



مدلسازی و بهینه سازی تولید بیودیزل از روغن سویا

سید محمد جوکار^{1*}، محمد پژمان²، پیام پرواسی³

1- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران
2- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران
3- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران
* شیراز، صندوق پستی ۷۱۵۵۷-۱۳۸۷۶، jokar@sutech.ac.ir

چکیده

با توجه به افزایش روز افزون آلودگی‌های زیست محیطی و کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، انتخاب جایگزینی مناسب برای سوخت‌های تجدید ناپذیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است؛ از جمله این سوخت‌های جایگزین می‌توان به بیودیزل‌ها که سوخت‌های تجدید پذیرند اشاره کرد. در این پژوهش، به مدلسازی و بهینه‌سازی ریاضی تولید بیودیزل روغن سویا طی فرآیند ترانس استریفیکاسیون با نرم افزار متلب و الگوریتم تکامل تفاضلی پرداخته شده است. واکنش ترانس استریفیکاسیون در حضور کاتالیزور پتاسیم هیدروکسید و در یک راکتور ناپیوسته انجام شده است. با توجه به داده‌ها و اطلاعات آزمایشگاهی، مدلی برای بررسی همزمان غلظت کاتالیزور در محدوده (0/1-4 wt%)، نسبت مولی متانول به روغن در محدوده (5-12) و دما در محدوده (25°C-65°C) طراحی شده است. همچنین پارامترهای سینتیکی مجهول در مدل توسعه داده شده محاسبه شد. مقایسه نتایج مدل و داده‌های تجربی نشان داد که مدل پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردار است. نتایج مدلسازی نشان داد بین بازده بیودیزل و پارامترهای موثر (دما، نسبت مولی روغن به الکل و غلظت کاتالیست) رابطه وجود دارد. با افزایش دما و نسبت مولی روغن به الکل و کاهش غلظت کاتالیست بازده بیودیزل افزایش می‌یابد. در انتها از مدل برای یافتن شرایط بهینه واکنش ترانس استریفیکاسیون جهت به حداکثر رساندن بازده بیودیزل استفاده شد. در شرایط بهینه‌ی غلظت کاتالیزور 0/4501 wt%، نسبت مولی متانول به روغن 15 و دمای 70°C مقدار بازده تولید بیودیزل به 96/87٪ رسید.

کلیدواژگان: بیودیزل روغن سویا، ترانس استریفیکاسیون، مدلسازی، بهینه سازی، راکتور ناپیوسته

Modeling and optimization of biodiesel production from soybean oil

Seyyed Mohammad Jokar^{1*}, Mohammad Pejman², Payam Parvasi³

11- Associate Professor, Department of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

2- MSc, Department of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

3- Assistant Professor, Department of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

* P.O.B. 13876-71557 Shiraz, Iran, jokar@sutech.ac.ir

Received: 14 February 2022 Accepted: 25 April 2023

Due to the increasing environmental pollution and the reduction of fossil fuel resources, the choice of a suitable alternative for non-renewable fuels has been given much attention. Among several alternative fuels, biodiesel is also clean and is produced from renewable sources. In this work, the mathematical modeling and optimization of the catalytic transesterification process for producing soybean oil biodiesel by MATLAB software and differential evolution algorithm has been investigated. The potassium hydroxide was selected as a homogenous catalyst for transesterification reactions in a batch reactor. Based on the experimental data, a model has been proposed to predict biodiesel production in the catalyst concentration range of (0.4-1wt%), methanol to oil molar ratio range of (5-12) and temperature range of (25-65°C). In addition, the unknown kinetic parameters of this model have been calculated. There was a good consistency between the model and experimental data. The modeling results showed that there is a relationship between biodiesel yield and effective parameters (temperature, oil to alcohol molar ratio and catalyst concentration). By increasing the temperature and oil to alcohol molar ratio and decreasing the catalyst concentration, the yield of biodiesel increases. Finally, the model was assisted in finding the optimal conditions of the

transesterification reaction to maximize biodiesel yield. In the optimal conditions (catalyst concentration of 0.4501 wt%, molar ratio of methanol to oil of 15 and temperature of 70°C) the biodiesel yield reached 96.87%

Keywords: Soybean Oil Biodiesel, Transesterification, Modeling, Optimization, Batch Reactor

1- مقدمه

با توجه به تقاضای روزافزون برای انرژی که حجم عمده‌ای از آن را سوخت‌های فسیلی تشکیل می‌دهد، مشکلاتی مانند آلودگی‌های محیط زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش ذخایر آن‌ها در پیش‌رو خواهد بود [2-1].

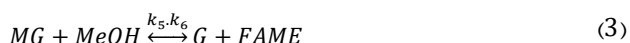
بیودیزل، سوخت زیستی مایع متشکل از متیل استرها با زنجیره طولانی مانند: اسید پالمیتیک، اسید اولئیک و اسید استئاریک است [3-4]. پس، بیودیزل پتانسیل جایگزینی سوخت‌های فسیلی را داراست و دارای خصوصیات فیزیکی مشابه با دیزل است. از مزایای انواع مختلف بیودیزل می‌توان به زیست تخریب‌پذیری، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (به دلیل احتراق کامل)، سمیت کاهش یافته و راندمان بهتر احتراق اشاره کرد [5-7]. تولید بیودیزل به طور معمول با روش ترانس استریفیکاسیون یک لیپید با الکل و کاتالیزور انجام می‌شود که باعث تولید اسید چرب متیل استر و گلیسرول به عنوان یک محصول جانبی می‌شود [8]. خوراک اصلی تولید سوخت بیودیزل انواع مختلفی از ترکیبات آلی چرب است که در یک تقسیم‌بندی منطقی به چهار گروه تقسیم می‌شوند [9]:

- روغن‌های نباتی خام مانند: روغن سویا و روغن کلزا که بیشتر رایج هستند و سایر روغن‌های گیاهی مانند روغن خردل، خرما، روغن آفتابگردان و کف.
- پسماند روغن‌های گیاهی
- چربی‌های حیوانی شامل: پیه، چربی خوک و روغن چرب زرد
- روغن‌های جلبک

انتخاب روغن یا چربی برای تولید سوخت به شیمی فرآیند، اقتصاد فرآیند و از همه مهمتر به محتوای روغن خوراک بستگی دارد [10]. ترانس استریفیکاسیون بدلیل کم هزینه بودن و سادگی در مقابل سایر روش‌ها رایج‌ترین شیوه تولید بیودیزل است که در آن به طور معمول از کاتالیزور برای بهبود سرعت واکنش و عملکرد تولید این سوخت استفاده می‌شود. این واکنش توسط کاتالیزورهای همگن یا ناهمگن، قلیایی، اسیدی و یا توسط آنزیم‌ها انجام می‌شود. کاتالیزورهای قلیایی همگن مفیدتر از کاتالیزورهای اسیدی همگن هستند زیرا سرعت آن‌ها تقریباً 4000 برابر سریعتر است [11]. هیدروکسید پتاسیم¹ به عنوان یک کاتالیزور قلیایی به دلیل کم هزینه بودن و عملکرد بالا در بسیاری از تحقیقات مورد توجه قرار گرفته است [12-13].

از الکل اضافی به دلیل ماهیت برگشت پذیری واکنش برای تغییر تعادل به سمت محصول استفاده می‌شود [8]. هدف اصلی این واکنش کاهش ویسکوزیته روغن، افزایش نوسانات و همچنین سوزاندن اسید چرب آکلیل در موتور دیزل بدون تغییرات اصلاحی در موتور است [14]. اگرچه استفاده از حلال‌هایی مثل متانول باعث افزایش کارایی و سرعت واکنش می‌شود اما مشکلاتی از جمله حذف و دفع پس از واکنش دارد که می‌تواند به محیط زیست آسیب برساند.

فریدمن و همکاران [15] اولین محققانی بودند که سینتیک ترانس استری شدن را مدلسازی کردند و اولین تحقیق علمی در مورد تولید بیودیزل را انجام دادند. مدل سینتیکی ارائه شده توسط فریدمن و همکاران در سال 1986 برای پیش‌بینی ترانس استریفیکاسیون روغن سویا شامل هشت ثابت سینتیکی است که در معادلات 1 تا 4 نشان داده شده است.



در معادلات بالا، تری گلیسرید²، متانول³، دی گلیسرید⁴، مونو گلیسرید⁵، بیودیزل⁶ تحت عنوان متیل استر اسید چرب⁷ به عنوان محصول اصلی و گلیسرول⁸ به عنوان محصول جانبی نشان داده شده‌اند. به طور کلی، هر مول تری گلیسرید با سه مول متانول واکنش می‌دهد و سه مول بیودیزل و یک مول گلیسرول تولید می‌کند.

نورالدینی و ژو [16] از محققانی بودند که در مورد ترانس استریفیکاسیون روغن سویا با متانول با توجه به تغییرات سرعت اختلاط، دما و غلظت کاتالیست تحقیق کردند. زاگونل و همکاران [17] تولید بیودیزل از روغن سویا خام را بهینه کرده و روش‌های تحلیلی جدیدی برای کنترل فرآیند طراحی کردند تا ارزیابی بازده واکنش را تسهیل کنند. جیکوب و همکاران [18] به مطالعه ترانس استریفیکاسیون روغن سویا درون راکتور ناپیوسته برای پی‌بردن به مکانیسم، درجه واکنش، ثابت‌های سرعت واکنش و میزان دور همزن پرداختند تا با استفاده از اطلاعات بدست آمده تولید بیودیزل روغن سویا را در یک فرآیند پیوسته به صورت آزمایشی طراحی کنند.

پارامترهای زیادی بر روی فرآیند ترانس استریفیکاسیون روغن‌های مختلف تاثیر دارند که شامل: نوع روغن، دما، غلظت و نوع کاتالیزور و در نهایت نسبت مولی روغن به الکل می‌شوند. هدف این پژوهش، بهینه‌سازی و مدلسازی ریاضی تولید بیودیزل روغن سویا در راکتور ناپیوسته، در حضور متانول و کاتالیزور پتاسیم هیدروکسید است. با توجه به مقالات علمی غلظت کاتالیزور در محدوده (0/1-4 wt%)، نسبت مولی متانول به روغن (5-12) و دما (25°C-65°C) در نظر گرفته شده‌اند، تا تغییرات این پارامترها بر روی بازده تولید بیودیزل بررسی شوند.

2- مدلسازی ریاضی

² Triglyceride (TG)

³ Methanol (MeOH)

⁴ Diglyceride (DG)

⁵ Monoglyceride (MG)

⁶ Biodiesel

⁷ Fatty acid methyl ester (FAME)

⁸ Glycerol

¹ KOH

جدول 1 داده‌های تجربی اولیه گزارش شده در مقالات

مرجع	دما (°C)	نسبت مولی روغن به الکل	غلظت مولی اولیه تری گلیسرید	درصد وزنی کاتالیست
[15]	25	1:6	0/8342	0/4
[16]	30	1:7	0/7821	1
[17]	40	1:12	0/8403	0/8
[19]	45	1:5	0/8447	1
[18]	60	1:6	0/7560	1/09

$$k_i = k_{(i,0)} + k_{(i,1)} \cdot i \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (12)$$

معادله 13 تاثیر دما با رابطه آرنیوس نشان داده است.

$$k_{(i,0)} = A_i \times \exp(-E_i/RT) \quad (13)$$

در معادله 14 تاثیر تغییرات غلظت کاتالیست برای بدست آوردن ثوابت سرعت پیش‌بینی شده است.

$$k_{(i,1)} = B_i \times (\text{catalyst}) + C_i \times (\text{catalyst})^2 \quad (14)$$

در معادلات بالا A_i ، B_i و C_i ضرایب ثابت، E_i انرژی فعال سازی، T و R ثابت جهانی گازها و دما و catalyst غلظت کاتالیست است. این مدل پیشنهادی براساس تغییرات دما و غلظت کاتالیست است. ثابت‌های سرعت واکنش مدل به عنوان توابع مختلف دما و غلظت کاتالیزور در نظر گرفته شده‌اند تا اثر آن‌ها بر عملکرد تولید بیودیزل مورد ارزیابی قرار گیرد.

3- روش حل مدل

معادلات 6 تا 11 با استفاده از روش رانگ کوتا¹ مرتبه 4 که برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل غیر خطی است، توسط نرم افزار متلب 2016² حل شده‌اند. 24 ضریب ثابت مدل پیشنهادی با ترکیبی از روش الگوریتم تکامل تفاضلی³، روش رانگ کوتا و یک تابع هدف (معادله 15) تعیین شده‌اند.

روش کار به این صورت است که ابتدا مقادیری به عنوان حدس اولیه برای هر کدام از 24 ثابت در نظر گرفته می‌شود و سپس این مقادیر با روش رانگ کوتا برای معادلات 6 تا 11 حل می‌شوند. در نهایت غلظت محاسبه شده با غلظت‌های آزمایشگاهی توسط تابع هدف مورد مقایسه قرار می‌گیرند. همچنین، دلیل تعریف تابع هدف جهت حداقل کردن خطای مطلق بین داده تجربی مربوط به غلظت مولی اجزاء و غلظت مولی مدل پیشنهادی در متلب بوده است.

$$F = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{i=1}^{i=6} |C_i \text{ experimental} - C_i \text{ calculation}| \quad (15)$$

این محاسبات بارها بررسی می‌شوند تا مقدار تابع هدف به حداقل برسد.

ابتدا داده‌های آزمایشگاهی از مقالات علمی جمع‌آوری شده که این داده‌ها شامل تغییرات غلظت تمام اجزای سازنده (مطابق معادلات 1 تا 3) بر حسب تغییرات زمان است. پارامترهای متغیر برای مدل‌سازی شامل دما، نوع روغن، غلظت کاتالیزور پتاسیم هیدروکسید، غلظت اولیه‌ی تری‌گلیسرید و متانول هستند.

در این مدل‌سازی از غلظت‌های مولی برای اجزا مختلف استفاده شده است و غلظت کاتالیزور به صورت درصد وزنی گزارش شده است. جهت حل معادلات پیش رو مخلوط واکنش یک فاز همگن در نظر گرفته شده و واکنش‌های استری شدن را تعادلی و از درجه 2 و ثوابت واکنش‌ها را تابع دما و غلظت کاتالیزور فرض شده است. واکنش صابونی شدن بسیار ناچیز فرض شده است [19].

با توجه به معادلات 1 تا 3 و معادله 5 که سرعت واکنش درون راکتور ناپیوسته است، سرعت‌های هر شش جزء واکنش به صورت تعادلی و مانند معادلات دیفرانسیلی 6 تا 11 گزارش شده‌اند.

$$r_i = \frac{1}{V} \frac{dN_i}{dt} = \frac{dC_i}{dt} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (5)$$

در معادله بالا C_i ، N_i به ترتیب سرعت واکنش، غلظت مولی اجزا و تعداد مول اجزاء هستند.

$$\frac{d[TG]}{dt} = -k_1 [TG][MeOH] + k_2 [DG][FAME] \quad (6)$$

$$\frac{d[DG]}{dt} = k_1 [TG][MeOH] - k_2 [DG][FAME] - k_3 [DG][MeOH] + k_4 [MG][FAME] \quad (7)$$

$$\frac{d[MG]}{dt} = k_3 [DG][MeOH] - k_4 [MG][FAME] - k_5 [MG][MeOH] + k_6 [G][FAME] \quad (8)$$

$$\frac{d[FAME]}{dt} = k_1 [TG][MeOH] - k_2 [DG][FAME] - k_3 [DG][MeOH] - k_4 [MG][FAME] + k_5 [MG][MeOH] - k_6 [G][FAME] \quad (9)$$

$$\frac{d[G]}{dt} = k_5 [MG][MeOH] + k_6 [G][FAME] \quad (10)$$

$$\frac{d[MeOH]}{dt} = -\frac{d[FAME]}{dt} \quad (11)$$

طبق معادلات بالا، شش ثابت سرعت واکنش k_1 تا k_6 وجود دارد که علاوه بر این‌ها، هر ثابت سرعت واکنش با توجه به معادله‌های مربوط به مدل پیشنهادی یعنی معادلات 12-14، شامل چهار ثابت دیگر (ضرایب A_i ، B_i ، C_i و E_i) است. بنابراین، 24 ضریب در معادلات مربوط به مدل ارائه شده برای ثوابت سرعت وجود دارد که با توجه به داده‌های آزمایشگاهی جدول 1 برای ترانس استری شدن روغن سویا در زمان‌های 60 تا 120 دقیقه بدست آورده شده است.

1. Runge-Kutta

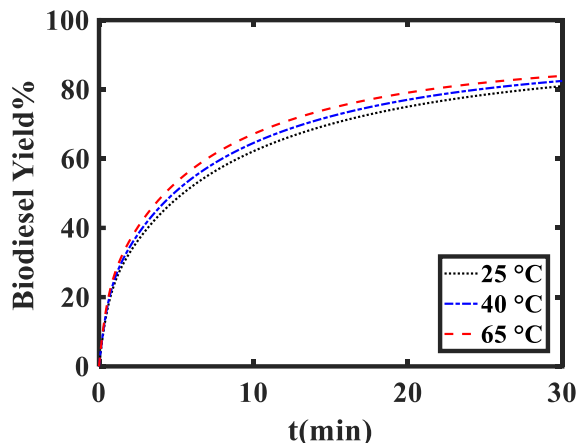
2. MATLAB 2016a

3. Differential evolution (DE)

4- بحث و نتایج

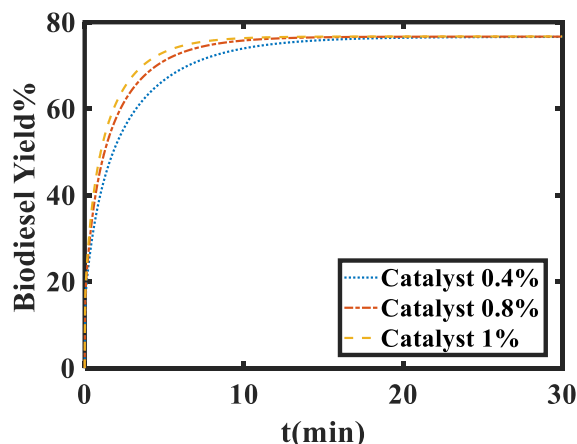
با توجه به معادلات ذکر شده و روش بهینه سازی پارامترهای مجهول با الگوریتم تکامل تفاضلی، تابع هدف به حداقل مقدار 0/09265 با 10000 تکرار¹ رسید. سپس، 24 ضریب بهینه شده ثابت سرعت واکنش‌ها با بالاترین دقت ممکن در جدول 2 نشان داده شده است. شکل 1 مقایسه دقت مدل با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود این مدل به خوبی توانسته روند داده‌های آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند.

¹. Iteration



شکل 2 اثر تغییرات دما بر بازده بیودیزل (غلظت کاتالیزور 1 درصد وزنی و نسبت مولی روغن به الکل 1 به 6)

تاثیر غلظت‌های مختلف کاتالیزور و نسبت‌های مختلف مولی روغن به متانول در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده است. در شکل 3 غلظت‌های مختلف کاتالیزور 0/4، 0/8 و 1 درصد وزنی در زمان انجام واکنش معینی بررسی شده‌اند.

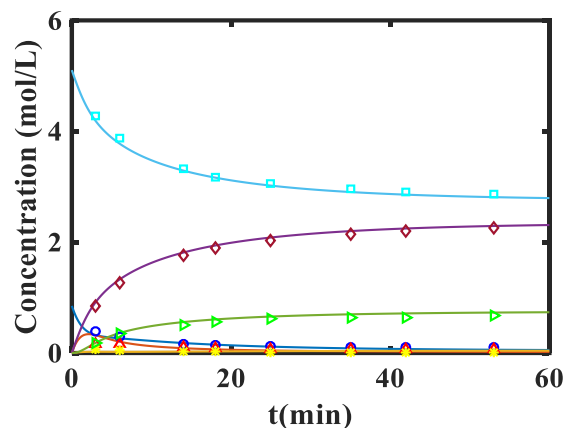


شکل 3 اثر تغییرات غلظت کاتالیزور بر بازده بیودیزل (دمای 25 درجه سانتی‌گراد و نسبت مولی روغن به الکل 1 به 6)

همانطور که مشخص است زمان رسیدن به بازده مطلوب‌تر با غلظت بیشتر کاتالیزور کوتاه‌تر می‌شود. پس، میزان کاتالیزور تنها بر زمان رسیدن به حداکثر میزان بازده تولید تاثیر دارد. به گونه‌ای که می‌توان با افزایش غلظت کاتالیست از 0/4 تا 1/0 درصد وزنی زمان واکنش را به نصف رساند. در شکل 4 تاثیر نسبت‌های مختلف مولی روغن به متانول بر بازده بیودیزل بررسی شده است. بیشترین تاثیر بر افزایش میزان بازده تولید بیودیزل مربوط به بیشترین نسبت مولی الکل به روغن است که نشان دهنده‌ی رابطه‌ی مستقیم بین آن‌ها است. همانطور که مشاهده می‌شود تاثیر نسبت الکل به روغن از غلظت کاتالیست و دما بیشتر است. با تغییر این نسبت از 6 به 12 می‌توان بازده تولید بیودیزل را از 80 به نزدیک 100 رساند. بنابراین می‌توان عنوان کرد که نسبت الکل به روغن مهم‌ترین پارامتر جهت به حداکثر رساندن بازده بیودیزل است.

جدول 2 ضرایب بهینه شده ثابت سرعت واکنش‌ها

k_i	A (mol. L ⁻¹ .min ⁻¹)	E (kJ. mol ⁻¹)	B (mol. L ⁻¹ .min ⁻¹)	C (mol. L ⁻¹ .min ⁻¹)
k_1	0/8117	6/742	0/0659	0/1260
k_2	2/0249	10/602	0/2527	1/2118
k_3	0/1400	2/482	0/0078	0/0135
k_4	0/1400	4/689	0/0044	0/0099
k_5	0/8538	0/858	0/3919	1/0173
k_6	0/0304	0/743	0/0827	0/0414



شکل 1 مقایسه بین مدل‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی (دمای 25 °C و غلظت کاتالیزور 0/4 و نسبت مولی روغن به الکل 1 به 6) [15]
(داده‌های آزمایشگاهی: MeOH□, FAME◇, TG○, DG△, MG*)

حال که متغیرهای مدل‌سازی با دقت خوبی پیش‌بینی شده‌اند به بررسی اثر دما، غلظت کاتالیزور، نسبت مولی الکل به روغن و شرایط بهینه در زمان‌های انجام واکنش معینی پرداخته شده است. شکل 2 با توجه به معادله 16 بازده تولید بیودیزل را نمایش می‌دهد. این شکل اثر دما در زمان‌های مختلف را برای بازده تولید بیودیزل بررسی کرده است. افزایش دما همان‌طور که در شکل 2 مشخص شده است، سبب افزایش سرعت واکنش و بازده بیودیزل شده است. تغییر دما از 25 به 60 درجه سانتی‌گراد می‌تواند بازده تولید بیودیزل را در حدود 4 درصد تغییر دهد. بنابراین می‌توان در دماهای پایین (دمای محیط) نیز به بازده مناسبی از بیودیزل رسید.

$$Yield = \frac{[FAME]}{3 \times [TG]_{initial}} \times 100 \quad (16)$$

مثل استانداردهای موجود و برآورد هزینه برای تولید این سوخت، امکان افزایش نسبت مولی متانول به روغن و افزایش دما به مقادیر دلخواه نیست.

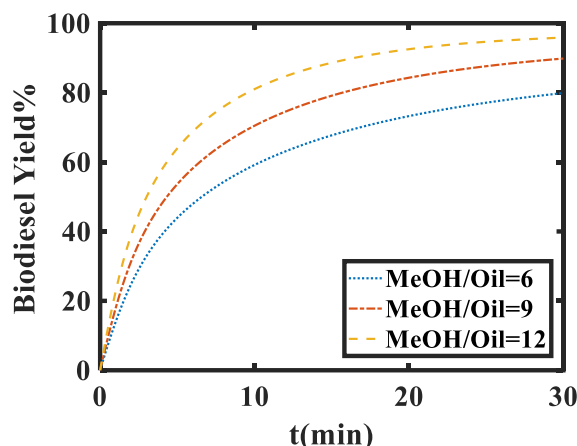
5- نتیجه گیری

در این پژوهش داده‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل تطابق خوبی را نشان دادند و دلیل این تطابق خوب انتخاب معادله مناسب برای ثابت‌های سرعت واکنش بود که به طور همزمان تغییرات دما و غلظت کاتالیزور را تحت پوشش قرار داده بود. این مدل نشان داد که افزایش پارامتری مثل غلظت کاتالیزور در کوتاه شدن زمان تاثیر به سزایی دارد. نتایج نشان داد که با افزایش دما، بازده و سرعت تولید افزایش پیدا می‌کند اما تاثیر آن چندان زیاد نیست. از میان پارامترهای بررسی شده به ترتیب نسبت الکل به روغن، غلظت کاتالیست و دما بیشترین تاثیر را در تولید بیودیزل دارند. بنابراین برای به حداقل رساندن هزینه‌ها در مقدار معینی کاتالیست می‌توان نسبت الکل به روغن را در دمای محیطی افزایش داد.

در ادامه شرایط بهینه تولید بیودیزل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل سازی نشان داد با بهینه سازی دما، نسبت متانول به روغن و غلظت کاتالیزور با الگوریتم تکامل تفاضلی و با در دست داشتن ثابت سرعت بهینه شده می‌توان به حداکثر بازده تولید بیودیزل روغن سویا یعنی 96/87٪ رسید. برای این منظور می‌توان از حداکثر نسبت الکل به روغن (15)، دمای بالا (70) درجه سانتیگراد و درصد وزنی کاتالیست معادل 0/4501 استفاده نمود.

6- مراجع

- [1] T.L. Chewand and S. Bhatia, Catalytic processes towards the production of biofuels in a palm oil and oil palm biomass-based biorefinery, *Bioresource technology*, Vol. 99, No. 17, pp. 7911-7922, 2008.
- [2] I.M. Atadashi, M.K. Aroua, and A.A. Aziz, Biodiesel separation and purification: a review, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 2, pp. 437-443, 2011.
- [3] J.K. Volkman, S.W. Jeffrey, P.D. Nichols, G.I. Rogers, and C.D. Garland, Fatty acid and lipid composition of 10 species of microalgae used in mariculture, *Journal of experimental marine biology and ecology*, Vol. 128, No. 3, pp. 219-240, 1989.
- [4] F.J. Gordillo, M. Goutx, F.L. Figueroa, and F.X. Niell, Effects of light intensity, CO₂ and nitrogen supply on lipid class composition of *Dunaliella viridis*, *Journal of Applied Phycology*, Vol. 10, No. 2, pp. 135-144, 1998.
- [5] L.G. Roberts, and T.J. Patterson, Biofuels, *Biomedical Sciences*, pp. 469-475, 2014.
- [6] D. Adu-Mensah, D. Mei, L. Zuo, Q. Zhang, and J. Wang, A review on partial hydrogenation of biodiesel and its influence on fuel properties, *Fuel*, Vol. 251, pp. 660-668, 2019.
- [7] F. Haghghat Shoar and J. Tarighi, review of different biodiesel production methods, conditions, raw materials and technologies, *Journal of renewable and new energy*, Vol. 8, No. 2, pp. 21-32, 2021.
- [8] S.P. Singh, and D. Singh, Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: a review, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 14, No. 1, pp. 200-216, 2010.
- [9] M. Mittelbach, and B. Trathnigg, Kinetics of alkaline catalyzed methanolysis of sunflower oil, *Lipid/Fett*, Vol. 92, No. 4, pp.145-148, 1990.
- [10] D. Ganesan, A. Rajendran, and V. Thangavelu, An overview on the recent advances in the transesterification of vegetable oils for



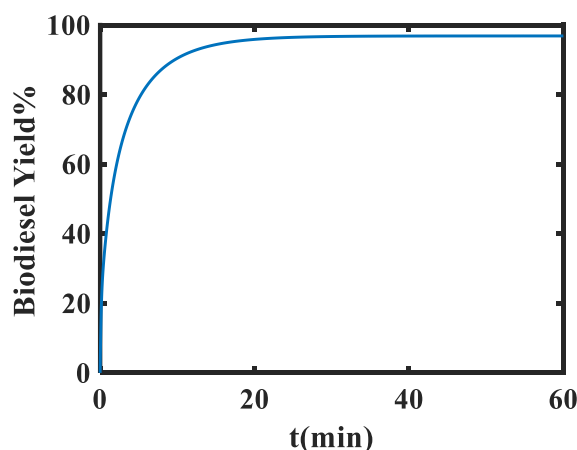
شکل 4 اثر نسبت های مختلف مولی روغن به الکل بر بازده بیودیزل (دمای ۲۵°C و 0/4 درصد وزنی کاتالیزور)

برای بررسی شرایط بهینه با استفاده از ثوابت کشف شده در این پژوهش و برای به حداکثر رساندن بازده بیودیزل از الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شده است. نتایج این بهینه سازی در جدول 3 و شکل 5 مشخص شده است.

جدول 3 شرایط بهینه برای تولید بیودیزل از روغن سویا

درصد بازده تولید	درصد وزنی کاتالیست	نسبت مولی روغن به الکل	دما (°C)
---	0/4-1	5-15	25-70
96/87	0/4501	15	70

با توجه به جدول 3 مقادیر دما و نسبت مولی متانول به روغن با حداکثر مقدار محدوده تعریف شده برابر هستند اما برای مقدار کاتالیزور این چنین نیست، زیرا در زمان های طولانی تر غلظت کاتالیزور تاثیر متفاوت تری بر بازده تولید خواهد داشت.



شکل 5 بیودیزل تولید شده از روغن سویا در شرایط بهینه (دمای ۷۰°C، درصد وزنی کاتالیزور 0/4501 و نسبت مولی الکل به روغن 15)

با به حداکثر رساندن دما و نسبت مولی متانول به روغن می‌توان به بازدهی بیشتری دست پیدا کرد، اما با توجه به محدودیت های تعریف شده

- biodiesel production using chemical and biocatalysts, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, Vol. 8, No. 4, p. 367, 2009.
- [11] H. Fukuda, A. Kondo, and H. Noda, Biodiesel fuel production by transesterification of oils, *Journal of bioscience and bioengineering*, Vol. 92, No. 5, pp. 405-416, 2001.
- [12] A.V. Marjanović, O.S. Stamenković, Z.B. Todorović, M.L. Lazić, and V.B. Veljković, Kinetics of the base-catalyzed sunflower oil ethanolysis, *Fuel*, Vol. 89, No. 3, pp. 665-671, 2010.
- [13] K. Komers, F. Skopal, R. Stloukal, and J. Machek, Kinetics and mechanism of the KOH—catalyzed methanolysis of rapeseed oil for biodiesel production, *European Journal of Lipid Science and Technology*, Vol. 104, No. 11, pp.728-737, 2002.
- [14] A .C. Pinto, L.L. Guarieiro, M.J. Rezende, N.M. Ribeiro, E.A. Torres, W.A. Lopes, P.A.D.P. Pereira, and J.B.D. Andrade, Biodiesel: an overview, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, No. 16, pp. 1313-1330, 2005.
- [15] B. Freedman, R.O. Butterfield, and E.H. Pryde, Transesterification kinetics of soybean oil 1, *Journal of the American oil chemists' society*, Vol. 63, No. 10, pp. 1375-1380, 1986.
- [16] H. Noureddini, and D. Zhu, Kinetics of transesterification of soybean oil, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Vol. 74, No. 11, pp. 1457-1463, 1997.
- [17] G.F. Zagonel, P.G. Peralta-Zamora, and L.P. Ramos, Production of ethyl esters from crude soybean oil: optimization of reaction yields using a 2³ experimental design and development of a new analytical strategy for reaction control, *Fuel Chemistry Division Preprints*, Vol. 47 No. 1, pp. 363-364, 2002.
- [18] I. Jacob, E. Clausen, and D.J. Carrier, Kinetics determination of soybean oil transesterification in the design of a continuous biodiesel production process, *Biological and Agricultural Engineering*, Undergraduate Honors Theses, 2005.
- [19] G. Vicente, M. Martinez, J. Aracil, and A. Esteban, Kinetics of sunflower oil methanolysis, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, No. 15, pp. 5447-5454, 2005.