پالس‌های ۶۰ و ۸۰ درصد در زمان ۳ دقیقه اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.



شکل (۳): اثر متقابل دامنه نوسان و زمان بر وزن گلیسرین با اعمال امواج فراصوت.

۵.۳. دمای واکنش

شکل (۶) اثر دما بر وزن گلیسرین در تولید بیودیزل با استفاده از حرارت را نشان می‌دهد. با توجه به جدول تجزیه واریانس (۲) اثر دما بر وزن گلیسرین با احتمال ۱٪ معنی‌دار می‌باشد. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود با افزایش دما میزان وزن گلیسرین به مقدار ۱۹٪ افزایش یافت. دمای ۴۰°C با میانگین ۴/۷۶ گرم کمترین اثر را بر وزن گلیسرین داشت. زیرا هنگامی که درجه حرارت کاهش یابد، سرعت واکنش نیز کاهش می‌یابد و بنابراین میزان تبدیل در حرارت پایین، کمتر می‌شود. دمای ۶۰°C با میانگین ۵/۶۸ گرم بیشترین میزان وزن گلیسرین را داشت. زیرا با افزایش دما، ویسکوزیته کاهش می‌یابد، سرعت واکنش افزایش و به دنبال آن بازده بیودیزل افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش بیش‌ازحد دما، باعث تبخیر شدن متانول می‌شود. هاناسکاران و هارمندیرا، تولید بیودیزل را در سه دمای ۵۰، ۵۵ و ۶۰°C آزمایش کردند و به این نتیجه رسیدند که دمای ۵۰°C کمترین و دمای ۶۰°C بهترین عملکرد را دارد که تاییدکننده نتایج این پژوهش می‌باشد [۲۵].

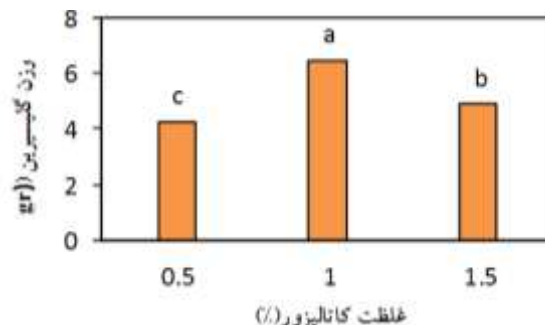


شکل (۶): اثر دما بر وزن گلیسرین با اعمال حرارت.

۶.۳. غلظت کاتالیزور و نسبت مولی

در شکل (۷) اثر متقابل غلظت کاتالیزور و نسبت مولی الکل به روغن بر روی وزن گلیسرین نشان داده شده است. همانطور که در جدول (۲) گفته شد اثر متقابل غلظت کاتالیزور و نسبت مولی الکل به روغن با احتمال ۱٪ اثر معنی‌داری بر روی وزن گلیسرین داشت. با توجه به شکل (۷) بیشترین مقدار گلیسرین در کاتالیزور ۱٪ و نسبت مولی الکل به روغن ۱:۶ می‌باشد و همچنین کمترین مقدار گلیسرین در نسبت مولی الکل به روغن ۱:۳ و کاتالیزور ۱/۵٪ بود. همچنین با توجه به شکل نشان می‌دهد که بین نسبت مولی الکل به روغن ۱:۳ و ۱:۶ در غلظت ۰/۵٪ اثر معنی‌داری وجود ندارد. همچنین در کاتالیزور ۱٪ میزان وزن گلیسرین در نسبت مولی الکل به روغن ۱:۶ عملکرد بیشتری در مقایسه با نسبت مولی ۱:۹ داشت. زیرا با افزایش الکل از

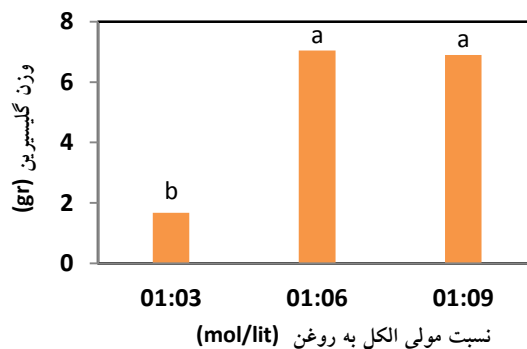
تبدیل کاهش می‌یابد که با نتایج تحقیق هاناسکاران و هارمندیرا نیز مطابقت داشت. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کاتالیزور ۱٪ بیشترین میزان تبدیل را دارا بود که تایید کننده نتایج این پژوهش می‌باشد [۲۵].



شکل (۴): اثر غلظت کاتالیزور بر وزن گلیسرین با اعمال حرارت.

۴.۳. نسبت مولی الکل به روغن

اثر سه نسبت مولی الکل به روغن ۱:۳، ۱:۶ و ۱:۹ بر وزن گلیسرین با اعمال حرارت در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که در جدول تجزیه واریانس (۲) بیان شد، نسبت مولی الکل به روغن بر وزن گلیسرین اثر کاملاً معنی‌داری با احتمال ۱٪ داشت. با توجه به شکل (۵) تفاوتی از نظر آماری در میزان وزن گلیسرین در نسبت‌های مولی الکل به روغن ۱:۶ و ۱:۹ وجود ندارد بنابراین بیشترین مقدار گلیسرین در نسبت ۱:۶ و ۱:۹ و کمترین مقدار در نسبت ۱:۳ می‌باشد.



شکل (۵): اثر نسبت مولی بر وزن گلیسرین با اعمال حرارت.

با افزایش نسبت الکل به روغن از ۳ به ۶ وزن گلیسرین به مقدار بیش از سه برابر افزایش یافته و به میزان حداکثر می‌رسد، زیرا این افزایش نسبت مولی، باعث کامل شدن واکنش تبدیل استر بیشتری می‌شود. که با نتایج تحقیق لئونگ و جیو در آزمایشی با روغن کانولا مطابقت داشت [۲۶]. همچنین در مقایسه نسبت‌های مولی ۱:۶ و ۱:۹ الکل به روغن می‌توان نتیجه گرفت که با لحاظ کردن هزینه اقتصادی نسبت ۱:۶ گزینه مناسب‌تری می‌باشد.

۸.۳. بررسی ویژگی‌های کیفی بیودیزل

برای استفاده از سوخت بیودیزل در موتورهای دیزلی، باید خواص بیودیزل تولیدشده با استانداردهای بین‌المللی مطابقت داشته باشد. بنابراین پس از تولید بیودیزل و اندازه‌گیری خواص آن، سوخت‌های بیودیزل با استاندارد بین‌المللی ASTM-D6751 مطابقت داده شدند [۲۷]. پس از به دست آوردن مقدار بیودیزل تولیدی با استفاده از حرارت و امواج فراصوت، ویژگی‌های کیفی آن‌ها بر اساس استاندارد ASTM مربوطه اندازه‌گیری و در جداول (۳) و (۴) نشان داده شد.

۱.۸.۳. گرانی

گرانی نقش اساسی در پاشش سوخت و فرایند احتراق در موتور دارد. مطابق جدول (۳) و (۴) گرانی بیودیزل تولید شده با اعمال حرارت $5/2 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ و امواج فراصوت $4/11 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ می‌باشد که نشان می‌دهد گرانی بیودیزل تولیدشده توسط امواج فراصوت نسبت به بیودیزل تولیدشده توسط حرارت حدوداً ۲۷ درصد کمتر است لذا این کاهش ویسکوزیته در امواج فراصوت منجر به عدم اختلال در سیستم سوخت‌رسانی و انژکتورها می‌گردد [۱۲].

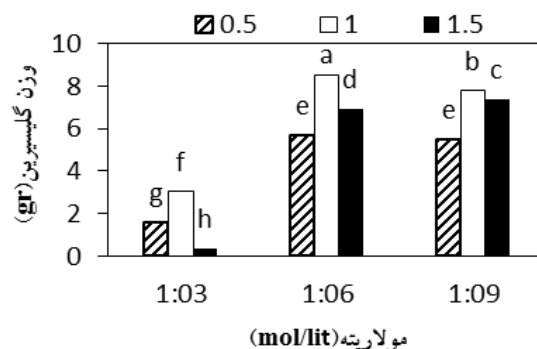
۲.۸.۳. نقطه ابری

نقطه ابری یک ویژگی برای توصیف قابلیت کارکرد سوخت در دماهای پایین است. همان‌طور که در جداول (۳) و (۴) مشاهده می‌شود نقطه ابری سوخت تولیدشده با استفاده از حرارت و امواج فراصوت به ترتیب 2°C و 7°C می‌باشد. سوخت تولید شده با استفاده از حرارت پایین‌ترین مقدار را دارد که موجب افزایش کارایی موتور در دماهای پایین‌تر می‌گردد [۲۸].

۳.۸.۳. نقطه اشتعال

نقطه اشتعال، حداقل دمایی است که در هنگام استفاده از یک منبع احتراق در شرایط خاص، سوخت در معرض آتش‌سوزی قرار می‌گیرد. با توجه به جداول (۳) و (۴) نقطه اشتعال اندازه‌گیری شده برای سوخت بیودیزل با استفاده از حرارت و امواج فراصوت به ترتیب 169°C و 185°C می‌باشد که نشان می‌دهد نقطه اشتعال سوخت تولیدشده توسط امواج فراصوت حدوداً ۹ درصد نسبت به استفاده از حرارت افزایش یافته است. این افزایش می‌تواند به این دلیل باشد که استفاده از امواج فراصوت به دلیل داشتن تماس بهتر بین واکنش‌دهنده‌ها، باعث مصرف مؤثر متانول و به دنبال آن کاهش مقدار

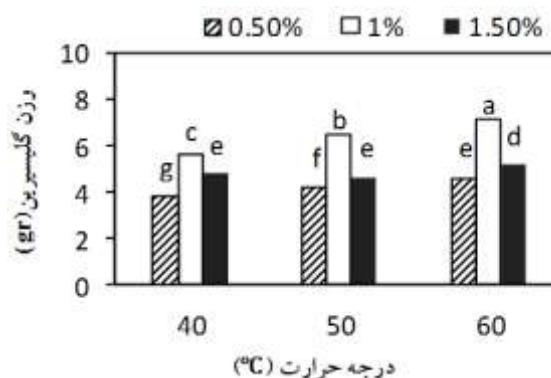
مقدار بهینه به دلیل وجود الکل اضافی مدت زمان بیشتری صرف جداسازی می‌شود و میزان بازده را افزایش نمی‌دهد و فقط هزینه بازیافت الکل را افزایش می‌دهد که با مطالعات پیشین نیز مطابقت داشت [۲۶].



شکل (۷): اثر نسبت مولی الکل به روغن و غلظت کاتالیزور بر وزن گلیسرین با اعمال حرارت.

۷.۳. غلظت کاتالیزور و دما

شکل (۸) اثر متقابل غلظت و دما بر وزن گلیسرین را نشان می‌دهد. با توجه به شکل بیشترین مقدار گلیسرین در دمای 60°C و غلظت ۱٪ بود. همچنین کمترین مقدار گلیسرین در دمای 40°C و غلظت ۰/۵٪ بود.



شکل (۸): اثر دما و غلظت کاتالیزور بر وزن گلیسرین با اعمال حرارت.

با توجه به شکل اثر متقابل غلظت و دما نشان می‌دهد که بین دماهای 40°C و 50°C در غلظت ۱/۵٪ و دمای 60°C در غلظت ۰/۵٪ تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. بنابراین می‌توان گفت زمانیکه میزان کاتالیزور از حد بهینه بیشتر شد (شکل ۴) بدلیل صابونی شدن واکنش، تغییر دما اثری بر وزن گلیسرین ندارد و هنگامیکه مقدار کاتالیزور از بهینه کمتر شد، حتی افزایش دما هم اثری بر وزن گلیسرین نخواهد داشت.

متانول در واکنش شد. بنابراین استفاده از آن می‌تواند باعث کارکرد منظم‌تر موتور و ایمنی بیشتر گردد [۲۹].

جدول (۳): مشخصات سوخت بیودیزل تولیدشده توسط حرارت.

متانول در واکنش شد. بنابراین استفاده از آن می‌تواند باعث کارکرد منظم‌تر موتور و ایمنی بیشتر گردد [۲۹].

جدول (۳): مشخصات سوخت بیودیزل تولیدشده توسط حرارت.

مشخصه	استاندارد ASTM	واحد	محدوده استاندارد	مقدار اندازه‌گیر ی شده
گرانروی در ۴۰°C	D 445	mm ² /s	۱/۹-۶	۵/۲
نقطه ابری	D 2500	°C	-	-۲
نقطه اشتعال	D 93	°C	حداقل ۹۳	۱۶۹
کربن باقیمانده	D 4530	%جرم	حداکثر ۰/۰۵	۰/۰۳
آب	D 2709	%حجم	حداکثر ۰/۰۵۰	۰/۰۴

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی تولید بیودیزل از روغن آفتابگردان با بکارگیری امواج فراصوت و حرارت و مقایسه کمی و کیفی آن‌ها پرداخته شد. نتایج حاصله به شرح ذیل می‌باشد:

جدول (۴): مشخصات سوخت بیودیزل تولیدشده با اعمال امواج فراصوت.

مشخصه	استاندارد ASTM	واحد	محدوده استاندارد	مقدار اندازه‌گیر ی شده
گرانروی در ۴۰°C	D 445	mm ² /s	۱/۹-۶	۴/۱۱
نقطه ابری	D 2500	°C	-	۷
نقطه اشتعال	D 93	°C	حداقل ۹۳	۱۸۵
کربن باقیمانده	D 4530	%جرم	حداکثر ۰/۰۵	۰/۰۲
آب	D 2709	%حجم	حداکثر ۰/۰۵۰	۰/۰۳۸

- تولید بیودیزل با استفاده از حرارت، شرایط بهینه برای تولید بیودیزل غلظت کاتالیزور ۱٪، دمای ۶۰°C و نسبت مولی الکل به روغن ۱:۶ بود و میانگین وزن گلیسرین در این شرایط ۸/۹۶ گرم بدست آمد.

- بهینه شرایط برای تولید بیودیزل با استفاده از امواج فراصوت، زمان ۹ دقیقه و دامنه نوسان پالسی ۱۰۰ درصد بود که مقدار میانگین وزن گلیسرین در این شرایط ۸/۵۶ گرم محاسبه گردید.

- خصوصیات اندازه‌گیری شده بیودیزل تولیدی با بکارگیری حرارت و امواج فراصوت، در محدوده استاندارد ASTM قرار دارند و می‌توان از آن به‌عنوان سوخت استاندارد در موتور استفاده نمود. بیودیزل تولیدشده توسط امواج فراصوت در برخی خصوصیات شامل نقطه اشتعال حدوداً به میزان ۹٪ افزایش، گرانروی به مقدار ۲۷٪، کربن باقی‌مانده به میزان ۵۰٪ و مقدار آب موجود در سوخت به میزان ۵٪ کاهش یافت. نقطه ابری بیودیزل تولیدشده با اعمال حرارت به مقدار ۲°C- و امواج فراصوت حدود ۷°C به دست آمد.

- بنابراین تولید بیودیزل با استفاده از امواج فراصوت نسبت به استفاده از حرارت مناسب‌تر است. زیرا زمان کمتری برای تولید بیودیزل نیاز است و همچنین از لحاظ خصوصیات کیفی سوخت نیز ارجحیت دارد.

۴.۸.۳. میزان کربن

کربن باقی‌مانده، به میزان رسوبات کربن بعد از احتراق سوخت اطلاق می‌گردد. بنابراین یکی از خصوصیات مهم سوخت بیودیزل می‌باشد. مطابق جداول (۳) و (۴) میزان کربن باقی‌مانده اندازه‌گیری شده برای سوخت تولیدشده با استفاده از حرارت و تابش امواج فراصوت به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۰۲ می‌باشد، که نشان می‌دهد میزان کربن بیودیزل تولیدشده توسط امواج فراصوت ۵۰٪ درصد نسبت به اعمال حرارت کاهش یافته است. این کاهش در افزایش طول عمر سیستم احتراق، نقش به‌سزایی دارد، زیرا خاکستر حاوی رسوبات معدنی و اکسیدهای فلزی حل‌شده در سوخت است که مقدار زیاد آن در سوخت‌های مایع موجبات فرسودگی قسمت‌های متحرک سیستم احتراق را فراهم می‌سازد [۲۸].

۴.۸.۳. مقدار آب موجود در سوخت

وجود آب باعث رشد خوردگی و رشد میکروبی در سوخت می‌گردد. سوخت باید در ظاهر روشن و بدون آب باشد. بنابراین یکی دیگر از

- [1] <http://www.ieeo.org> > www.ieeo.org.
- [۲] عتابی، فریده، اژدری، مریم، «استفاده از بیودیزل به عنوان یک سوخت سبز». دومین همایش مدیریت پساب و پسماند در صنایع نفت و انرژی، تهران، ۱۳۹۰.
- [۳] هالک، فرح سادات، دلآوری، آرمین، کاوشی رحیم، علی، «مقایسه خواص فیزیکی و شیمیایی بیودیزل حاصل از روغن کرچک با استفاده از کاتالیستهای بازی، اسیدی و نانو اکسید منیزیم»، همایش ملی جریان و آلودگی هوا، تهران، ۱۳۹۱.
- [۴] ملکوتیان، محمد، حاتمی، بهنام، دولتشاهی، شیدوش، رجیبی، احمد، «تعیین دمای بهینه رشد ریزجلبک نانوکلوپوسیس اوکولاتا برای تولید سوخت سبز (بیودیزل)»، مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۶۹-۶۲، ۱۳۹۳.
- [5] Demirbas, A.H. and Demirbas, I., "Imotance of Rural Bioenergy for Developing Countries", Energy Conversion and Management, 48, pp. 2386-2398, 2007.
- [6] Jain, S., Sharma, M.P. and Rajvanshi S., "Acid Base Catalyzed Transestrification Kinetics of Waste Cooking Oil ", Fuel Processing Technology, 92, pp. 32-38, 2011.
- [7] Encinar, J.M., Gonzalez J.F., and Rodriguez-Reinares, A., "Biodiesel From Used Frying Oil, Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel", Industrial and Engineering Chemistry Research, 44, pp. 91-9, 2005.
- [۸] انصاریاردلی، مهدی، صدرعاملی، مجتبی، قبادیان، برات، شاملوعلی آبادی، محمدرضا، «تولید دیزل زیستی (بیودیزل) از ضایعات کشتارگاهی دام و طیور». مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۲۴-۳۱، ۱۳۹۴.
- [9] Ji, J., wang, J., Li, Y., yu, Y. and Xu Z., "Preparation of Biodiesel with the Help of Ultrasonic and Hydrodynamic Cavitation", Ultrasonic, Vol. 44, pp. 411-414, 2006.
- [10] Stavarache, C., Vinatoru, M., Nishimura, R., Maeda, Y., Conversion of Vegetable Oil to Biodiesel Using Ultrasonic Irradiation. Chemistry Letters, Vol. 32, No. 8, pp. 716-717, 2003.
- [11] Hingu, S.M., Gogate, P.R. and Rathod, V.K., "Synthesis of Biodiesel From Waste Cooking Oil Using Sonochemical Reactors". Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 17, pp. 827-832, 2010.
- [12] Leonardo S.G., Teixeira, Júlio C.R., Assis, Daniel R. Mendonça, Iran T.V. Santos, Paulo R.B. Guimarães, Luiz A.M. Pontes, Josanaide S.R. Teixeira. "Comparison Between Conventional and Ultrasonic Preparation of Beef Tallow Biodiesel". Fuel Processing Technology, Vol. 90, pp. 1164-1166, 2009.
- [13] Hosseinzdeh Samani, B., Zareiforush, H., Lorigooini, Z., Ghobadian, B., Rostami, S. and Fayyazi, F., "Ultrasonic-assisted Production of Biodiesel from Pistacia Atlantica Desf. Oil". Fuel, Vol. 168, pp. 22-26, 2016.
- [14] Jookjantra, K. and Wongwuttanasatian, T., "Optimization of Biodiesel Production from Refined Palm Oil with Heterogeneous CaO Catalyst Using Pulse Ultrasonic Waves Under a Vacuum Condition". Energy Conversion and Management, Vol. 154, pp. 1-10, 2017.
- [۱۵] نجفی، بهمن، فیض‌الله‌زاده اردبیلی، سینا، «تاثیر اتیل استر اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل بر خواص ترموفیزیکی آن»، سوخت و احتراق، دوره ۹، شماره ۲، صفحه ۱۳۳-۱۲۱، ۱۳۹۵.
- [16] Koc, A.B. and McKenzie, E.H., "Effects of Ultrasonication on Glycerin Separation during Transesterification of Soybean Oil". Fuel Processing Technology, Vol. 91, pp. 743-748, 2010.
- [۱۷] هاشمی‌نژاد، امیر، «طراحی، ساخت و ارزیابی راکتور تولید بیودیزل از روغن پسماند آشپزخانه»، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، صفحه ۴۶، ۱۳۹۳.
- [۱۸] شاه‌بازاده، ساحل، «اثر پوسته تخم‌مرغ به عنوان کاتالیزور بر خواص کمی و کیفی بیودیزل استحصالی از روغن پسماند آشپزخانه و مقایسه آن با کاتالیزور بازی»، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، صفحه ۲۴، ۱۳۹۵.
- [۱۹] علی‌نظری، مومن، «تعیین ویژگی‌های سوختی روغن کلزا به عنوان بیودیزل»، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ۱۳۸۷.
- [20] Lang, X., Dalai, A.K., and Bakhshi, N.N., "Preparation and Characterization of Biodiesel from Various Bio-oil", Bioresource Technology, 80, pp. 53-62, 2001.
- [21] www.enginemanufacturers.org. "Test Specifications for Biodiesel Fuel". May 31, 2006.
- [22] Heinrich, P. and Manfred, W., "Standardisation of Biodiesel on a European Level". Federal Institute of Agricultural Engineering (BLT) A-3250 Wieselburg. AUSTRIA, 3rd European Motor Biofuels Forum 10-13, Brussels, 1999.
- [23] Ji J, Wang J, Li Y, Yu Y. and Xu Z. "Preparation of Biodiesel with the Help of Ultrasonic and Hydrodynamic Cavitations", Ultrasonics, 44, pp. 411-414, 2006.
- [24] Fayyazi, E., Ghobadian, B., Najafi, G., Hosseinzadeh, B., Mamat R. and Hosseinzadeh, J., "An Ultrasound-assisted System for the Optimization of Biodiesel Production from Chicken Fat Oil Using a Genetic Algorithm and Response Surface Methodology". Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 26, pp. 312-320, 2015.
- [25] Hanasekaran, K.D. and harmendirakumar, M.D., "Optimization Study of Biodiesel Used Frying Oil", International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, Vol. 2, pp. 727-735, 2014.
- [26] Leung D.Y.C. and Guo, Y." Transesterification of Neat and Use Production", Fuel Processing Technology, Vol. 87, pp. 883-890, 2006.
- [27] Van Gerpen, J., Shanks, B. and Pruszko, R., "Biodiesel Production Technology", Iowa state university, (2002-2004).
- [۲۸] باخدا، حسین، الماسی، مرتضی، مینایی، سعید، مشهدی میقانی، حمید، «بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متیل استر منداب

به‌عنوان سوخت بیودیزل»، یافته‌های نوین کشاورزی، دوره ۱،

شماره ۲، صفحه ۱۴۹-۱۴۱، ۱۳۸۵

Quality Evaluation of Biodiesel Produced through Ultrasound-assisted Heterogeneous Catalytic System", Fuel Processing Technology, Vol. 97, pp. 1-8, 2012.

[29] Salamatnia, B., Zuhairi Abdullah A. and Bhatia, S., "