

## تولید بیودیزل از روغن ضایعات ماهی به کمک ترکیب همزن مکانیکی و ریزموج

ندا یاری<sup>۱</sup>، مصطفی مصطفایی<sup>۲\*</sup>، لیلا ندرلو<sup>۳</sup> و سید محمد صفی‌الدین اردبیلی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، yarineda527@yahoo.com

۲- استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، b.mostafaei@razi.ac.ir

۳- استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، lnaderloo@gmail.com

۴- استادیار، مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، m.safieddin@scu.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۲۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۶/۸/۱۴، پذیرش: ۹۶/۸/۱۵)

**چکیده:** در تحقیق حاضر، هدف تولید بیودیزل از روغن ضایعات ماهی و متانول و استفاده از ترکیب همزن و ریزموج به عنوان تکنیکی برای سرعت بخشیدن به این امر است. در انجام این تحقیق از سامانه ریزموج استفاده شد که شامل منبع ریزموج، همزن، لوله مارپیچی و دکانتور است. به کمک این سامانه اثر عوامل نسبت مولی الکل به روغن (۴ به ۱، ۶ به ۱ و ۸ به ۱)، غلظت کاتالیزور (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی روغن)، زمان همزنی (۵، ۱۵ و ۲۵ دقیقه) و زمان میکروویو (۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ دقیقه) بر روی درصد تبدیل اسیدهای چرب به متیل استر بررسی شد. برای تجزیه و تحلیل نتایج از روش سطح پاسخ (RSM) و طرح باکس بنکن (Box Behnken) در نرم افزار Deisign Exeprt استفاده شد. پس از تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی واکنش تولید بیودیزل مشخص شد که بیشترین درصد تبدیل بیودیزل (۹۲/۶۲) در غلظت کاتالیزور ۱/۱۳ درصد، زمان واکنش ۲۴/۶۱ دقیقه، نسبت مولی الکل به روغن ۵/۹۱ و زمان میکروویو ۰/۵ دقیقه به دست آمد. مدل رگرسیونی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (درصد تبدیل) به صورت معادله درجه دوم با ضریب تبیین  $R^2=0/9952$  به دست آمد.

**کلیدواژگان:** بیودیزل، روغن ضایعات ماهی، ترانس استریفیکاسیون، ریزموج، روش سطح پاسخ

### مقدمه

در دهه‌های اخیر، جهان وضعیت پرمخاطره‌ای را از لحاظ مصرف سوخت‌های فسیلی، نظیر ذغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و مشتقات نفتی، همچون بنزین و گازوییل، تجربه کرده است [۱]. به طوری که ۸۰ درصد نیاز انرژی جهان از طریق همین منابع فسیلی تأمین می‌شود که ۵۸ درصد آن به تنهایی در بخش حمل‌ونقل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. بیودیزل (به عبارت دیگر آلکیل استرهای اسید چرب)، که جایگزین سوخت دیزل شده است، نوع دیگری از سوخت محترق است که می‌تواند به عنوان سوخت جایگزین برای موتورهای استفاده شده که از منابع تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی و چربی‌هایی که عمدتاً توسط تری‌گلیسریدها تشکیل شده‌اند تولید می‌شود [۳-۵]. مزایای اصلی استفاده از بیودیزل عبارت‌اند از: تجدیدپذیری، مقطع انتشار کم‌تر، نقطه اشتعال بالا، روانکاری عالی و عدد ستان برتر آن [۶، ۷]. با توجه به شباهت فرمول شیمیایی بیودیزل حاصل از روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی با سوخت دیزل، بسیاری از محققان در حال مطالعه به کارگیری بیودیزل به عنوان سوخت موتور دیزل‌اند [۸]. مواد اولیه غیرخوراکی مانند ضایعات چربی حیوانی به تازگی به عنوان جایگزین‌های روغن‌های گیاهی در تولید بیودیزل افزایش محبوبیت داشته‌اند [۹]. گرانبوی بالا، ترکیب اسید و مقدار اسید چرب آزاد در این نوع روغن‌ها موجب بروز مشکلاتی مانند ته‌نشین شدن کربن و تشکیل صمغ در طول احتراق مستقیم در موتورهای می‌شود [۸]. به منظور تولید سوخت

بیودیزل، مولکول‌های روغن به اجزای ساده‌تری شکسته می‌شود تا قابل استفاده در موتور باشد. برای تولید بیودیزل سه روش شناخته‌شده وجود دارد: میکرومولسیون<sup>۱</sup>، پیرولیز<sup>۲</sup> و ترانس‌استریفیکاسیون<sup>۳</sup> [۱۰]. از بین این روش‌ها، ترانس‌استریفیکاسیون کاربرد بیشتری در تحقیقات و تولید صنعتی بیودیزل دارد. از واکنش ترانس‌استریفیکاسیون، علاوه بر تولید آلکیل استر، بیشتر به‌عنوان روشی برای کاهش گرانشی چربی‌های حیوانی و روغن‌های گیاهی استفاده می‌شود. در این روش، روغن یا تری‌گلیسیرید با الکل در حضور کاتالیزور مناسبی واکنش می‌دهد [۱۱-۱۳]. الکل‌های مناسب برای انجام واکنش ترانس‌استریفیکاسیون متانول، اتانول، پروپانول و بوتانول اند [۱۴، ۱۵]. ترانس‌استریفیکاسیون را می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی کرد: ترانس‌استریفیکاسیون با کاتالیزور، ترانس‌استریفیکاسیون بدون کاتالیزور.

روش ترانس‌استریفیکاسیون با کاتالیزور، با توجه به نوع کاتالیزور به‌کاررفته، می‌تواند به همگن<sup>۴</sup>، ناهمگن<sup>۵</sup> و کاتالیزور آنزیمی<sup>۶</sup> گروه‌بندی شود. ترانس‌استریفیکاسیون بدون کاتالیزور (فرایند فوق بحرانی<sup>۷</sup>) برای کاهش مسایل مهم در فرایند تولید و پایین‌آوردن هزینه تولید به‌کار می‌رود [۱۶، ۱۷]. استفاده از کاتالیزور همگن قلیایی متداول‌ترین روش تولید بیودیزل است. به‌منظور کاهش زمان عملکرد راکتور و حصول بالاترین بازده ممکن، از روش‌های کمک‌کننده به ترانس‌استریفیکاسیون (ATT)<sup>۸</sup> استفاده می‌شود. استفاده از ATT مدت زمان واکنش را کاهش داده (به‌عنوان مثال غلظت کاتالیزور کم‌تر و نسبت الکل به چربی پایین‌تر) و بنابراین هزینه‌های کلی تولید را کم می‌کند [۹]. ترانس‌استریفیکاسیون به‌طور کلی در یک راکتور ناپیوسته با استفاده از گرمایش الکتریکی معمولی و همزدن مکانیکی انجام می‌شود. روش متداول مورد استفاده در این نوع راکتور به بیش از یک ساعت انرژی الکتریکی برای گرمایش و همزنی [۱۸] و حدود ۳ تا ۵ ساعت برای بررسی‌ها و جداسازی فاز نیاز دارد. مشکل انتقال انرژی و جرم مانع افزایش سرعت و بازده واکنش است [۱۹]. از این رو دو نوع ATT، که معمولاً در تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی استفاده می‌شوند، عبارت‌اند از: تکنیک کمکی فراصوت<sup>۹</sup> (UA) و تکنیک کمکی ریزموج<sup>۱۰</sup> (MA) [۹]. استفاده از فناوری‌ها دارای مزایای بالابردن سرعت واکنش و بهترکردن فرایند جداسازی در مقایسه با روش معمولی‌اند. این فناوری‌های پیشرفته پتانسیل قابل توجهی در بالابردن فرایند تولید بیودیزل و کاهش زمان و هزینه تولید دارد [۱۸].

ناحیه تابش ریزموج بین تابش مادون قرمز و امواج رادیویی در طیف الکترومغناطیسی قرار دارد. ریزموج طول‌موج‌هایی از ۱mm تا ۱m مربوط به فرکانس‌های بین ۰/۳ GHz و ۳۰۰ GHz دارد [۲۰]. در خلال تابش ریزموج، پیوندها نه تشکیل می‌شوند و نه شکسته می‌شوند، اما انرژی به‌سرعت به نمونه منتقل می‌شود [۲۱]. انتقال حرارت در سامانه ریزموج به‌منظور افزایش تمرکز حرارتی و نیز سرعت بخشیدن به گرم‌شدن مواد واکنشی معمولاً از طریق فرایندهای قطبش شامل چرخش دوقطبی، انتقال یونی و مکانیزم قطبش سطحی صورت می‌گیرد [۲۲، ۲۳]. تابش ریزموج می‌تواند به‌عنوان منبع حرارتی در طول واکنش ترانس‌استریفیکاسیون استفاده شده و این واکنش در دقیقه یا ثانیه انجام گیرد. خواص دی‌الکتریک ریزموج به‌طور قابل توجهی به درجه حرارت، فرکانس و کاتالیزور بستگی دارد [۲۱]. در واحد تولید بیودیزل، به‌کمک ریزموج، واکنش‌دهنده‌ها مانند روغن گیاهی، الکل و کاتالیزور توسط دستگاه همزن مناسب مخلوط می‌شوند و توسط منبع گرمایی ریزموج حرارت داده می‌شوند. واکنش‌دهنده‌ها به مدت‌زمان مورد نیاز واکنش در معرض تابش ریزموج قرار می‌گیرند. بعد از آن به محصولات ترانس‌استریفیکاسیون اجازه جدایی فازها و ته‌نشینی داده می‌شود. جدایی فاز بیودیزل و گلیسیرین ۳۰ تا ۶۰ دقیقه طول

1. Micro-emulsions
2. Pyrolysis
3. Transesterification
4. Homogeneous
5. Heterogeneous
6. Enzymatically-Catalyzed
7. Supercritical Process
8. Assisted Transesterification Techniques (ATT)
9. Ultrasound-assisted Technique
10. Microwave-assisted Technique

می‌کشد. بعد از آن بیودیزل خام در معرض شستشوی آب قرار می‌گیرد تا ناخالصی‌ها حذف شوند. زمان واکنش و تنظیم زمان مورد نیاز برای ته‌نشینی در این روش کم بوده و از این رو هزینه تولید به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. خواص سوخت تولیدشده توسط این روش شبیه به بیودیزل تولیدشده توسط روش معمولی است [۱۸].

پریامبود و همکاران در تحقیقشان شرایط بهینه را به‌صورت زمان واکنش ۴۰ تا ۱۸۰ ثانیه، دمای واکنش حدود  $80^{\circ}\text{C}$ ، نسبت ۶ متانول به روغن و توان خروجی ریزموج ۱۰۰۰ وات گزارش کرده‌اند. در این شرایط بازده تولید ۹۹ درصد و ۹۳ درصد برای روغن خوراکی و پسماند روغن خوراکی به‌دست آمد. در این مطالعه، سوخت بیودیزل به‌دست آمده به‌عنوان جایگزین سوخت دیزل مطرح می‌شود که می‌تواند بدون ایجاد تغییر زیاد در موتورها با توجه به شرایط آن مورد استفاده قرار گیرد [۲۴].

زارع و همکاران در مطالعه‌ای یک مایکروویو خانگی را به‌عنوان یک راکتور تولید بیودیزل انتخاب کرده و اثر تابش ریزموج روی ترانس‌استریفیکاسیون ضایعات روغن خانگی (WCO) در تولید بیودیزل را بررسی کردند. ترانس‌استریفیکاسیون WCO در حضور متانول به‌عنوان الکل انجام شد؛ از نسبت مولی ۱:۶ الکل به روغن و ۱ درصد وزنی پتاسیم هیدروکسید، به‌عنوان کاتالیزور، استفاده شد. واکنش در زمان‌های واکنش مختلف (۱، ۲ و ۳ دقیقه) انجام شد. نتایج نشان داد که در مقایسه با روش حرارت معمولی استفاده از ریزموج می‌تواند در به‌دست آمدن بازده بالای متیل‌استرهای اسید چرب (بیودیزل) به‌طور موثر عمل کند، زمان واکنش را کاهش داده و فرایند جداسازی را بهبود بخشد [۲۵].

در میان منابع انرژی تجدیدپذیر، پتانسیل برای انرژی سوخت‌های زیستی در ایران فراوان است. دولت ایران توجه عمده‌ای برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه سوخت‌های زیستی، دارد. در طول سال‌های اخیر، از ضایعات ماهی به‌صورت بهینه استفاده نمی‌شده است. تولید بیودیزل، کمپوست کود، تولید بیوگاز و سوزاندن ضایعات ماهی برای تولید انرژی، راه‌های مختلف استفاده از ضایعات ماهی در جهان هستند. افزایش تقاضا برای سوخت‌های فسیلی در جهان، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و مشکلات آلودگی از عوامل اصلی افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر جایگزین است. همچنین، یحیایی و همکاران گزارش دادند که بیودیزل تولیدی از روغن ضایعات ماهی این پتانسیل را دارد که جایگزین ۵ درصد از کل مصرف سوخت دیزل در بخش حمل‌ونقل ایران شود [۲۶].

روغن ماهی در صنعت فرآوری ماهی به‌عنوان یک محصول جانبی در حجم بالایی تولید می‌شود. این محصول دارای ارزش گرمایی مشابه نفت خام و یک منبع انرژی تجدیدپذیر است. مطالعات متعددی برای استفاده از روغن ماهی به‌عنوان سوخت برای موتورهای دیزل انجام شده است. در مقایسه با گازوییل شماره ۶، روغن ماهی مقدار پایین‌تری از کربن و مقدار بالاتری هیدروژن دارد. روغن ماهی، همچنین، نقطه اشتعال بالاتر اما گرانی سینه‌ماتیکی پایین‌تری دارد [۲۷]. طول زنجیره کربنی روغن ماهی اغلب بیش‌تر از روغن‌های گیاهی است که از اسید چرب، اسید اولئیک، اسید لینولئیک و اسید لینولنیک تشکیل شده است [۲۸]. تولید بیودیزل از روغن ضایعات ماهی قیمت مواد اولیه و مشکلات زیست محیطی را کاهش می‌دهد. با این حال، به‌دلیل مقدار ناخالصی‌هایی مانند آب و اسید چرب آزاد، روغن ضایعات باید قبل از واکنش مورد بررسی قرار گیرد. برخی از محققان روغن ضایعات ماهی را با روغن پسماند مخلوط می‌کنند تا بازده بالاتری به‌دست آید [۲۹، ۳۰].

در مطالعه‌ای، روغن استخراج‌شده از قطعات ماهی دورریز برای تولید بیودیزل با کیفیت بالا مورد استفاده قرار گرفت. ترانس‌استریفیکاسیون روغن ضایعات ماهی با متانول، با استفاده از سدیم هیدروکسید ( $\text{CH}_3\text{ONa}$ ) به‌عنوان کاتالیزور همگن، تحت شرایط عملیاتی متوسط، بیش از ۹۸ درصد بیودیزل خالص نتیجه داد [۳۱].

هدف تحقیق حاضر تولید بیودیزل از روغن پسماند ماهی با استفاده از ترکیب همزن مکانیکی و فناوری ریزموج است. برای بررسی درصد بازده واکنش ترانس‌استریفیکاسیون اثر متغیرهای مستقلی همچون نسبت مولی الکل به روغن، غلظت

کاتالیزور، زمان همزنی و زمان تابش ریزموج مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده از روش سطح پاسخ (RSM) <sup>۱</sup> و طرح باکس بنکن <sup>۲</sup> در نرم‌افزار Design Expert استفاده شد.

## مواد و روش‌ها

برای تولید بیودیزل به روش ترانس‌استریفیکاسیون با کاتالیزور بازی از روغن ضایعات ماهی استفاده شد. این روغن از ماهی فروشی‌های مازندران، که معمولاً برای مصارف غیرخوراکی به‌صورت دستی و سنتی تهیه می‌شود، خریداری شد. روغن مورد استفاده در این تحقیق دارای چگالی  $0.89 \text{ gr/cm}^3$  است. روغن مورد استفاده، قبل از انجام واکنش‌های شیمیایی، به‌منظور حذف ناخالصی‌هایی نظیر آب و تکه‌های مواد، باید مورد فرآوری و تصفیه قرار گیرد. برای تصفیه روغن، ابتدا چندین مرتبه روغن از صافی پارچه‌ای عبور داده شد تا مقداری از مواد آن گرفته شود. سپس، یک روز در داخل ظرف‌هایی قرار داده شد تا مواد آن ته‌نشین شود و درنهایت از صافی کاغذی برای تصفیه نهایی استفاده شد و بدین ترتیب روغن تمیز و آماده شد. برای تعیین درصد آب، ابتدا مقداری روغن داخل سه ظرف شیشه‌ای ریخته و توزین می‌شود. سپس هر سه نمونه به مدت ۲ ساعت در آون با دمای  $103/5$  درجه سلسیوس قرار داده شد. نمونه‌ها بعد از زمان مذکور از آون خارج شده و مجدداً توزین شد. مقایسه توزین‌ها نشان‌دهنده ناچیزی مقدار آب موجود در روغن بود.

برای تعیین اسیدیته روغن و به‌دست آوردن نقطه پایانی تیتراسیون، از روش شناساگر فنول فتالین استفاده شد، به این ترتیب که مقدار مشخصی در حدود ۱ گرم روغن در ۱۰ میلی‌لیتر الکل پروپانول حل و سه قطره فنول فتالین به آن اضافه شد. محلول پتاسیم هیدروکسید الکلی با غلظت  $1/0$  مول در لیتر، به‌کمک بورت ۵۰ میلی‌لیتری، قطره‌قطره به آن اضافه شد. این کار همراه با هم‌زدن محلول تا تغییر رنگ خنثی (ثابت ماندن رنگ ارغوانی در حدود ۱۵ ثانیه) ادامه یافت. با سه بار تکرار آزمایش، میانگین محلول پتاس مصرفی در رابطه‌های زیر قرار گرفته، عدد اسیدی و اسیدیته روغن محاسبه شد.

$$AV = \frac{56.1 \times V \times C}{m} \quad (1)$$

$$A = \frac{282 \times AV}{561} \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $AV$  عدد اسیدی روغن (mg KOH/g Oil)،  $A$  اسیدیته روغن (%/)،  $V$  میانگین حجم مصرفی محلول پتاسیم هیدروکسید (ml)،  $C$  غلظت محلول پتاسیم هیدروکسید (mol/l) و  $m$  وزن نمونه روغن (g) است. برای انجام کامل واکنش ترانس‌استریفیکاسیون مقدار مناسب درصد آب و اسیدیته روغن به‌ترتیب باید زیر ۱ و ۳ درصد باشد [۳۳، ۳۲]. در این تحقیق، مقادیر میانگین درصد آب و میانگین اسیدیته روغن پس از فرآوری و تصفیه اولیه روغن به‌ترتیب ۰/۰۹ و ۲/۵ درصد بود.

الکل و کاتالیزور مورد استفاده در این تحقیق متانول ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) و هیدروکسید پتاسیم (KOH) با درصد خلوص ۹۹ از شرکت اطلس شیمی تهیه شد. به‌منظور افزایش انحلال و واکنش‌پذیری کاتالیزور، محلول متوکسید (مخلوط هیدروکسید پتاسیم و متانول) با درصد وزنی کاتالیزور و نسبت مولی الکل به روغن متناسب با هر آزمایش، قبل از انجام هر یک از آزمایش‌ها، به‌صورت جداگانه تهیه شد. برای اینکه بازده انحلال بالا برود از یک همزن مغناطیسی استفاده شد. در این تحقیق، از همزن مغناطیسی مدل MR 3001 ساخت شرکت Heidolph آلمان برای حل کردن هیدروکسید پتاسیم در متانول استفاده شد.

همچنین، در این پژوهش از یک دستگاه اجاق ریزموج پاناسونیک مدل NN-ST342 WW ساخت کشور کره به‌عنوان منبع تولیدکننده امواج استفاده شد. برای دستیابی به هدف این پروژه، از یک پیچه <sup>۳</sup>، که در محفظه اجاق جانمایی شده، استفاده شد. قطر این پیچه ۲۱ سانتی‌متر بوده و طول کلی شلنگ آن ۱۸۵ سانتی‌متر است. در انجام این پژوهش از شلنگ تفنون با توجه به انعطاف‌پذیری و نشکن‌بودن آن استفاده شد. شلنگ مورد استفاده دارای قطر درونی ۶ میلی‌متر و ضخامت

1. Response Surface Methodology  
2. Box Behnken  
3. coil reactor

جداره ۱ میلی‌متر است. درگاه‌هایی نیز برای ورودی و خروجی راکتور به محفظه اجاق با سوراخ کردن پوسته محفظه در نظر گرفته شد. تصویری از طرحواره آزمایش‌ها در شکل ۱ دیده می‌شود.



Figure 1- The experimental set-up used in this study for biodiesel producing  
شکل ۱- طرحواره مورد استفاده در این تحقیق برای تولید بیودیزل

طی واکنش ترانس‌استریفیکاسیون برای تبدیل تری گلیسیریدها به بیودیزل، گلیسرول، مونو و دی آسیل گلیسرول شکل می‌گیرد که مقادیر کمی از آن‌ها می‌تواند در بیودیزل نهایی باقی بماند. علاوه بر این، تری گلیسیریدهای واکنش‌نداده، گلیسیرین جداشده، اسیدهای چرب آزاد موجود در روغن، الکل اضافی و کاتالیزور می‌توانند در محصول نهایی (بیودیزل) ناخالصی ایجاد کنند؛ در نتیجه لازم است بیودیزل تولیدی آنالیز شود. نمونه‌گیری توسط سمپلر<sup>۱</sup> ۱ میلی‌لیتری انجام شد. از آنجا که بعد از نمونه‌گیری واکنش ممکن است ادامه یابد، بایستی بلافاصله بعد از تهیه نمونه واکنش به‌طور کامل متوقف شود. به همین منظور، از اسید برای خنثی‌سازی استفاده شد؛ بدین ترتیب که مقدار اسید سولفوریک مشخصی را به هر نمونه تزریق کرده تا واکنش متوقف شود. سپس، نمونه‌ها در دستگاه سانتریفیوژ قرار گرفتند تا بیودیزل و گلیسیرین به‌طور کامل دوفازی شوند. نمونه‌ای از بیودیزل تولیدشده در شکل ۲ نشان داده شده است.

سپس، فاز بیودیزل توسط سمپلر جدا شده و توزین می‌شد. از فاز بیودیزل جداشده مقداری در حدود ۰/۱ گرم جدا کرده و ۱ سی‌سی محلول رقیق‌شده استاندارد داخلی در حلال (۱۰ میلی‌گرم در سی‌سی) به آن اضافه شد. مخلوط پس از تکان داده‌شدن به ویال<sup>۲</sup> مخصوص تزریق دستگاه کروماتوگرافی گازی مستقر در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه رازی منتقل شد. تصویر دستگاه کروماتوگرافی مورد استفاده در شکل ۳ آورده شده است. استاندارد داخلی استفاده شده در تحقیق حاضر (C<sub>12</sub>) و حلال مورد استفاده آن-هگزان (n-He) است. محتوای متیل استر موجود در نمونه بیودیزل (C) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

1. sampler  
2. vial

$$C = \frac{\sum A - A_{IS}}{A_{IS}} \times \frac{M_{IS}}{M} \times 100 \quad (3)$$

که در آن  $\sum A$  مجموع سطح زیر پیک مربوط به اسیدهای چرب  $C_6$  تا  $C_{24}$  ( $uV \cdot sec$ )،  $A_{IS}$  سطح زیر پیک متناظر با استاندارد داخلی (متیل هپتا دکانوات) ( $uV \cdot sec$ )،  $M_{IS}$  جرم داخلی استاندارد استفاده شده ( $mg$ ) و  $M$  جرم نمونه بیودیزل ( $mg$ ) است. شکل ۴ نمونه‌ای از توزیع<sup>۱</sup> اسیدهای چرب حاصل از نتایج GC را نشان می‌دهد.



Figure 2- A sample of synthesized biodiesel  
شکل ۲- نمونه‌ای از بیودیزل تولیدشده



Figure 3- The chromatography apparatus used in this research  
شکل ۳- دستگاه کروماتوگرافی استفاده شده در این تحقیق

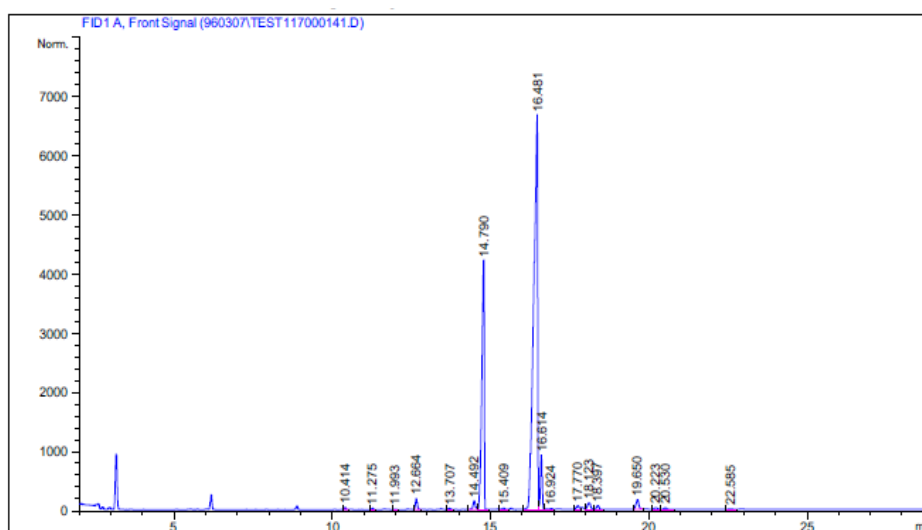


Figure 4- An example of fatty acids profile  
 شکل ۴- نمونه ای از توزیع اسیدهای چرب

در این پژوهش، به منظور بهینه‌سازی واکنش تولید بیودیزل از روش باکس بنکن استفاده شده است. تعداد آزمایش‌های انجام‌شده ۲۹ عدد بوده که ۳ تکرار برای نقطه مرکزی در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌کردن واکنش تولید بیودیزل بنا به پیشنهاد نرم‌افزار (Design Expert 10) و با توجه به ضریب تبیین ( $R^2$ ) بالا، از تابع چندجمله‌ای درجه ۲ استفاده شد. شکل کلی یک تابع چندجمله‌ای درجه ۲ به صورت رابطه (۴) است:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (4)$$

که در آن  $Y$  پاسخ (متغیر وابسته)،  $\beta_0$  ضریب ثابت،  $\beta_i$ ،  $\beta_{ii}$ ،  $\beta_{ij}$  به ترتیب ضرایب خطی، مربعی و اثر متقابل پارامترها،  $X_j$  و  $X_i$  متغیرهای مستقل و  $\varepsilon$  خطای پیش‌بینی نشده است.

### نتیجه‌گیری و بحث

مدل رگرسیونی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (درصد تبدیل) به صورت معادله درجه ۲ (رابطه (۵)) با  $R^2=0.9953$  به دست آمد. با استفاده از این مدل می‌توان مقادیر بازده واکنش تحت شرایط مختلف کاری را پیش‌بینی و تشخیص داد. شکل ۵، تطابق نزدیک بین نتایج به دست آمده با روش تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل را با ضریب تبیین بالای  $R^2=0.9953$  نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} Yield(\%) = & +14.04141 - 0.12266T + 33.72124R - 61.97482M + 6.41900W - 0.096275TR \\ & - 0.19439TM + 0.65405TW + 3.48000MW + 0.020707T^2 - 2.94728R^2 \\ & + 16.85199M^2 - 11.24519W^2 \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن  $T$  بیانگر زمان همزنی،  $R$  بیانگر نسبت مولی،  $M$  بیانگر ریزموج و  $W$  بیانگر غلظت کاتالیزور است. علامت مثبت در پیش روی هر کدام از جمله‌ها نشان‌دهنده تأثیر افزایشی و علامت منفی نشان‌دهنده تأثیر کاهشی متغیر (ها) بر روی پاسخ است.

در جدول ۱، تحلیل واریانس مدل رگرسیونی درجه دوم برای درصد تبدیل بیودیزل آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در پیش‌بینی روند تولید بیودیزل با متغیرهای مستقل انتخابی معنی‌دار است.

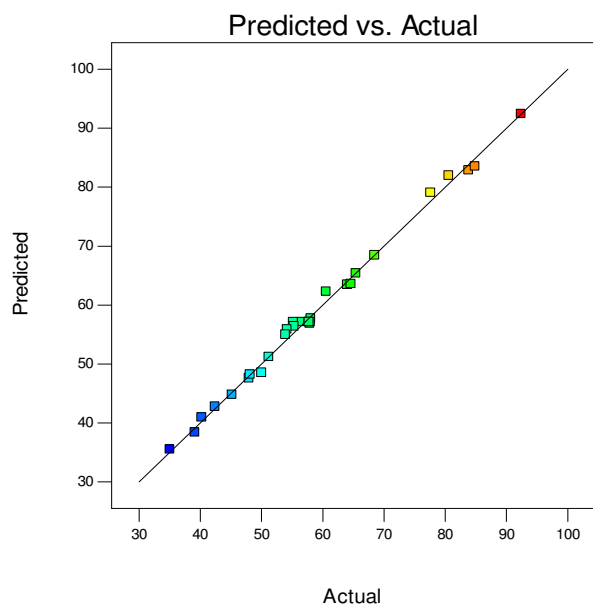


Figure 5- The observed reaction efficiency versus predicted reaction efficiency.  
 شکل ۵- بازده واکنش مشاهده شده به ازای بازده واکنش پیش‌بینی شده

جدول ۱- تحلیل واریانس مدل رگرسیونی درجه دوم برای درصد تبدیل بیودیزل

Table 1- Analysis of variance of quadratic regression model for biodiesel conversion percent

Source	Sum of Squares	df	F Value	P-value Prob > F
Model	5634.44	14	213.18	< 0.0001
A-Time	96.34	1	51.03	< 0.0001
B-Molar ratio	370.05	1	196.01	< 0.0001
C-Microwave	1607.66	1	851.55	< 0.0001
D-Catalyst	11.08	1	5.87	0.0296
AB	14.83	1	7.86	0.0141
AC	15.12	1	8.01	0.0134
AD	42.78	1	22.66	0.0003
BC	0.23	1	0.12	0.7321
BD	0.97	1	0.52	0.4842
CD	12.11	1	6.41	0.0239
A <sup>2</sup>	27.81	1	14.73	0.0018
B <sup>2</sup>	901.52	1	477.52	< 0.0001
C <sup>2</sup>	1842.10	1	975.73	< 0.0001
D <sup>2</sup>	51.27	1	27.15	0.0001
Residual	26.43	14	1.55	0.3567
Lack of Fit	21.01	10		
Pure Error	5.42	4		
Cor Total	5660.88	28		

شکل ۶ نمودار آشفتگی<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد که این نمودار مقایسه اثر همه پارامترها در یک نقطه خاص از فضای طراحی را امکان‌پذیر می‌کند و نقطه مرجع در نقطه میانی تمام عوامل، که با کد صفر مشخص شده است، قرار داده شده است. همان‌گونه

1. Perturbation plot



که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زمان همزنی (A) تا نقطه مرکزی انتخاب‌شده، درصد تبدیل کاهش می‌یابد و سپس ثابت می‌شود و در انتها مقدار کمی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت مولی (B)، درصد تبدیل در ابتدا افزایش می‌یابد، اما در نزدیکی نقطه مرکزی ثابت شده و سپس با شیب نسبتاً تندی کاهش می‌یابد. افزایش زمان ریزموج (C) تا بعد از نقطه مرکزی به شدت باعث کاهش درصد تبدیل بیودیزل می‌شود و پس از آن درصد تبدیل افزایش می‌یابد و چون شیب و انحنای آن تند است، نشان می‌دهد که پاسخ به این پارامتر حساس است. همچنین، با افزایش غلظت کاتالیزور (D)، درصد تبدیل با شیب بسیار ملایمی به صورت اندک افزایش یافته و پس از نقطه مرکزی کاهش می‌یابد و از آنجا که به صورت خط نسبتاً صافی است، غیرحساس بودن پاسخ را به تغییر در آن عامل خاص نشان می‌دهد.

شکل ۷ نمودار سطح پاسخ و خطوط تراز را برای درصد تبدیل بیودیزل به ازای تغییر زمان همزنی و نسبت مولی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زمان واکنش، درصد تبدیل ابتدا کاهش می‌یابد؛ سپس، ثابت مانده و پس از نقطه اوج افزایش پیدا می‌کند. علت کاهش یافتن نمودار در بازه‌ای از زمان همزنی حل‌شدن گلیسیرین و متانول در همدیگر است. زیرا هر دو قطبی‌اند و در نتیجه با بیشتر شدن زمان همزنی، گلیسیرین بیشتری تولید شده که باعث می‌شود متانول بیشتری در آن حل شود و برگشت واکنش به سمت تولید متانول اتفاق بیفتد و دوباره متانول تولید شده و بازده کمی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش نسبت مولی، درصد تبدیل بیودیزل افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به نقطه اوج کاهش می‌یابد. در نسبت‌های مولی مختلف، درصد‌های تبدیل در زمان‌های همزنی ۵ دقیقه و ۲۵ دقیقه تفاوتی با هم ندارند و این عدم تفاوت به خاطر برگشت واکنش ترانس‌استریفیکاسیون در زمان‌های بالاست. همچنین، با ثابت نگه‌داشتن غلظت کاتالیزور و زمان ریزموج در مقادیر متوسط، بازده واکنش در نسبت مولی نزدیک به ۶ به مقدار بیشینه خود می‌رسد.

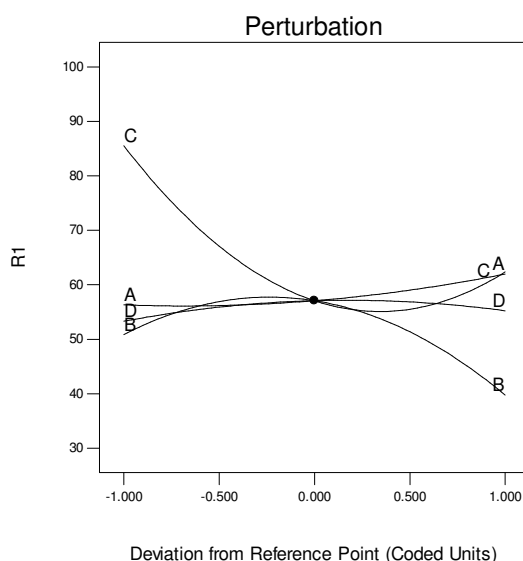


Figure 6- The perturbation plot of all the factors effect on the percent conversion of biodiesel

شکل ۶- نمودار آشفتگی تأثیر متغیرها روی درصد تبدیل بیودیزل

در تحقیقی، از کان و همکاران اثر ترکیبی زمان (۵ تا ۲۰ دقیقه) و نسبت مولی متانول به روغن میکروجلبک (۶ تا ۱۰) را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه مشابهی گرفتند. نتایج نشان داده نسبت مولی متانول به روغن تأثیر معناداری بر روی درصد تبدیل بیودیزل دارد. با استفاده از نسبت مولی ۶ به ۱ متانول به روغن بعد از زمان ۲۰ دقیقه، درصد تبدیل ۹۶/۷ به دست آمد و با استفاده از نسبت مولی ۸ به ۱ متانول به روغن بعد از ۵ دقیقه زمان واکنش، درصد تبدیل ۹۶/۵۴ به دست آمد [۳۴].

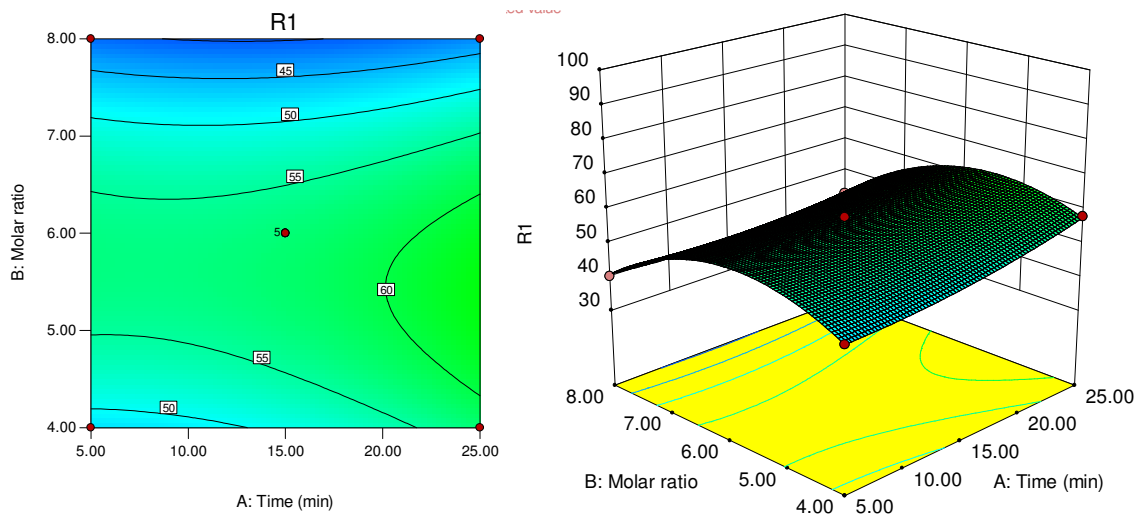


Figure 7- The response level and the alignment lines of biodiesel conversion percent for reaction time variations and molar ratio (microwave time and catalyst concentration adjusted to 1.5 and 1 respectively)

شکل ۷- سطح پاسخ و خطوط تراز درصد تبدیل بیودیزل به‌ازای تغییرات زمان واکنش و نسبت مولی ( زمان ریزموج و غلظت کاتالیزور به ترتیب روی ۱/۵ و ۱ تنظیم شده است)

شکل ۸ نمودار سطح پاسخ و خطوط تراز را برای درصد تبدیل بیودیزل، به‌ازای تغییر در زمان ریزموج و زمان همزنی، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش توأمان زمان همزنی و زمان ریزموج، درصد تبدیل ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. درصد تولید بیودیزل به‌ازای افزایش زمان ریزموج، صرف‌نظر از زمان همزنی، تا نقطه اوج خود با شیب تندی کاهش می‌یابد و سپس افزایش می‌یابد و منحنی زمان ریزموج در زمان همزنی ۵ دقیقه نسبت به ۲۵ دقیقه زودتر به نقطه اوج می‌رسد و افزایش بیشتری پیدا می‌کند و در نتیجه درصد تولید بیودیزل بالا می‌رود. زارع و همکاران (۲۰۱۳) در مورد زمان ریزموج هم نتیجه مشابهی به‌دست آوردند. آن‌ها بالاترین بازده بیودیزل (۸۹/۲۹ درصد) را با استفاده از تابش ریزموج در ۱ دقیقه در مقایسه با ۲ و ۳ دقیقه به‌دست آوردند [۲۵].

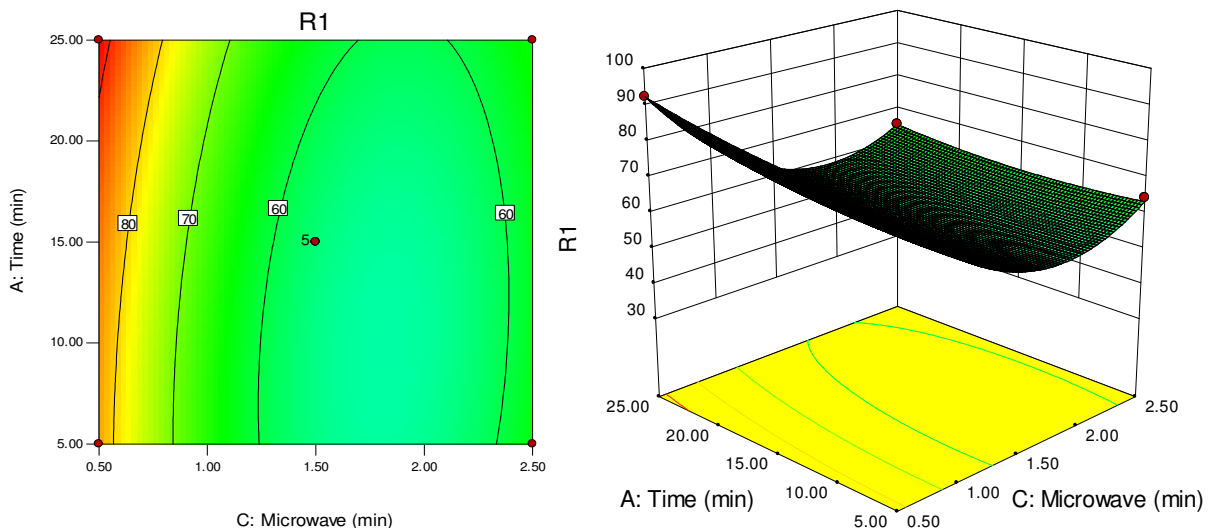


Figure 8- The response level and the alignment lines of the biodiesel conversion percentage for the reaction time and time of the microwave (molar ratio and catalyst concentration are adjusted to 6 and 1 respectively)

شکل ۸- سطح پاسخ و خطوط تراز درصد تبدیل بیودیزل به‌ازای تغییرات زمان واکنش و زمان ریزموج (نسبت مولی و غلظت کاتالیزور به ترتیب روی ۱ و ۶ تنظیم شده‌اند).

با توجه به شکل ۹، درصد تبدیل بیودیزل به ازای افزایش زمان همزنی در غلظت کاتالیزور ۰/۵ درصد، ابتدا کاهش می‌یابد و بعد از نقطه اوج شروع به افزایش می‌کند، اما در غلظت کاتالیزور ۱/۵ درصد سیر صعودی دارد. منحنی زمان مربوط به غلظت کاتالیزور ۱/۵ درصد نسبت به غلظت ۰/۵ درصد زودتر به نقطه اوج رسیده و همچنین افزایش بازده بیشتری را داشته است. همچنین، در این شکل، با افزایش غلظت کاتالیزور، منحنی غلظت به ازای زمان همزنی ۲۵ دقیقه از ابتدا سیر صعودی داشته و بازده افزایش می‌یابد، اما منحنی مربوط به زمان همزنی ۵ دقیقه از ابتدا تا انتها سیر نزولی دارد؛ یعنی افزایش غلظت کاتالیزور در زمان همزنی کم تأثیر منفی برای واکنش دارد که به دلیل انجام واکنش صابونی شدن بین کاتالیزور و استرهای تولید شده است.

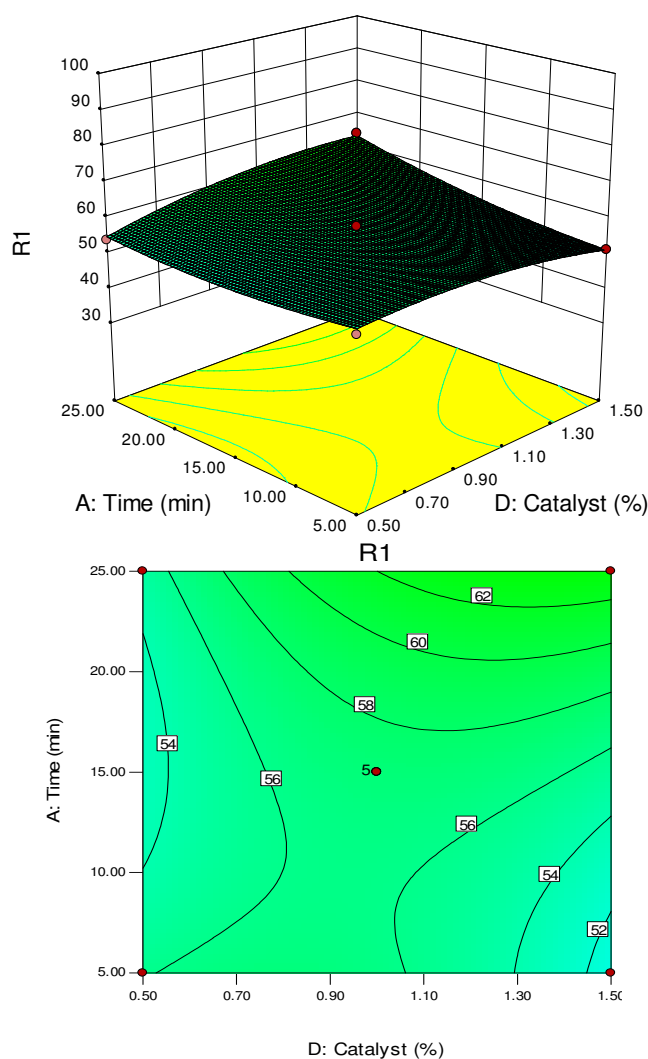


Figure 9- The level of response and the alignment lines of biodiesel conversion percent for reaction time variations and catalyst concentration (molar ratio and microwave time adjusted to 6 and 1.5, respectively)

شکل ۹- سطح پاسخ و خطوط تراز درصد تبدیل بیودیزل به ازای تغییرات زمان واکنش و غلظت کاتالیزور (نسبت مولی و زمان ریزموج به ترتیب روی ۶ و ۱/۵ تنظیم شده‌اند)

پریامبودو و همکاران نیز در قسمتی از آزمایش خود دمای واکنش ۸۰ درجه سلسیوس، زمان واکنش ۴۰ ثانیه، نسبت مولی متانول به روغن ۶ و شدت همزنی ۶۰۰ دور در دقیقه را ثابت نگه داشتند و غلظت کاتالیزور ناهمگن Sro (۱/۴۲) درصد تا

۳/۲۵ درصد) بر روی بازده بیودیزل را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین بازده بیودیزل ۹۹/۱ درصد با غلظت کاتالیزور ۱/۸۵ درصد به‌دست آمد و با اضافه کردن بیش از ۱/۸۵ درصد کاتالیزور درصد تبدیل به‌طور چشمگیری کاهش یافت که دلیل آن، همان‌طور که در بالا گفته شد، این است که مقدار اضافه کاتالیزور باعث می‌شود تری گلیسرید بیشتر در واکنش صابونی شدن درگیر شود [۲۴].

برای بهینه‌سازی فرایند تولید بیودیزل باید میزان درصد تبدیل به بیشینه مقدار خود برسد. شرایط مرزی متغیرهای مستقل و متغیر وابسته به‌صورتی تعیین شد که پارامترهای مستقل در محدوده تعیین‌شده و پاسخ مربوطه با درجه اهمیت ۵ برای بهینه‌شدن قرار داشته باشند. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، مقدار بهینه پیش‌بینی‌شده برای درصد تبدیل برابر ۹۲/۶۲ در غلظت کاتالیزور نزدیک ۱ درصد، نسبت مولی الکل به روغن ۵/۳۳، زمان ریزموج ۰/۵ دقیقه و زمان همزنی ۲۴/۱۴ حاصل شد.

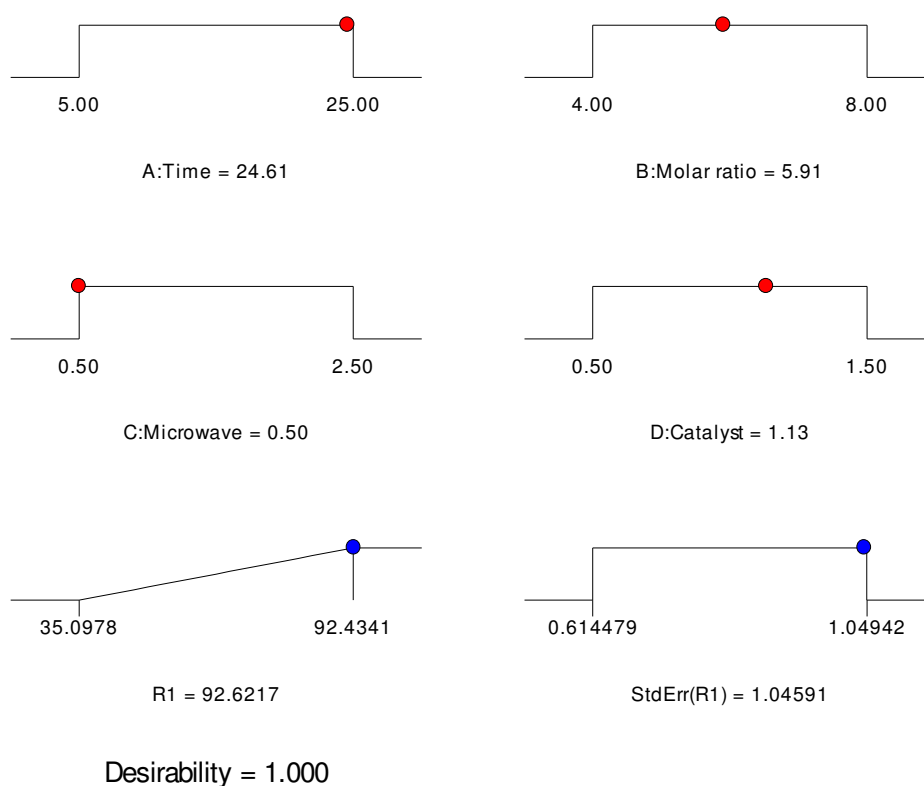


Figure 10- Optimization conditions for independent variables to maximize biodiesel conversion

شکل ۱۰- شرایط بهینه‌سازی متغیرهای مستقل برای بیشینه‌کردن درصد تبدیل بیودیزل

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تولید سوخت تجدیدپذیر بیودیزل از روغن پسماند ماهی با کمک ترکیب ریزموج و همزن مکانیکی انجام گرفت. برای بررسی اثر پارامترهایی همچون نسبت مولی روغن به الکل، غلظت کاتالیزور، زمان همزنی و زمان تابش ریزموج با کمک طرح آزمایشی باکس بنکن در روش سطح پاسخ و با استفاده از نرم‌افزار Design Expert 10.0 آزمایش‌هایی ترتیب داده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که همه متغیرهای مستقل و نیز برخی برهم‌کنش‌ها (اثر متقابل پارامترها) تاثیر معناداری روی بازده واکنش تولید بیودیزل دارند. مدل رگرسیونی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (درصد تبدیل بیودیزل) به‌صورت

معادله درجه ۲ با ضریب تبیین  $R^2=0/9953$  به دست آمد. از بین پارامترهای مورد بررسی زمان تابش ریزموج تاثیر بسیار زیادی نسبت به سایر پارامترها روی بازده واکنش از خود نشان داد، به طوری که با افزایش زمان ریزموج ۰/۵ به ۱/۵ دقیقه بازده واکنش با شیب بسیار تندی کاهش می یابد. همچنین، با افزایش زمان همزنی، درصد تبدیل ابتدا کاهش یافته و پس از نقطه میانی افزایش پیدا می کند. علت کاهش یافتن نمودار در بازه ای از زمان همزنی حل شدن گلیسرین و متانول در همدیگر است، زیرا هر دو قطبی بوده و در نتیجه، با بیشتر شدن زمان همزنی، متانول بیشتری در آن حل می شود. همچنین، در شرایط بهینه، به ازای تغییرات زمان همزنی و زمان ریزموج، با مقدار شاخص مطلوبیت ۱/۰، درصد تبدیل بیشینه ۹۲/۶۲ و خطای استاندارد ۱/۰۴ است. مقدار بهینه پیش بینی شده برای غلظت کاتالیزور ۱/۱۳ درصد، نسبت مولی الکل به روغن ۵/۹۱، زمان ریزموج ۰/۵ دقیقه و زمان واکنش ۲۴/۶۱ به دست آمد.

## منابع

1. N. Mrad, E. G. Varuvel, M. Tazerout and F. Aloui, "Effects of biofuel from fish oil industrial residue diesel blend in diesel engine," *Energy*, 44, 2012, pp. 955-963.
2. P. S. Nigam and A. Singh. "Production of liquid biofuels from renewable resources," *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, pp. 52-68.
3. L. Gao, G. Tang, G. Xiao and R. Wei, "Biodiesel from palm oil via loading KF/CA-AL hydrotalcite catalyst," *Bioenergy*, 34, No. 9, 2012, pp. 1283-1288.
4. Y. Li, F. Qiu, D. Yang, P. Sun and X. Li, "Transesterification of soybean oil and analysis of bioproduct," *Food and Bioproduct Processing*, 90, 2012, pp. 135-140.
5. P. Shao, X. Meng, J. He and P. Sun, "Analysis of immobilized candida rugose lipase catalyzed preparation of biodiesel from rapeseed soapstock," *Food and Bioproducts Processing*, 86, No. 4, 2008, pp. 283-289.
6. Y. Li, F. Qiu, D. Yang, X. Li and P. Sun, "Preparation, characterization an application of heterogeneous solid base catalyst for biodiesel production from soybean oil," *Biomass and Bioenergy*, 35, No.7, 2011, pp. 2787-2795.
7. D. Y. C. Leung, X. Wu and M. K. H. Leung, "Areview on biodiesel production using catalyzed transesterification," *Applied Energy*, 87, No. 4, 2010, pp. 1083-1095.
8. A. Kleinova, I. Vailing, J. Labaj, J. Mikulec and J. Cvengros, "Vegetable oils and animal fats as alternative fuels for diesel engines with dual fuel operation," *Fuel Processing Technology*, 92, 2011, pp. 1980-1986.
9. P. Adewale, M. J. Dumont and M. Ngadi, "Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 2015, pp. 574-588.
10. N. Martini and S. Schell, *Plant oil as fuels: Present state of future developments*, First Edition, Germany, Berlin, Springer, 1998.
11. P. Felizardo, M. J. N. Correia, I. Raposo, J. F. Mendes, R. Berkemeier and J. M. Bordado, "Production of biodiesel from waste frying oils," *Waste Management*, 26, 2006, pp. 487-494.
12. J. V. Gerpen, "Biodiesel processing and production," *Journal of Fuel Processing Technology*, 86, 2005, pp. 1097-1107.
13. S. K. Karmee and A. Chadha, "Preparation of biodiesel from crude oil of pongamia pinnata," *Journal of Bioresource Technology*, 96, 2005, pp. 1425-1429.
14. P. Rose and M. Norris, *Evaluate biodiesel made from wastes fats and oils*, Final Report, Agriculture Utilization Research Institute, Crookston, MN, USA, 2002.
15. G. Vicente, M. Matinez and J. Aracil, "Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems," *Bioresource Technology*, 92, 2004, pp. 297-305.
16. H. Y. Shin, S. H. Lee, J. H. Ryu and S. Y. Bae, "Biodiesel production from waste lard using supercritical methanol," *The Journal of Supercritical Fluids*, 61, 2012, 134-138.
17. L. K. Ong, A. Kurniawan. A. C. Suwandi, C. X. Lin, X. S. Zhao and S. Ismadji, "Transesterification of leather tanning waste to biodiesel at supercritical condition: kinetics and thermodynamics studies," *The Journal of Supercritical Fluids*, 75, 2013, pp. 11-20.
18. N. Kapilan and B. Baykov, "A review on new methods used for the production of biodiesel," *Petroleum & Coal*, 56, No. 1, 2014, pp. 62-73.
19. G. Vicente, M. Martinez and J. Aracil, "Optimisation of integrated biodiesel production, Part I: A study of the biodiesel purity and yield," *Bioresource technology*, 98, No. 9, 2007, pp.1724-1733.
20. A. K. Singh, S. D. Fernando and R. Hernandez, "Base-catalyzed fast transesterification of soybean oil using ultrasonication," *Energy Fuel*, 21, 2007, pp. 1161-1164.
21. D. M. Pranjali and B. Dorin, "Investigation of microwave dielectric properties of biodiesel components," *Bioresource Technology*, 127, 2013, pp. 1665-174.
22. L. M. Das and P. K. Sahoo, "Combustion analysis of jatropa, karanja and polanga based biodiesel as fuel in a diesel engine," *Fuel*, 88, 2008, pp. 994-999.

23. P. Patil, H. Reddy, T. Muppaneni, S. Ponnusamy, Y. Sun, P. Dailey, P. Cook, U. Patil and S. Deng, "Optimization of microwave-enhanced methanolysis of algal biomass to biodiesel under temperature controlled conditions," *Bioresource Technology*, 137, 2013, pp. 278-285.
24. R. Priambodo, T. C. Chen, M. C. Lu, A. Gedanken, J. D. Liao and Y. H. Huang, "Novel technology for biodiesel production from cooking and waste cooking oil by microwave irradiation," *Energy procedia*, 75, 2015, pp. 84-91.
25. M. Zare, B. Ghobadian, E. Fayyazi, GH. Najafi and B. Hosseinzadeh, "Microwave-assisted biodiesel fuel production from waste cooking oil," *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5, No. 12, 2013, pp. 1314-1317.
26. R. Yahyaee, B. Ghobadian and G. Najafi, "Waste fish oil biodiesel as a source of renewable fuel in Iran," *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 17, 2013, pp. 312-319.
27. F. Preto, F. Zhang, and J. Wang, "A study on using fish oil as an alternative fuel for conventional combustors," *Fuel*, 87, 2008, pp. 2258-2268.
28. Y. L. Cherg, and J. Rong, "Fuel properties of biodiesel produced from the crude fish oil from the soap stock of marine fish," *Fuel Processing Technology*, 90, 2009, pp. 130-136.
29. M. J. Dias, M. C. M. Alvim-Ferraz and M. F. Almeida, "Production of biodiesel from acid waste lard," *Bioresource Technology*, 100, No. 24, 2009, pp. 6355-6361.
30. J. F. Costa, M. F. Almeida, M. C. M. Alvim-Ferraz and J. M. Dias, "Biodiesel production using oil from fish canning industry wastes," *Energy conversion and management*, 74, 2013, pp. 17-23.
31. C. S. Yogesh, S. Bhaskar, M. Devarapaga, L. Yun and Y. Zahira, "Fast Synthesis of High Quality Biodiesel from 'Waste Fish Oil' by Single Step Transesterification," *Biofuel Research Journal*, 3, 2014, pp. 78-80.
32. A. Demirbas, "Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics," *Energy Conversion and Management*, 47, No. 15, 2006, pp. 2271-2282.
33. A. Demirbas, *Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines*, Springer-Verlag London Limited, London, 2008.
34. N. Azcan, and O. Yilmaz, "Microwave irradiation application in biodiesel production from promising biodiesel feedstock microalgae," *Proceedings of the world congress on engineering and computer science, WCECS 2012*, October 24-26, 2012, San Francisco, USA.

## English Abstract

### Biodiesel production from fish-waste oil by combining mechanical stirring and microwave

Neda Yari<sup>1</sup>, Mostafa Mostafaei<sup>2\*</sup>, Leila Naderloo<sup>3</sup>, Seyed Mohammad Safieddin Ardebili<sup>4</sup>

1- Mechanics of Biosystems Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran, yarineda527@yahoo.com

2- Mechanics of Biosystems Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran, b.mostafaei@razi.ac.ir

3- Mechanics of Biosystems Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran, lnaderloo@gmail.com

4- Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, m.safieddin@scu.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2017.09.18, Received in revised form: 2017.11.05, Accepted: 2017.11.06)

The purpose of the present study is to produce biodiesel from fish-waste oil and methanol by combining mechanical stirring and microwave as a technique to accelerate this process. In this research, a microwave system was used including microwave source, stirrer, spiral tube and decanter. With the help of this system, the effects of multiple parameters on the conversion of fatty acid to methyl ester is investigated. These parameters include molar ratio of alcohol to oil (4 to 1, 6 to 1 and 8 to 1), catalyst concentration (0.5, 1 and 1.5 weight percent of oil), reaction time (5, 15 and 25 min) and microwave time (0.5, 1.5 and 2.5 min). Analyzing the obtained results is performed using the response surface method and Box Behnken layout in Design Expert 10.0 software. After analyzing the data and optimizing the biodiesel production reaction, the highest percentage of biodiesel conversion (92.62%) was found in the catalyst concentration of 1.13%, the reaction time of 24.61 minutes, the molar ratio of alcohol to oil of 5.55 and the microwave time of 0.5 minute. The regression model between independent variables and dependent variable (percent conversion) was obtained as a quadratic equation with  $R^2 = 0.9953$ .

**Keywords:** Biodiesel, Fish-waste oil, Transesterification, Microwave, Response surface method