

مدل‌سازی و بهینه‌سازی تولید پیوسته بیودیزل با رآکتور سپرک‌دار نوسانی دو محفظه‌ای از روغن پسماند خوراکی به روش سطح پاسخ

حسن زمانی^۱، بهرام حسین‌زاده سامانی^{۲*}، رحیم ابراهیمی^۳، ابراهیم فیاضی^۴ و مرتضی بیاره^۵

چکیده

امروزه مصرف سوخت‌های فسیلی به دلیل از بین بردن سریع منابع ارزشمند و تولید آلاینده‌های زیست محیطی، ناپایدار شناخته شده و محققان را بر آن داشته تا با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و گسترش آن‌ها، به کمک فرآیندهای مناسب، جایگزینی برای این سوخت‌ها معرفی کنند. بیودیزل (سوخت زیستی) یکی از بهترین منابع پیشنهاد شده است که متداول‌ترین روش تولید این سوخت زیستی واکنش ترانس استریفیکاسیون است. توسعه و به کارگیری فناوری‌های نوین شدت بخشی تولید بیودیزل در واکنش ترانس استریفیکاسیون منجر به ابداع رآکتورهای جدیدی شده است که سبب افزایش نرخ انجام واکنش و کاهش زمان تولید خواهد شد. رآکتور سپرک‌دار نوسانی با شدت همزنی بالا در زمان کم و حجم بیش‌تر در سال‌های اخیر مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه ارزیابی رآکتور سپرک‌دار نوسانی دو محفظه‌ای در تولید پیوسته بیودیزل است. از سامانه فراصوت به عنوان یک پیش همزنی مناسب و از روغن پسماند به منظور کاهش هزینه تولید بهره گرفته شده است. نسبت مولی متانول به روغن (۱:۶، ۱:۹ و ۱:۱۲)، زمان (۱، ۳ و ۵ دقیقه)، فرکانس نوسان (۲/۴، ۳/۷ و ۴/۹ هرتز) و دما (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) متغیرهای مستقلی هستند که اثر آن‌ها بر متغیرهای وابسته (درصد تبدیل بیودیزل و میزان انرژی مصرفی kJ/l) در این پژوهش بررسی شده است. مشخصات فیزیکی شیمیایی بیودیزل تولید شده مطابق با استاندارد ASTM D6751 است. برای بهینه‌سازی محتوای متیل استر تولید شده، روش سطح پاسخ به کار گرفته شد و نتایج حاکی از آن بود که بیش‌ترین عملکرد بیودیزل ۹۵/۲۸ درصد به همراه کم‌ترین انرژی مصرفی $۵۸/۸۰ \text{ kJ/l}$ در نسبت مولی ۸/۰۱، زمان ۲/۵۵ دقیقه، فرکانس نوسان ۳/۶۴ هرتز و دمای ۴۹/۰۵ درجه سلسیوس حاصل گردید. تولید بیودیزل با درصد تبدیل بالا و در حجم بیش‌تر که با زمان کمتر واکنش در رآکتور همراه بود از دیگر یافته‌های این پژوهش به شمار می‌آید.

واژه‌های کلیدی: تولید بیودیزل، رآکتور سپرک‌دار نوسانی، ترانس استریفیکاسیون، روش‌های شدت بخشی.

ارجاع: زمانی ح. حسین‌زاده سامانی ب. ابراهیمی ر. فیاضی ا. و بیاره م. ۱۴۰۳. مدل‌سازی و بهینه‌سازی تولید پیوسته بیودیزل با رآکتور رآکتور بافل‌سپرک‌دار نوسانی دو محفظه‌ای از روغن پسماند خوراکی به روش سطح پاسخ. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۳: ۷۵-۹۵.
<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14833.713>

۱- دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۳- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۴- استادیار شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران.
۵- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: b.hosseinzadehsamani@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴

مقدمه

اکثر نیازمندی‌های انرژی جهان از طریق منابع تجدید ناپذیر تأمین می‌شود (منابع برق آبی و انرژی هسته‌ای استثناء هستند). همه این منابع محدود بوده و با سرعت استفاده کنونی در مدت کوتاهی به پایان خواهند رسید. سوخت گازوئیل نقش اساسی در اقتصاد صنعتی کشورهای در حال توسعه داشته و در حمل و نقل، کالاهای کشاورزی و صنعتی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. اخیراً این امر باعث توجه و علاقه به منابع جایگزین برای سوخت‌های نفتی شده است. سوخت جایگزین باید قابل دسترس، دوست‌دار محیط زیست و از لحاظ فنی و اقتصادی رقابت پذیر باشد. یکی از نوید بخش‌ترین منابع جایگزین برای این هدف، سوخت‌های زیستی هستند که می‌توانند از منابع متعدد و مختلفی به دست آیند (Moradi et al., 2022). بیودیزل یکی از مهم‌ترین و بهینه‌ترین منابع سوخت‌های زیستی محسوب می‌شود.

انتخاب ماده اولیه حدود ۶۰ الی ۸۰ درصد از کل هزینه‌های تولید سوخت‌های بیودیزل را شامل می‌شود. از طرفی، انتخاب مواد خام برای تولید سوخت عمدتاً به در دسترس بودن، آب و هوا، شرایط خاک محلی و هزینه آن بستگی دارد و استفاده از مواد اولیه پرهزینه تولید بیودیزل را به یک فرایند غیر اقتصادی تبدیل می‌کند. برای حل این مشکل، استفاده از روغن بازیافت سرخ کردنی کاملاً اقتصادی و سازگار با محیط زیست به نظر می‌رسد چرا که علاوه بر ایجاد ارزش افزوده فراوان، موجب کاهش دفع این آلاینده زیست محیطی و مدیریت پسماند خواهد شد (Guo et al., 2020).

در بین تمامی روش‌های تولید بیودیزل، ترانس استریفیکاسیون بهترین راهکار برای حل مشکل لزجت بالا در هنگام تولید بیودیزل بوده و اقتصادی‌ترین روش و با کارایی بالا شناخته شده است؛ با این حال بازدهی پایین انتقال جرم بین روغن و الکل و پایش ضعیف حرارت از چالش‌های اصلی در فرایند ترانس استریفیکاسیون است (Mahmood Khan et al., 2020).

علاوه بر این استفاده از رآکتورهای مخزنی همزن‌دار برای تولید با روش مذکور، مشکلاتی نظیر سرعت پایین و زمان طولانی واکنش، وزن و فضای زیاد مورد نیاز تجهیزات و انرژی بر بودن فرایند تولید وجود دارد. از این رو، لزوم

بررسی فناوری‌های جدید و جایگزین به منظور شدت بخشی فرایند تولید سوخت بیودیزل از دیدگاه بازدهی تولید، زمان فرایند و کیفیت بیودیزل تولیدی موضوعی بسیار ضروری به نظر می‌رسد. توسعه و به کارگیری برخی فناوری‌های نوین شدت بخشی فرایند تولید بیودیزل در واکنش ترانس استریفیکاسیون با هدف بهبودی فرایند همزنی و انتقال جرم و حرارت بین دو حالت مایع واکنش، منجر به ابداع رآکتورهای جدید شده است که سبب افزایش نرخ انجام واکنش و کاهش زمان تولید سوخت بیودیزل خواهد شد (Gupta et al., 2019 & Wong et al., 2019).

رآکتورهای جریان نوسانی از یک لوله یا ستون مجهز به یک سری صفحات سپرک تشکیل شده‌اند. سیال داخل رآکتور با استفاده از دیافراگم یا پیستون که در یک یا هر دو انتهای لوله قرار دارد، نوسان می‌کند. در این رآکتورها، حرکت نوسانی نسبی را می‌توان با نوسان سیال یا نوسان سپرک‌ها ایجاد کرد. ترکیب هندسه تناوبی (سپرک‌ها) و جریان معکوس تناوبی در یک لوله یا ستون ویژگی کلیدی رآکتورهای نوسانی است که می‌توانند به صورت افقی یا عمودی و در حالت ناپیوسته و پیوسته کار کرده و یک همزنی عالی قابل‌پایش را با ایجاد جریان توربولانسی بالا و ارتقاء انتقال جرم و حرارت مهیا سازند (Mazubert 2014). سپرک یا بافل یکی از اجزای رآکتورهای شیمیایی است که در مسیر سیال قرار می‌گیرد و موجب تغییر جهت، توقف و یا تلاطم در سیال می‌شود. همچنین سپرک‌ها با ایجاد تلاطم و آشفتگی، مانع از سر ریز شدن مایع داخل مخزن و منجر به تغییر شکل حرکت مایع درون مخزن می‌شوند. وجود سپرک‌ها در رآکتورهای شیمیایی، اختلاط مواد را بالا برده و انتقال جرم و حرارت را افزایش می‌دهد (Harvey et al., 2003). توزیع قطرات با اندازه‌های بسیار ریز، محلول یکنواخت ذرات، پخش مؤثر گاز در حالت مایع، همزنی چند حالتی، افزایش در سرعت واکنش و نهایتاً بالا رفتن میزان محصول تولیدی از ویژگی‌های منحصر به فرد این رآکتورها بوده و همچنین قابلیت ارتقای مقیاس تولید آزمایشگاهی و صنعتی این نوع رآکتورها با سازوکار همزنی یکسان از مزایای دیگر این رآکتورها بیان شده است (Bianchi et al., 2020).

رآکتورهای سپرک‌دار نوسانی در تولید بیودیزل نسبت به سایر روش‌های شدت بخشی (فراصوت، هیدرودینامیک و

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

فرایند استخراج روغن و استریفیکاسیون

در این تحقیق، روغن پسماند از محل رستوران سلف دانشگاه شهرکرد تهیه شد. برای آماده کردن روغن به‌منظور تولید بیودیزل باید روغن عاری از ناخالصی‌ها (آب، تکه‌های مواد غذایی و...) و هم‌چنین باید درصد اسید چرب آن در حد مطلوب باشد. جهت تولید بیودیزل از روغن پسماند خوراکی نیاز به گذر از دو مرحله، قبل از انجام فرایند تولید بیودیزل است. مرحله اول استفاده از یک جداکننده جهت جداسازی ذرات ریز و جامد موجود در روغن و یا استفاده از جداسازی گرانشی ۲۴ ساعته است. بدین صورت که در مخزن مخروطی، روغن مورد نظر ریخته و پس از گذشت ۲۴ ساعت، با توجه به اینکه ذرات جامد و آب چگالی بیش‌تری از روغن دارند در پایین مخزن جمع شده و قابل جداسازی هستند. در نتیجه مواد با کیفیت در مخزن باقی می‌ماند. مرحله بعدی حرارت دادن روغن جداسازی شده تا دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس است تا آب موجود در روغن تبخیر شود. جهت تعیین نوع روغن پسماند مورد استفاده، لزوم یا عدم لزوم اعمال مرحله استریفیکاسیون و تعیین مقدار کاتالیزور و واکنش‌گرهای مورد نیاز لازم است تا درصد اسیدهای چرب آزاد خوراک تعیین شود. برای این منظور با استفاده از محلول ۰/۱ نرمال هیدروکسید پتاسیم و معرف فنل فتالین تیتراسیون خوراک فرایند انجام می‌گیرد. به‌منظور تعیین مقادیر اسیدهای چرب آزاد و کاتالیزور نیاز به استفاده از روابط زیر است (معادلات (۱) و (۲)).

$$\% \text{FFA} = \frac{0.5 A N W_c}{W} \quad (1)$$

$$\text{KOH}(\text{gr}) = \frac{0.197 \times \% \text{FFA}}{0.86} + \% 1 \quad (2)$$

در معادلات اشاره شده، A حجم کاتالیزور لازم جهت تیتراسیون روغن برحسب (ml) ، W مقدار نمونه برحسب گرم، N نرمالیت و W_c جرم مولکولی کاتالیزور برحسب گرم است. پس از محاسبه میزان اسیدهای چرب آزاد باید مقدار آن برای واکنش ترانس استریفیکاسیون به زیر یک درصد برسد (Hosainzade Samani et al., 2016; Gerpen et al., 2004). اسیدهای چرب آزاد در این تحقیق در حضور کاتالیزور اسیدسولفوریک با متانول

(... زمان بر بوده (حدود ۳۰ دقیقه) و در تولید پیوسته و مقیاس صنعتی همچنان نابالغ هستند. لذا در این پژوهش، از رآکتور سپرکدار نوسانی دو محفظه‌ای که قادر به پذیرش حجم بالای واکنش و ایجاد یک همزنی قوی و احتمالاً کاهش زمان واکنش است، بهره گرفته می‌شود.

امواج فراصوت با ایجاد حباب‌ها (کاویتاسیون) و در ادامه فروپاشی حباب‌ها در نزدیکی حالت بین دو مایع غیر قابل امتزاج، افزایش سطح انتقال جرم، ایجاد فشار و دمای بسیار زیاد را به همراه داشته و باعث مخلوط شدن دو حالت ماده در نزدیکی لایه مرزی می‌گردد. بدین ترتیب سرعت واکنش و انتقال جرم به طور هم‌زمان به شدت افزایش یافته و موجب کاهش زمان و جلوگیری از مصرف انرژی اضافی جهت افزایش دما و فشار می‌شود. از مزایای دیگر این روش کاهش استفاده از کاتالیزور (کنش‌یار) و متانول به علت اختلاط بالای واکنش است که موجب کاهش هزینه تولید محصول نهایی می‌شود. استفاده از امواج فراصوت با توجه به ایجاد دما و فشار محیطی بسیار بالا منجر به کاهش زمان واکنش، افزایش بازدهی و کیفیت بالای محصول حتی در صورت استفاده از خوراکی با کیفیت پایین می‌شود (Okitsu et al., 2010 & Alishahi et al., 2021). استفاده از سامانه فراصوت به عنوان پیش‌تیمار در ترکیب با رآکتور سپرکدار نوسانی اختلاط مناسب برای ایجاد تماس کافی بین روغن و الکل، به خصوص در شروع واکنش را فراهم کرده و به تولید پیوسته بیودیزل در زمان کم‌تر و با درصد تبدیل بالاتر کمک خواهد کرد.

در این مطالعه امکان‌سنجی تولید پیوسته بیودیزل توسط رآکتور سپرکدار نوسانی دو محفظه‌ای که مراحل طراحی و ساخت آن از پیش صورت پذیرفت، مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین از سامانه فراصوت به عنوان پیش‌تیمار در کار حاضر بهره گرفته شد. ضمن این‌که در ادامه، تحلیل و بهینه‌سازی داده‌ها به منظور دستیابی به بیشینه بازدهی و کمینه انرژی مصرفی در تبدیل متیل استر با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد.

احتساب فضای درون سیلندر حجمی برابر ۷۹۰ میلی‌لیتر دارد. تعداد ۳ سپرک با روزنه‌ای به قطر ۳۲ میلی‌متر درون هر لوله به فاصله ۵۰ میلی‌متری تعبیه شدند. یک موتور برقی توان مورد نیاز را از طریق تسمه و سازوکار لنگ به دو پیستون موجود در درون سیلندرها انتقال داده و حرکت رفت و برگشتی پیستون‌ها، نوسان سیال و عبور مداوم آن از روزنه‌های سپرک‌های تعبیه‌شده در محفظه رآکتور را مهیا می‌سازد.

اجزای اصلی مورد نیاز برای ساخت و راه‌اندازی رآکتور سپرک‌دار نوسانی برای تولید بیودیزل در این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- محفظه رآکتور ۲- سیلندر و پیستون ۳- موتور برقی
- ۴- پمپ پریستالتیک ۵- سپرک‌های روزنه‌دار

روش تولید پیوسته بیودیزل در رآکتور سپرک‌دار نوسانی

در این سامانه ابتدا مخلول متوکسید که از همزنی دو ترکیب متانول (CH₃OH) و کاتالیزور پتاسیم را به همراه روغن پسماند تصفیه شده وارد دستگاه فراصوت کرده و توسط پمپ پریستالتیک امولسیون روغن و متوکسید تشکیل شده به رآکتور سپرک‌دار نوسانی وارد می‌شود. پیستون‌ها به وسیله موتور الکتریکی و با حرکت رفت و برگشتی، مخلوط ورودی به درون محفظه‌ها را به تلاطم درآورده به طوری که ابتدا مخلوط ورودی به محفظه اول به جریان درآمده و از روزنه سپرک‌ها عبور می‌کند سپس از طریق مجرای بین دو رآکتور جریان به محفظه دوم ورود و پیوستگی جریان حفظ می‌شود. به طور هم‌زمان گرداب‌های تورودپال (toroidal vortices) در زیر سپرک‌ها ایجاد می‌شود و با حرکت پیستون به سمت بالا، گرداب‌ها در بالای سپرک‌ها شکل گرفته و توسعه می‌یابند. در واقع اثر متقابل بین روزنه سپرک‌ها با حرکت نوسانی جریان مایع در هر یک از سپرک‌ها تشکیل گرداب‌ها را منجر شده و به انتقال حرارت و جرم مؤثر کمک می‌کند. محصول تولیدی در نهایت از محفظه دوم رآکتور خارج و به روش ته‌نشینی، گلیسرین از متیل استر در مخزن محصولات جداسازی می‌شود (مسیر ۵-۴-۳-۱ در شکل ۱).

واکنش داده و به متیل استر تبدیل خواهد شد. بعد از واکنش استریفیکاسیون مجدد روغن تیترا شده و درصد اسیدهای چرب آزاد آن کمتر از ۱ درصد به دست آمد و در این حالت برای واکنش ترانس استریفیکاسیون مهیا گردید. الکل (متانول) و کاتالیزور (پتاسیم هیدروکسید) مورد استفاده در این پژوهش از شرکت Merck آلمان و به ترتیب با خلوص ۹۹/۸ و ۹۹/۹ درصد بود.

سامانه فراصوت

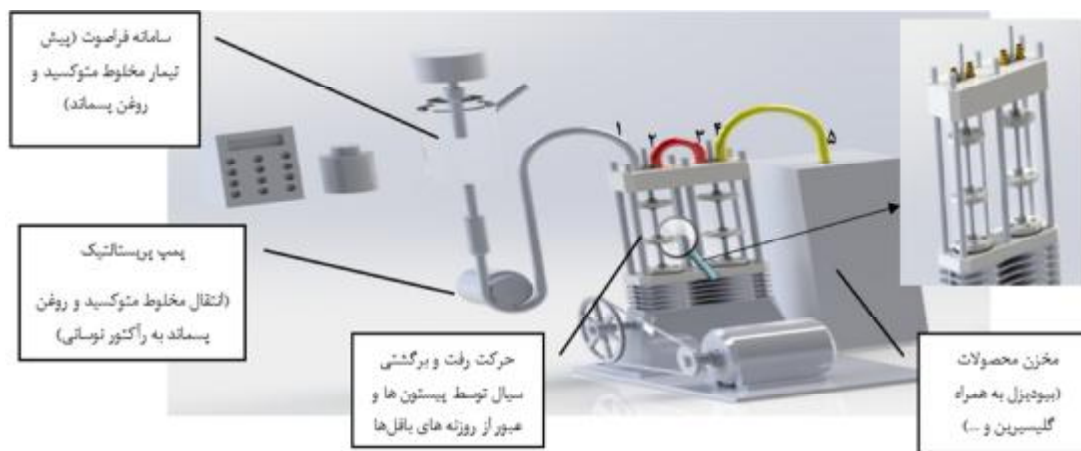
استفاده از رآکتورهای حفره‌زای فراصوت (سونوشیمیایی) می‌تواند به شیمی واکنش و افزایش انتقال جرم و اختلاط میان حالتی بین حالت‌های ماده کمک کند و هم‌چنین می‌تواند نیاز به شدت شرایط عملیاتی را از نظر دما و فشار کاهش دهد. سامانه فراصوت که به عنوان یک پیش همزنی قوی در این مطالعه کاربرد دارد، یک نفوذگر فراصوت (مدل تاپسونیک، UP400، ایران) از جنس تیتانیوم بوده که قادر به تولید امواج فراصوت در محدوده بین ۰ تا ۴۰۰ وات است. برای شدت بخشی فرآیند تولید، نفوذگر فراصوت به صورت مورب در مخزن شیشه‌ای قرار می‌گیرد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد واکنش دهنده

نماد شیمیایی	چگالی (kg/m ³)	لزجت (cP)	جرم مولکولی (g)
KOH	۲۰۴۴	-	۵۳/۰۱
CH ₃ OH	۰/۷۹	۷۹/۱	۳۲/۰۴
روغن پسماند	۹۲۴/۴۲	۷۹/۱	۸۸۹/۴۶

رآکتور سپرک‌دار نوسانی دو محفظه‌ای

رآکتور سپرک‌دار نوسانی دو محفظه‌ای با در نظر گرفتن اصول طراحی و معادلات مرتبط در پژوهش محققان طراحی و ساخته شد (Phan & Harvey., 2011, Ahmed et al., 2017, Stonestreet & Harvey., 2002). بخش اصلی رآکتور از دو محفظه شفاف (لوله‌ای شکل) از جنس پلکسی گلاس حاوی سپرک‌های روزنه‌دار که بر روی دو سیلندر تعبیه می‌شوند، تشکیل شده است. قطر و طول هر لوله به ترتیب ۶۴ و ۲۰۰ میلی‌متر است که با



شکل ۱- طرحواره سامانه ترکیبی رآکتور جریان نوسانی بافل‌دار - فراصوت

مصرفی) در ۲۷ آزمایش با سه تکرار در نقطه مرکزی استفاده شد.

تجزیه و تحلیل آماری

مدل‌سازی و بهینه‌سازی آزمایش

به‌منظور بهینه‌سازی و بیشینه کردن بازده و کمینه کردن مصرف انرژی به مدل‌سازی با استفاده از روش‌های ریاضی و آماری واکنش‌های شیمیایی نیاز است که بدین منظور روش سطح پاسخ (RSM) که یک روش متداول و پر کاربرد محسوب می‌شود، پیشنهاد می‌گردد. این روش با معیار قرار دادن حدود بیشینه و کمینه مشخص شده برای هر متغیر و تشکیل یک ماتریس ارزیاب تعداد آزمون‌ها و سطوح هر متغیر در هر آزمون را مشخص می‌کند و برای زمانی که تعداد متغیرها زیاد باشد، مناسب است. رابطه کلی یک تابع چند جمله‌ای درجه دوم به‌صورت معادله ۶ است (Solmaz et al., 2020 & Fayyazi et al., 2021).

$$\text{Yield \%} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (6)$$

Y_i پاسخ (متغیر وابسته)، β_0 ضریب ثابت، β_j و β_{ij} به ترتیب ضرایب خطی، مربعی و اثر متقابل عامل‌ها، X_i و X_j متغیرهای مستقل و ε خطای پیش‌بینی نشده است. در این آزمایش از طرح باکس بنکن استفاده خواهد شد و سطوح انتخابی برای متغیرهای مستقل آزمایش مطابق جدول ۲ برگزیده می‌شود تا در نهایت بهترین شرایط برای تولید

محاسبه محتوی متیل استر

درصد متیل استر با روش متداول کروماتوگرافی یا طیف-سنجی مشخص می‌شود. طیف‌سنجی گازی ناحیه توزیع مربوط به هر جزء در نمونه تولید شده را فراهم می‌کند. خلوص بیودیزل (FAME) به دست آمده را می‌توان با استفاده از معادله (۳) تعیین و بازده بیودیزل (P) طبق معادله (۴) که در آن V بیانگر بازده حجمی است قابل محاسبه می‌باشد (Ansari Samani et al., 2023)

$$\text{FAME} = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{W_{EI}}{m} \times 100\% \quad (3)$$

که در آن:

$\sum A$ مجموع نواحی پیک محتوای FAME به دست آمده از تجزیه و تحلیل GC ناحیه اوج IS (متیل نونادکانوات) وزن ثابت IS (mg) وزن نمونه بیودیزل (mg)

$$(\%) P = \text{FAME} \times V \quad (4)$$

در حالی که درصد بازده حجمی بیودیزل تولید شده را می‌توان با استفاده از معادله (۵) که در آن حجم محصول و حجم واکنش دهنده به ترتیب با نمادهای V_P و V_R نشان داده شده اند به دست آورد.

$$V = \frac{V_P}{V_R \times 100} \quad (5)$$

در این پژوهش از طرح آزمایشی Box- Behnken Design در نرم‌افزار Design-Expert 12 با چهار متغیر مستقل (فرکانس نوسان A، دما B، زمان واکنش C و نسبت مولی D) و دو متغیر وابسته (درصد تبدیل متیل استر و انرژی

پیوسته بیودیزل با کم‌ترین زمان و انرژی مصرفی و حداکثر بازدهی در تولید ارائه شود.

(۷) توان مصرفی \times زمان = انرژی مصرفی (کیلووات ساعت)

بحث و نتایج

نتایج تحلیل آماری و مدل‌سازی داده‌ها

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) اثرات اصلی و متقابل فرکانس نوسان، دما، زمان و نسبت مولی بر انرژی مصرفی و محتوی متیل استر بیودیزل تولیدی این فرآیند به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. در ارزیابی تأثیر متغیرهای مستقل فرایند بر افزایش عملکرد بیودیزل (مطابق جدول ۴)، تأثیر همه عوامل به جز دو بر هم‌کنش فرکانس نوسان \times نسبت مولی و دمای واکنش \times زمان واکنش در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بوده است.

همچنین جدول ۳ بیان‌گر معنی‌دار بودن فرکانس نوسان، زمان و دمای واکنش به همراه برهم‌کنش‌های AC و BC در سطح احتمال ۱٪ است. معنادار شدن مدل و معنی‌دار نشدن عدم تناسب (Lack of fit) نشان دهنده این است که مدل از دقت کافی برای ارزیابی عملکرد و انرژی مصرفی برخوردار بوده است.

جدول ۲- سطوح متغیرهای مستقل انتخاب شده در روش

متغیرهای مستقل	سطح پاسخ		
	واحد متغیر	سطوح کدبندی	
فرکانس نوسان	Hz	۱	۲/۴
دمای واکنش	°C	۰	۳/۷
نسبت مولی الکل به روغن	w/w%	۱	۴۰
زمان	دقیقه	۱۲:۱	۶:۱
		۳	۱

انرژی مصرفی

برای برآورد میزان انرژی مصرفی در فرایند تولید بیودیزل به ازاء هر لیتر، دستگاه وات متر را به صورت سری به سامانه متصل کرده و سپس انرژی مصرفی نمایان شده بر روی دستگاه وات متر در زمان مشخص ثبت می‌گردد. سپس مصرف انرژی با استفاده از معادله (۷) محاسبه می‌شود.

جدول ۳- نتایج مدل عملکرد تولید بیودیزل به روش سطح پاسخ

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	ضریب معناداری
مدل	۱۳۶۳/۲۰	۱۲	۱۱۳/۶۰	< .۰۰۰۱**
فرکانس نوسان (A)	۴۵/۷۵	۱	۴۵/۷۵	< .۰۰۰۱**
دما (B)	۳۲/۸۷	۱	۳۲/۸۷	< .۰۰۰۱**
زمان واکنش (C)	۱۳۶/۴۲	۱	۱۳۶/۴۲	< .۰۰۰۱**
نسبت مولی (D)	۱۸۳/۳۸	۱	۱۸۳/۳۸	< .۰۰۰۱**
AB	۰/۴۹۰۰	۱	۰/۴۹۰۰	۰/۰۱۴۰
AC	۰/۲۲۵۶	۱	۰/۲۲۵۶	۰/۰۷۷۶
BD	۰/۹۲۱۶	۱	۰/۹۲۱۶	۰/۰۰۱۸
CD	۱۵/۱۷	۱	۱۵/۱۷	< .۰۰۰۱**
A ²	۱۳۹/۰۶	۱	۱۳۹/۰۶	< .۰۰۰۱**
B ²	۷۴۳/۸۷	۱	۷۴۳/۸۷	< .۰۰۰۱**
C ²	۴۹۳/۳۱	۱	۴۹۳/۳۱	< .۰۰۰۱**
D ²	۲۲۷/۸۵	۱	۲۲۷/۸۵	< .۰۰۰۱**
باقیمانده	۰/۸۷۱۱	۱۴	۰/۰۶۲۲	
عدم برازش	۰/۷۲۷۸	۱۲	۰/۰۶۰۶	۰/۶۵۹۸ns
خطای خالص	۰/۱۴۳۳	۲	۰/۰۷۱۶	
کل	۱۳۶۴/۰۷	۲۶		

**معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ - ns عدم معنی‌داری

جدول ۴- نتایج مدل انرژی مصرفی تولید بیودیزل به روش سطح پاسخ

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	ضریب معناداری
مدل	۲۵۵۰۶/۶۰	۵	۵۱۰۱/۳۲	< .۰/۰۰۰۱**
فرکانس نوسان (A)	۲۷۰۸/۷۱	۱	۲۷۰۸/۷۱	< .۰/۰۰۰۱**
دما (B)	۲۲۸/۹۹	۱	۲۲۸/۹۹	< .۰/۰۰۰۱**
زمان واکنش (C)	۲۲۱۴۲/۴۴	۱	۲۲۱۴۲/۴۴	< .۰/۰۰۰۱**
AC	۴۲۶/۲۲	۱	۴۲۶/۲۲	< .۰/۰۰۰۱**
BC	۰/۲۵۰۰	۱	۰/۲۵۰۰	۰/۰۳۶۷
باقیمانده	۱/۰۵	۲۱	۰/۰۵۰۲	
عدم برازش	۰/۸۶۷۴	۱۹	۰/۰۴۵۷	۰/۸۴۳۹ns
خطای خالص	۰/۱۸۷۳	۲	۰/۰۹۳۶	
کل	۲۵۵۰۷/۶۶	۲۶		

**معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ - عدم معنی‌داری

جدول ۵- عوامل آماری محاسبه شده برای عملکرد بیودیزل در رگرسیون گام به گام در RSM

عوامل	مقدار	عوامل	مقدار
استاندارد خطا (Std. Dev)	۰/۲۴۹۴	Adjusted R ²	۰/۹۹۸۸
میانگین	۸۱/۱۰	Predicted R ²	۰/۹۹۷۴
ضریب تغییرات (C.V%)	۰/۳۰۷۶	Adeq Precision	۱۵۲/۸۴۲۷
ضریب تعیین (R ²)	۰/۹۹۹۴		

جدول ۶- عوامل آماری محاسبه شده برای انرژی مصرفی در رگرسیون گام به گام در RSM

عوامل	مقدار	عوامل	مقدار
استاندارد خطا (Std. Dev)	۰/۲۲۴۱	Adjusted R ²	۰/۹۹۹۹
میانگین	۶۹/۰۶	Predicted R ²	۰/۹۹۹۹
ضریب تغییرات (C.V%)	۰/۳۲۴۵	Adeq Precision	۱۰۹۷/۶۸۰۲
ضریب تعیین (R ²)	۱		

(۱۱) به ترتیب برای درصد تبدیل متیل استر و انرژی مصرفی به دست آمد. در این معادله‌ها، فرکانس نوسان بر حسب هرتز، دمای واکنش بر حسب درجه سلسیوس، زمان بر حسب دقیقه و نسبت مولی بر حسب درصد وزنی هستند.

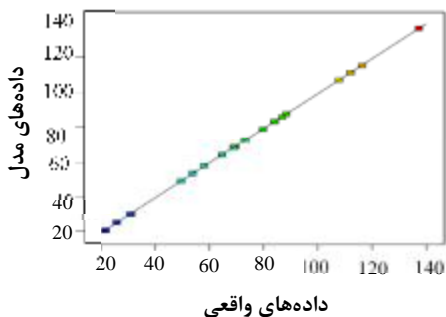
$$\begin{aligned}
 & - 3/37 C - 2/91 D + 0/3500 AB - 0/2375 AC - 0/4800 BD \\
 & + 1/95 CD - 5/11 A^2 - 11/81 B^2 - 9/62 C^2 - 6/54 D^2
 \end{aligned} \quad (۸)$$

$$\begin{aligned}
 & + 30/57969 A + 24/30340 B + 11/68630 C + 13/53758 D + \\
 & 0/28000 AB - 0/95000 AC - 0/16000 BD + 0/324583 CD - 3/26800 A^2 - 0/118100 B^2 - \\
 & 2/40438 C^2 - 0/726250 D^2
 \end{aligned} \quad (۹)$$

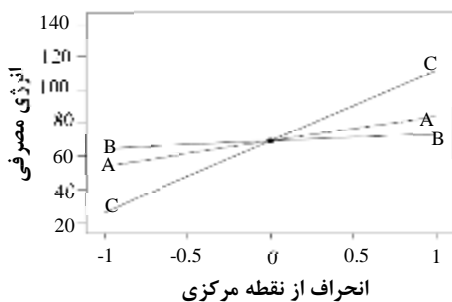
جدول‌های ۵ و ۶ عوامل آماری محاسبه شده در رگرسیون گام به گام بر اساس مدل پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. ضریب تعیین (R²) محاسبه شده با مقدار ۰/۹۹۹۴ برای عملکرد و مقدار ۱ برای انرژی مصرفی نشان می‌دهد که مدل به خوبی با داده‌ها تناسب دارد.

ضریب تغییرات (C.V) به ترتیب برای عملکرد و انرژی مصرفی برابر ۰/۳۰ و ۰/۳۲ حاصل شد که با توجه به مقادیر پایین آن و مقادیر نزدیک به عدد ۱ برای ضریب تعیین (R²)، نشان‌دهنده مطابقت زیاد داده‌های به دست آمده از آزمایش و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار است.

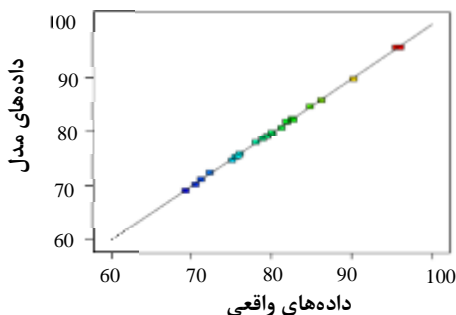
بر اساس طرح Box- Behnken و نتایج آزمایش‌ها، معادله کد گذاری شده ((۸) و ((۱۰) و معادله واقعی ((۹) و



شکل ۳- برازش داده‌های تجربی در مقابل داده‌های مدل برای تولید متیل استر



شکل ۴- اثر ورودی‌های مدل نسبت به نقطه مرکزی در افزایش مقدار انرژی مصرفی



شکل ۵- برازش داده‌های تجربی در مقابل داده‌های مدل برای انرژی مصرفی

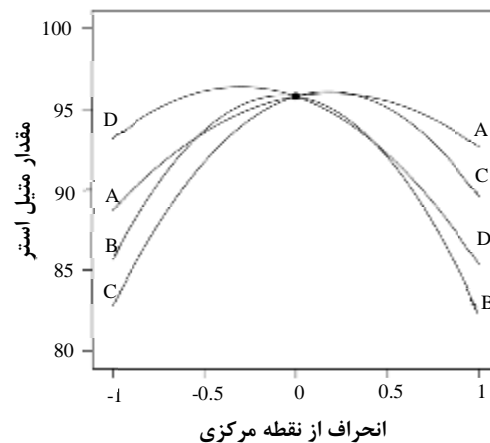
تأثیر متغیرهای مستقل بر محتوی متیل استر

در شکل ۶ نمودارهای کانتور و سه بعدی درصد بازدهی و انرژی مصرفی با استفاده از روش سطح پاسخ برای چهار متغیر فرکانس نوسان، دما، زمان واکنش و نسبت مولی نشان داده شده است. شکل ۶-الف درصد تبدیل متیل استر را به ازای تغییرات فرکانس نوسان و دما نشان می‌دهد. فرکانس نوسان در این پژوهش در سه سطح و با مقادیر (۲/۴، ۳/۷ و ۴/۹) بوده که طبق شکل با افزایش فرکانس از ۲/۴ به ۳/۶۵ هرگز درصد تبدیل به میزان ۸/۸

$$(10) \quad +69/06 + 15/02 A + 4/37 B + 42/96 C + 10/32 AC - 0/250 BC$$

$$(11) \quad -17/7488 - 0/367667 A + 0/474333 B + 7/03207 C + 4/12900 AC - 0/12500 BC$$

مقادیر پیش از هر عامل در معادلات ذکر شده (ضرایب)، به میزان اهمیت هر عامل و نوع اثر گذاری آن‌ها اشاره دارد به طوری که ضریب بزرگ‌تر از تأثیرگذاری بیش‌تر آن عامل حکایت دارد. همچنین علامت منفی ضریب نشان دهنده اثر معکوس و ضرایب مثبت نشان دهنده اثر مثبت (هم‌افزایی) عوامل است. بنابراین ضریب منفی نشان دهنده کاهش محتوی متیل استر است. با توجه به ضرایب همبستگی معادله ۸ و ۱۰ می‌توان ادعا کرد زمان واکنش، بسامد نوسان و دما به ترتیب بیش‌ترین اثر را در افزایش محتوی متیل استر و انرژی مصرفی داشته‌اند. زمان نسبت به نمودار سایر متغیرها از شیب بیشتری برخوردار بوده که نشان‌دهنده تأثیر بالای این متغیر در افزایش بازده بیودیزل است (شکل ۲).



شکل ۲- اثر ورودی‌های مدل نسبت به نقطه مرکزی در افزایش مقدار متیل استر

در شکل ۳ مقادیر پیش‌بینی شده برای عملکرد بیودیزل توسط مدل بسیار نزدیک به مقادیر به دست آمده از آزمایش بوده است.

در شکل ۴ نیز با وجود مشاهده تغییرات خطی عوامل، اثر زمان واکنش در فزونی انرژی مصرفی به شدت محسوس است.

برای انرژی مصرفی (شکل ۵) مقادیر مدل و داده‌های واقعی دقیقاً بر هم منطبق هستند.

درصد) را به همراه داشته و در ادامه با افزایش ۲۰ درصدی دما (۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس) روند نزولی در درصد تبدیل (۱۴/۱ درصد) مشاهده می‌شود. افزایش درصد تبدیل با بالا رفتن دما به دلیل دریافت انرژی سینتیکی کافی توسط واکنش‌دهنده‌ها است که سبب افزایش سرعت میزان انتقال جرم در بین متانول، روغن پسماند خوراکی و کاتالیزور می‌شود. در واقع افزایش دما تا رسیدن به یک مقدار بهینه (۵۰ درجه سلسیوس) با توجه به ماهیت تعادلی واکنش ترانس استریفیکاسیون و وابستگی ثابت تعادل و سرعت واکنش به دما قابل توجه است. با این حال، میزان دماهای بالاتر می‌تواند موجب کاهش آن نیز شود. علت اصلی این اتفاق این است که نقطه جوش متانول برابر ۶۴/۷ درجه سلسیوس بوده و در دمای بالاتر از آن، وارد حالت بخار خواهد شد و در نتیجه مقدار آن به عنوان واکنش دهنده در تماس با روغن پسماند خوراکی و کاتالیزور کاهش یافته و در نتیجه آن، بازده بیودیزل در دماهای بالاتر کاهش می‌یابد (Mansoorsamaei et al., 2022). دلیل دوم آن، تسریع واکنش نامطلوب صابونی شدن در دماهای بسیار بالا در شرایط قلیایی است که باعث کاهش میزان بازدهی واکنش می‌شود. دلیل سوم کاهش بازده در دماهای بالاتر را می‌توان به تجزیه متیل استر اسیدهای چرب غیراشباع نسبت داد؛ که سبب کاهش میزان بازدهی واکنش می‌شود (Shenavaei Zare et al., 2021). شکل ۶-د اثرات زمان و نسبت مولی بر درصد تبدیل متیل استر را نشان می‌دهد. نسبت مولی در این پژوهش در سه سطح و با مقادیر (۶:۱، ۹:۱ و ۱۲:۱) در نظر گرفته شده است. نرخ افزایش درصد تبدیل بیودیزل با ۵۰ درصد افزایش در نسبت مولی (۶:۱ به ۹:۱)، ۵/۵ درصد افزایش یافته و با بالاتر بردن ۳۳ درصدی نسبت مولی (۹:۱ به ۱۲:۱)، به میزان ۹/۲ درصد کاهش یافته است. نحوه تغییرات نسبت مولی بر درصد تبدیل کاملاً با مطالعه Ansari Samani et al., 2023 و Fayyazi et al., 2015 همگون است. از نظر استوکیومتری به ازای هر مول تری گلیسیرید، سه مول الکل مورد نیاز است اما در عمل برای افزایش اختلاط و افزایش تماس بین مولکول الکل و تری گلیسیرید، جایجایی تعادل و تولید بیشتر استر در فرایند ترانس استریفیکاسیون روغن، معمولاً مقدار بیشتری الکل استفاده می‌شود تا واکنش را به سمت تکمیل و تولید

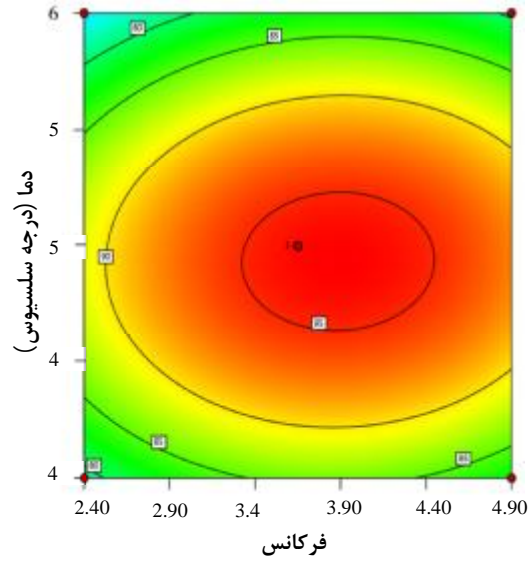
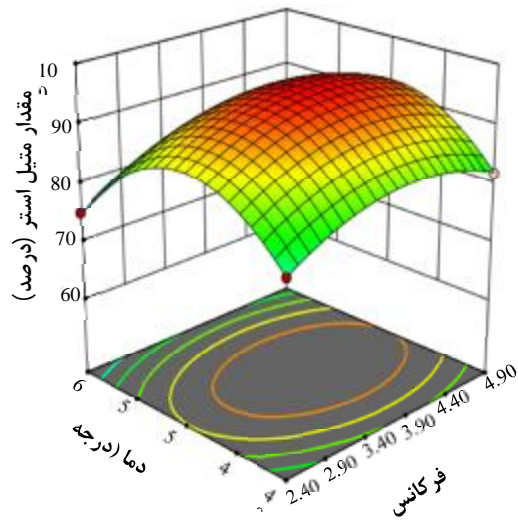
درصد (۷۹ به ۸۶ درصد) افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر فرکانس تا مقدار ۴/۹ هرتز از میزان درصد تبدیل به مقدار ۴/۷ درصد (۸۶ به ۸۱ درصد) کاسته می‌شود. افزایش فرکانس سبب بالا رفتن سرعت واکنش شده و افزایش شدت اختلاط دو حالت متوکسید و روغن را منجر و در نتیجه سبب بهبود عمل اختلاط و همزنی واکنش می‌شود. نتایج مشابهی در پژوهش‌های Metaweia et al., 2018 و Soufi et al., 2017 گزارش شد.

به بیان دیگر، عدد رینولدز با افزایش فرکانس نوسان و سرعت افزایش می‌یابد که این تغییرات منجر به تلاطم بیشتر و تشکیل گردابه می‌شود. افزایش تلاطم با تشکیل گردابه‌ها منجر به متلاشی شدن قطرات و هم‌چنین افزایش سطح واکنش شده و در نتیجه انتقال جرم و عملکرد واکنش نیز افزایش می‌یابد (Taki et al., 2022). خطوط تراز درصد تبدیل متیل استر به ازای تغییرات فرکانس و زمان در شکل ۶-ب آمده است. ۱، ۳ و ۵ دقیقه مقادیر زمان در سه سطح هستند که طبق معادله ۸ بیش‌ترین اثر گذاری را در مقادیر درصد تبدیل دارا بود. لذا مشاهده می‌شود با افزایش زمان واکنش تا ۳ دقیقه، میزان درصد تبدیل متیل استر ابتدا از ۷۵ درصد به ۸۸ درصد افزایش (۱۷/۶ درصد) و سپس از زمان ۳ تا ۵ دقیقه درصد تبدیل از ۸۸ درصد به ۸۲ درصد (۷ درصد) کاهش یافته است. نتیجه به دست آمده ضمن مطابق بودن با پژوهش‌های (Hosainzade Samani et al., 2021) و (Farvardin et al., 2019)، اینگونه تفسیر می‌شود که افزایش زمان واکنش تا حد معینی سبب کامل‌تر شدن واکنش بین متانول و روغن شده و افزایش بازده تولید را منجر می‌شود. این بازده به صورت صعودی تا یک نقطه‌ای افزایش یافته (۳ دقیقه) و به اوج خود رسیده اما بعد از آن نقطه سیر نزولی بازده واکنش مشاهده می‌شود. گلیسیرین و متانول هر دو قطبی بوده و در هم‌دیگر حل می‌شوند. لذا با افزایش زمان و تولید گلیسیرین، مقدار متانول بیش‌تری در آن حل و از دسترس واکنش اصلی خارج می‌شود. لذا واکنش به سمت تولید متانول برگشته و از بازده واکنش اصلی کاسته می‌شود (Wang et al., 2006).

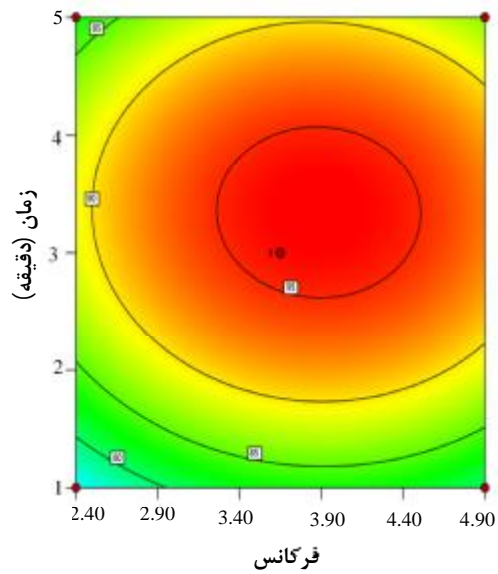
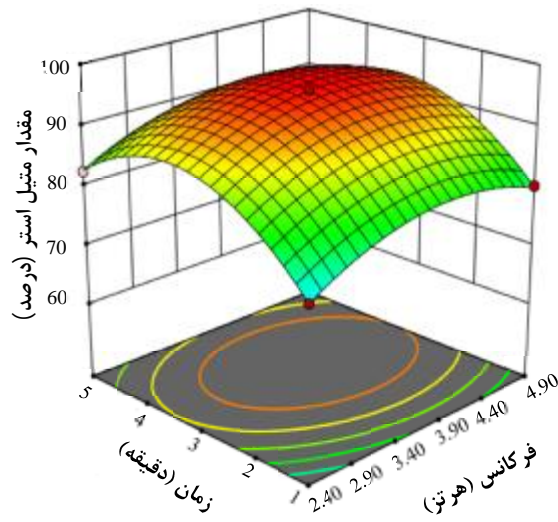
بر طبق شکل ۶-ج که نمودار سه بعدی و کانتور اثر دما و نسبت مولی را بر تغییرات درصد تبدیل متیل استر نشان می‌دهد. افزایش ۲۵ درصدی دما (۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس)، روند صعودی درصد تبدیل متیل استر (۱۲/۶

حلالیت گلیسرول در متانول اضافی، جداسازی دو لایه‌ی گلیسرول و بیودیزل بسیار دشوار می‌شود و باقی ماندن گلیسرول باعث از دست رفتن بیودیزل تولید شده می‌شود (Rabie et al., 2019).

متیل استرهاى بیش‌تر به عنوان محصول واکنش سوق دهد. پس از نسبت بهینه متانول به روغن، بازدهی تولید استر مقداری کاهش یافت. علت آن است که هنگام بالاتر بودن نسبت متانول به روغن از حد بهینه، به دلیل

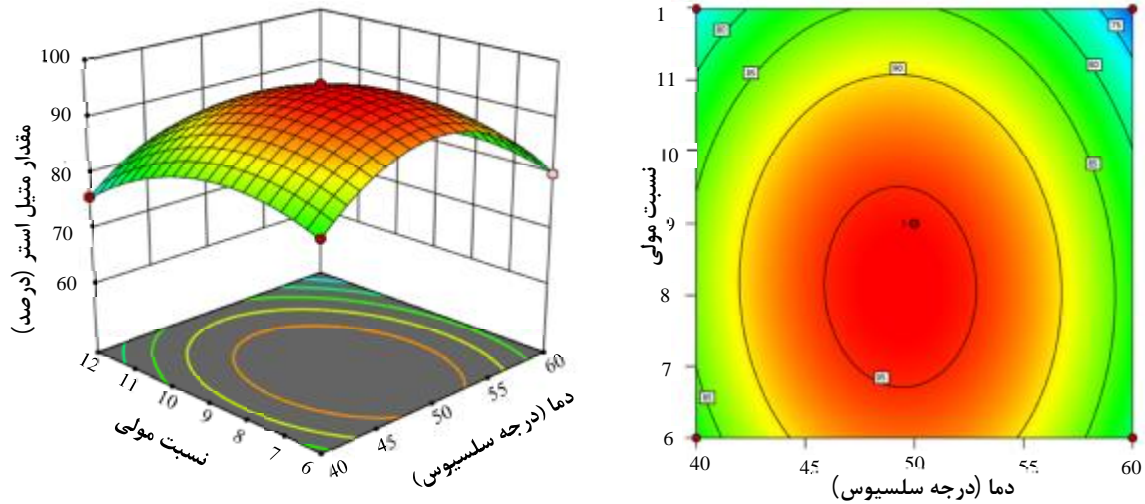


(الف)

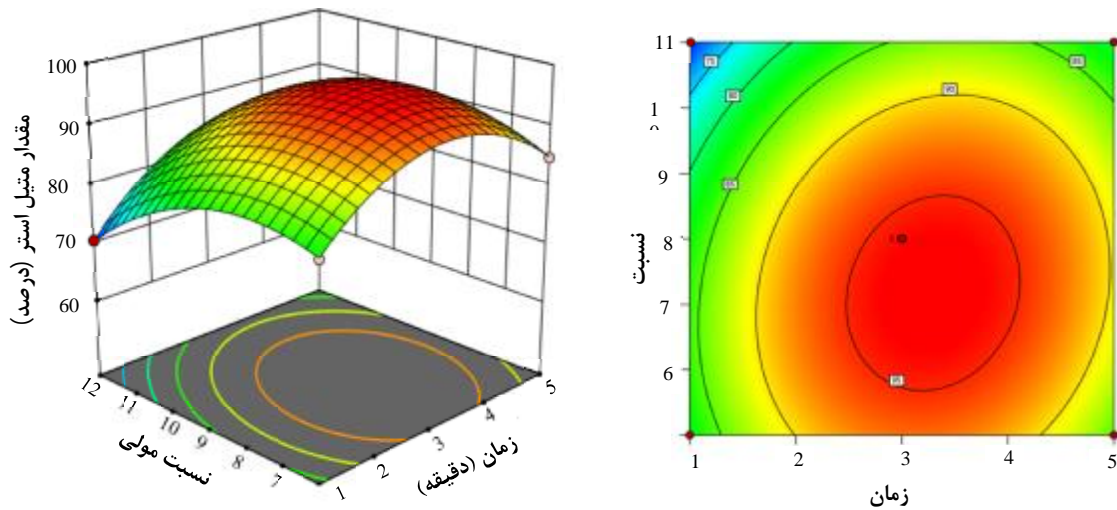


(ب)

شکل ۶- تأثیر متقابل متغیرهای مستقل بر محتوی متیل استر



(ج)



(د)

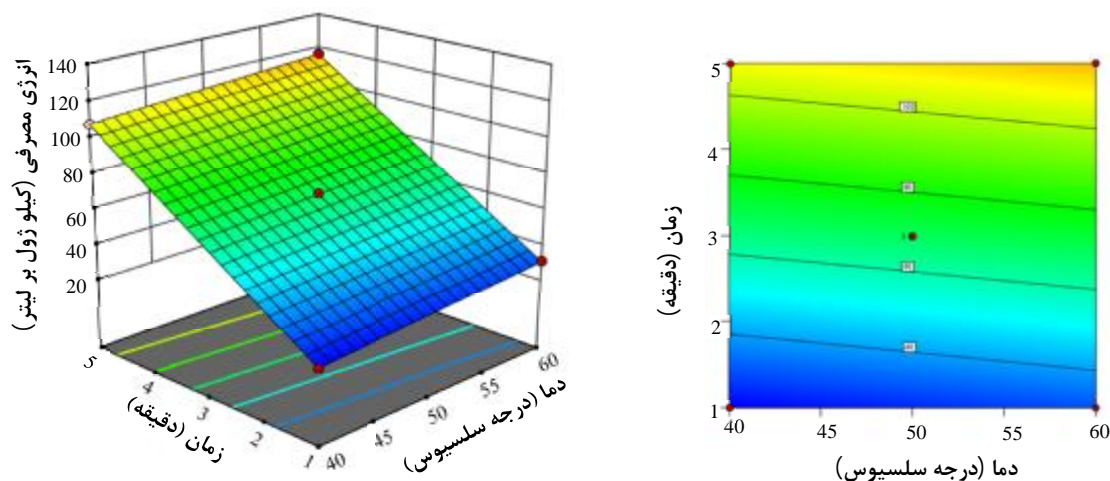
ادامه شکل ۶- تأثیر متقابل متغیرهای مستقل بر محتوی متیل استر

مصرفی را ثابت کند. افزایش زمان به صورت خطی با شیب زیاد سبب صعود انرژی مصرفی بر طبق شکل ۷-ب شده است. با توجه به رابطه مستقیم (خطی) که بین انرژی مصرفی و زمان وجود دارد (معادله (۷)) و پژوهش *Porvosoghi et al., (2012)* قابل توجیح است که نمودار تغییرات زمان بر حسب انرژی بصورت خطی نمایان گردد. همچنین طبق معادله (۱۰)، چون ضریب زمان بالاترین ضریب در معادله بوده است لذا از تاثیرات زیاد این عامل بر میزان انرژی مصرفی حکایت دارد. همچنین طبق شکل برهم کنش دو متغیر دما و زمان (BC) پایین نمایش داده

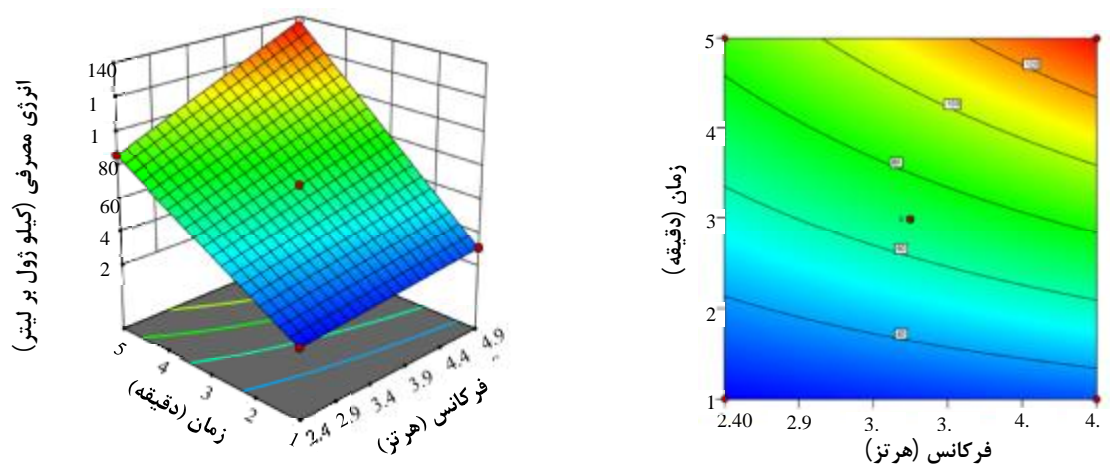
اثرات فرکانس و زمان را بر میزان انرژی مصرفی در فرایند تولید بیودیزل در شکل ۷-الف نمایان است. طبق شکل، افزایش ۵۴ درصدی فرکانس نوسان (۲/۴ به ۳/۷ هرتز)، بیش‌تر شدن انرژی مصرفی به میزان ۲۳ درصد و بالا بردن ۳۲ درصدی فرکانس نوسان (۳/۷ به ۴/۹ هرتز) ازدیاد ۱۴ درصدی انرژی مصرفی را بیان می‌کند. همچنین گذشت زمان، شیب صعود انرژی مصرفی با ازدیاد فرکانس نوسان، بیش‌تر است. اختلاف کم بین سطوح فرکانس نوسان در این بررسی (۲/۴، ۳/۷ و ۴/۹ هرتز)، می‌تواند اثر گذاری کم این عامل بر میزان انرژی

لذا دما طبق شکل تأثیر ناچیزی بر روند انرژی مصرفی دارد، در حالی که توزیع مناسب دما در مخلوط واکنش کاهش مصرف انرژی را در رآکتورها منجر می‌شود (Zhang et al., 2010).

شده است که این موضع با توجه به معادله (۱۰) و ضریب پایین این برهم‌کنش در آن (-۰/۲۵) صحه‌گذاری شده است. از آنجایی که در این پژوهش فقط انرژی مصرفی رآکتور در هنگام کار مورد مطالعه قرار گرفت و در بالا بردن دمای واکنش مقادیر انرژی مصرفی لحاظ نگردید،



(الف)



(ب)

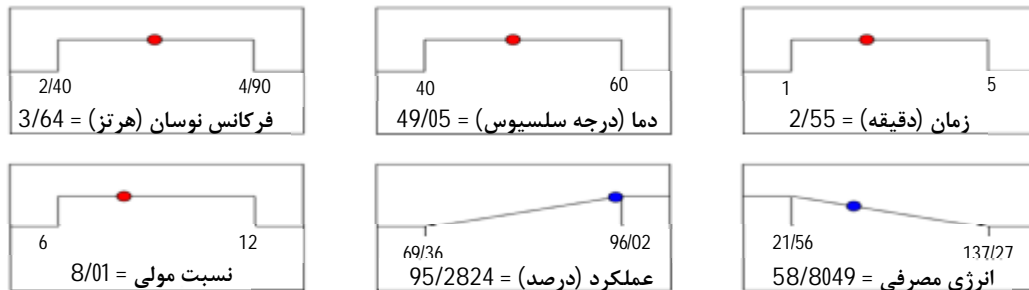
شکل ۷- تأثیر متقابل متغیرهای مستقل بر انرژی مصرفی

سلسیوس، زمان واکنش ۲/۵۵ دقیقه و نسبت مولی ۸/۰۱ به عنوان نتایج بهینه‌سازی به دست آمد. ضمن این‌که مقدار بازده بیودیزل تولیدی و انرژی مصرفی در نقاط بهینه به ترتیب ۹۵/۲۸۲۴ درصد و ۵۸/۸۰۴۹ کیلو ژول بر لیتر برآورد شدند (شکل ۸).

بهینه‌سازی متغیرهای مستقل مؤثر بر عملکرد رآکتور سپرک‌دار نوسانی
مقادیر بهینه متغیرها برای حالتی که بیش‌ترین بازده واکنش و کم‌ترین انرژی مصرفی در آن رخ دهد توسط بخش بهینه‌سازی نرم افزار سطح پاسخ تعیین شدند. فرکانس نوسان ۳/۶۴ هرتز، دمای واکنش ۴۹/۰۵ درجه

به دست آمد. میزان افزایش بازده واکنش در آزمایشگاه برابر ۹۶ درصد تعیین شد. اختلاف اندک بین مقدار بهینه نظری و مقدار بهینه به دست آمده در آزمایشگاه، صحت روش بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

برای صحت‌سنجی، نقاط پیشنهادی در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای عملی شدن آزمایش، مقدار برآورد شده به نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد شدند و بر این اساس فرکانس نوسان $3/7$ هرتز، دمای واکنش ۵۰ درجه سلسیوس، زمان واکنش ۳ دقیقه و نسبت مولی ۹،



شکل ۸- بهینه‌سازی فرآیند بر اساس مدل سطح پاسخ برای رآکتور جریان نوسانی

آن‌جایی که شاهد زمان واکنش کم در تولید بیودیزل در این مطالعه بودیم، لذا میزان انرژی مصرفی نگران کننده نخواهد بود.

به‌کارگیری سامانه فراصوت به عنوان پیش‌تیمار در این پژوهش به افزایش انتقال جرم و اختلاط بین حالت‌ها در شروع واکنش کمک کرده و در کنار آن استفاده از دو محفظه به صورت سری و پیوسته در رآکتور سپرک‌دار نوسانی علاوه بر افزایش شدت ترکیب حالت‌های متانول و روغن، منجر به کاهش قابل توجه زمان واکنش می‌شود که در مقایسه با عملکرد سایر رآکتورهای سپرک‌دار نوسانی متداول منحصر به فرد است.

کاربرد بالای رآکتورهای سپرک‌دار نوسانی در صنعت و اخیراً در تولید سوخت‌های زیستی غیر قابل انکار بوده و نیاز به پژوهش محققان در این زمینه را برای رفع کاستی‌های پیش‌رو و مقبولیت بیشتر آن‌ها دو چندان کرده است، از این‌رو پیشنهاد می‌شود عملکرد این رآکتورها با سامانه‌های نوینی مانند هیدرودینامیک، پلاسمای سرد و ... ارزیابی و در جهت بهبود کارایی و کاربردی کردن هرچه بیشتر آن‌ها قدم‌های بلندی برداشته شود.

منابع

Ahmed, S. M. R., Phan, A. N., & Harvey, A. P. (2017). Scale-up of oscillatory helical baffled reactors based on residence time distribution, *Chem. Eng. Technol*, 907-914.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی رآکتور سپرک‌دار نوسانی دو محفظه‌ای در تولید پیوسته بیودیزل از روغن پسماند خوراکی به منظور دستیابی به بیشینه بازده در تولید بیودیزل و کم‌ترین انرژی مصرفی انجام شد. نتایج حاکی از این بود که با استفاده از رآکتور سپرک‌دار نوسانی و بهره‌گیری از پیش‌تیمار فراصوت، تغییر فرکانس نوسان از $2/4$ به $3/6$ باعث $8/5$ درصد افزایش در محتوی متیل استر تولیدی می‌شود، چرا که افزایش بسامد منجر به تلاطم و ایجاد گردابه در رآکتور شده و یک هم‌زنی به شدت بالایی را در طول فرآیند واکنش فراهم می‌کند. با افزایش زمان واکنش تا ۳ دقیقه، میزان درصد تبدیل متیل‌استر ابتدا $17/4$ درصد افزایش یافت و از زمان ۳ دقیقه به بعد سیر نزولی در آن مشاهده شد. برگشت‌پذیر بودن واکنش و حل شدن مقداری متانول در گلیسرین از علل این تغییرات بوده است.

بالا رفتن دمای واکنش تا دمای بهینه باعث افزایش درصد تبدیل می‌شود، ولی با افزایش دما از این مقدار به دلیل سرعت بخشی به صابونی شدن واکنش و از طرفی تبخیر متانول که باعث خروج آن از محیط واکنش می‌شود درصد تبدیل با افت مواجه می‌شود.

افزایش زمان واکنش بر میزان انرژی مصرفی فرایند تولید بیودیزل می‌افزاید، ولی فرکانس نوسان و دمای واکنش بر تغییرات انرژی مصرفی اثرگذار نبودند، هم‌چنین از

- Technology and Biotechnology*, 78 :338-341.
- Hosainzade Samani, B., Behruzian, M., Najafi, G.H., Fayyazi, E., Ghobadian, B., Behruzian, A., Mofijur, M., & Yue, J. (2021). The rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor approach for enhanced biodiesel fuel production.
- Hosainzade Samani, B., Zareiforush, H., Lorigoini, Z., Ghobadian, B., Rostami, S. & Fayyazi, E. (2016). Ultrasonic-assisted production of biodiesel from *Pistacia atlantica* Desf. oil, *Fuel*, 168: 22-26.
- Mahmood Khan, H., Iqbal, T., Haider Ali, C., Javaid, A. & Iqbal Cheema, I. (2020). Sustainable biodiesel production from waste cooking oil utilizing waste ostrich (*Struthio camelus*) bones derived heterogeneous catalyst. *Fuel*, 277: 118091.
- Mansoorsamaei, Z., Mowla, D., & Esmailzadeh, F. (2022). *Waste cooking oil transesterification to biodiesel using biomass-derived heterogeneous catalyst*. School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering M.Sc. Thesis in Chemical Engineering-Environment. (In Persian).
- Mazubert, A. (2014). Selection, development and design of a continuous and intensified reactor technology to transform waste cooking oil in biodiesel and biosourced formulations.
- Metawea, R., Zewail, T., El-Ashtouky, E. S. (2018). Process intensification of the transesterification of palm oil to biodiesel in a batch agitated vessel provided with mesh screen extended baffles. *Energy*, 158: 111-120.
- Moradi, Z., Molaeimanesh, G.H., & Zahedi, A. (2022). *A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of master of science in automotive engineering*. iran university of science and technology automotive engineering Department. (In Persian).
- Okitsu, K., Sadanaga, Y., Takenaka, N., Maeda, Y., & Bandow, H. (2010). Ultrasound-assisted production of biodiesel fuel from vegetable oils in a small scale circulation process. *Bioresource Technology*, 101(2): 639-645.
- Rabie, A. M., Shaban, M., Abukhadra, M. R., Hosny, R., Ahmed, S. A., & Negm, N. A., (2019). Diatomite supported by CaO/MgO nanocomposite as heterogeneous catalyst for biodiesel production from waste cooking oil. *Journal of Molecular Liquids*, 279: 224-31.
- Shenavaei Zare, T., ZareNezhad, B., & Khoshshima, A. (2021). *Production of biodiesel from plants resistant to adverse*
- Alishahi, A., Golmakani, M., & Niakousari, M. (2021). Optimization of Ohmic- and Microwaveassisted Esterification of Oil Factory Wastes. *School of Agriculture-Department of Food Science, Engineering and Technology*.
- Ansari Samani, M., Hosseinzadeh Samani, B., Ghasemi Varnamkhasti, M., Rostami, S., & Ebrahimi, R. (2023). Modeling and Optimization of Cold Atmospheric-Ultrasonic Plasma Biodiesel Production System Using Response Surface Method. *Agricultural Machinery Mechanics Research*,; 12(4): 55-68. doi: 10.22034/jrmam.2023.14230.650
- Bianchi, P., Williams, J. D. & Kappe, C.O. (2020). Oscillatory flow reactors for synthetic chemistry applications. *Journal of Flow Chemistry*, 10 :475-490.
- Farvardin, M., Hosainzade Samani, B., Rostami, S., Abbaszadeh-Mayvan, A., Najafi, Gh & Fayyazi, E. (2019). *Enhancement of biodiesel production from waste cooking oil: ultrasonic-hydrodynamic combined cavitation system*. energy sources, part A: recovery utilization, and environmental effects.
- Fayyazi, E., Ghobadian, B., Safieddin Ardebili, S.M., Najafi, G., Mousavi, S. M., Hosseinzadeh Samani, B. & Yue, J. 2021. Biodiesel fuel purification in a continuous centrifugal contactor separator: An environmental-friendly approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47: 101511.
- Fayyazi, E., Ghobadin, B., Najafi, G., Hosseinzadeh, B., Mamat, R., & Hosseinzadeh, J. (2015). An ultrasound-assisted system for the optimization of biodiesel production from chicken fat oil using a genetic algorithm and response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 26: 312-320.
- Gerpen, J.V., Shanks, B., & Pruszko, R. (2004). Biodiesel Production Technology, National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden.
- Guo, J., Sun, S., & Liu, J. (2020). Conversion of waste frying palm oil into biodiesel using free lipase A from *Candida antarctica* as a novel catalyst, *Fuel*, 267: 117323.
- Gupta, J., Agarwal, M., & Dalai, AK. (2019). Intensified transesterification of mixture of edible and nonedible oils in reverse flow helical coil reactor for biodiesel production. *Renew Energy*, 134: 509-525.
- Harvey, A. P., Mackley, M. R. & Seliger, T. (2003). Process intensification of biodiesel production using a continuous oscillatory flow reactor. *Journal of Chemical*

- environmental conditions using microemulsion and nanocatalytic transesterification processes*. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of PhD in Chemical Engineering. (In Persian).
- Solmaz, H., Mohammad, S., Aksoy, F., Calam, A., Emre, Y. & Arslan, M. (2020). Optimization of the operating conditions of a beta-type rhombic drive stirling engine by using response surface method 2020, 198.
- Soufi, M. D., Ghobadian, B., Najafi, G., Mousavi, S. M., & Aubin, J. (2017). Optimization of methyl ester production from waste cooking oil in a batch tri-orifice oscillatory baffled reactor. *Fuel Processing Technology*, 167: 641-647.
- Phan, A. N. & Harvey, A. P. (2011). Effect of geometrical parameters on fluid mixing in novel mesoscale oscillatory helical baffled designs, *Chem. Eng. J.*, 169: 339-347.
- Porvosoghi, N., Nikbakht, A., Jafarmadar, S. & Tabatabaei, M. (2012). *Performance and Energy assessment of biodiesel production from waste vegetable oils and plastics. Department of Agricultural Machinery Engineering*. The Thesis Submitted to Graduate for the Degree of Msc. in Mechanics of Agricultural Machinery Urmia University. (In Persian).
- Stonestreet, P., & Harvey, A. P. (2002). *A mix-in based design methodology for continuous oscillatory flow reactors*. Institution of Chemical Engineers, Trans IChemE, Vol 80, Part A.
- Taki, K., Hosseinzadeh Samani, B., Rostami, S., & Besharati, SH. (2022) Design and fabrication of smooth periodic constriction reactor to biodiesel production from waste cooking oil, *Biofuels*, 13(8): 1007-1013.
- Wang, Y., Ou, S., Liu, P., Xue, F. & Tang, S. (2006). Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 252(1-2): 107-112.
- Wong, KY., Ng, J. H., Chong, CT., Lam, SS. & Chong, WT. (2019). Biodiesel process intensification through catalytic enhancement and emerging reactor designs: A critical review. *Renew Sustain Energy Rev*; 116: 109399.
- Zhang, S., Zu, Y. G., Fu, Y. J., Luo, M., Zhang, D. Y., & Efferth, T. (2010). Rapid microwave-assisted transesterification of yellow horn oil to biodiesel using a heteropolyacid solid catalyst. *Bioresource Technology*, 101(3): 931-936.

