



بهینه‌سازی واکنش ترانس استریفیکاسیون با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن

مصطفی مصطفایی^{۱*}، بهزاد خدری^۲، سیدمحمد صفی‌الدین اردبیلی^۳

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه. b.mostafaei@razi.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه. khedribehzad@gmail.com

^۳ استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز. m.safieddin@scu.ac.ir

چکیده

روش برنامه‌ریزی بیان ژن/به‌منظور ارائه رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های واکنش ترانس استریفیکاسیون با استفاده از تکنیک ترکیبی میدان مغناطیسی و ماکروویو مورد استفاده قرار گرفت. تأثیر شرایط واکنش شامل شدت میدان مغناطیسی، توان ماکروویو، نسبت کاتالیزور و الکل با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی بیان ژن مدل‌سازی شد. درصد تبدیل بیودیزل به‌عنوان پارامتر پاسخ انتخاب گردید. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد ترکیب فناوری ریزموج و میدان مغناطیسی به‌منظور تولید سوخت بیودیزل روش بسیار کارآمدی می‌باشد. بیشترین میزان درصد تبدیل برای واکنش ترانس استریفیکاسیون برابر ۹۷ درصد به دست آمد که بر اساس استاندارد ASTM-D6751 میزان قابل قبولی می‌باشد. نتایج حاصل نشان داد که روش GEP دارای قدرت مناسب و عملکرد خوبی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بازده واکنش می‌باشد. معیارهای آماری به‌کاررفته عملکرد مدل را بسیار مطلوب ارزیابی نمود. ضریب تبیین (R^2) برای روش GEP بین محدوده ۰/۹۹۲۵ و ۰/۹۹۶۶ به دست آمد. ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) برابر ۴,۲ گزارش شد. با استفاده از نمودارهای درختی، معادله ریاضی جهت تخمین میزان درصد تبدیل بیودیزل بر اساس داده‌های تجربی به دست آمد.

کلمات کلیدی: ترانس استریفیکاسیون، راکتور ریزموج، تولید بیودیزل، برنامه‌ریزی بیان ژن

^۱ - نویسنده مسئول: مصطفی مصطفایی b.mostafaei@razi.ac.ir



Optimization of transesterification reaction using Gene Expression Programming method

Mostafa Mostafaei^{*1}, Behzad Khedri², Seyed Mohammad Safieddin Ardebili³

1. Mechanics of Biosystems Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran.

b.mostafaei@razi.ac.ir

2. Mechanics of Biosystems Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran.

khedribehzad@gmail.com

3. Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

m.safieddin@scu.ac.ir

ABSTRACT

The Gene Expression Programming (GEP) method was employed to express the relationship between the inputs and the outputs of transesterification reaction using microwave -cum -magnetic field techniques. The influence of reaction conditions (i.e. magnetic field intensity, microwave power, catalyst and alcohol ratio) have been modeled by Gene Expression Programming where conversion rate were chosen as response parameters. Base on the obtained results, it was found that the GEP consistently emulated actual conversion rate with high accuracy. The performance of the model was evaluated using RSME and R^2 values. The results showed that the GEP method has a significant accuracy for modeling and predicting the efficiency of the reaction. The GEP predicted data matched the experimental data with high overall accuracy with correlation coefficient (R) values ranging from 0.9925 to 0.9966 while the root mean square error of data (RMSE) was 4.2.

Keywords: Transesterification, Microwave reactor, Biodiesel production, Gene Expression Programming

۱- مقدمه

امروزه با کاهش ذخایر انرژی و همچنین افزایش تقاضا و قیمت حامل‌های انرژی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بهینه‌سازی آن در سامانه‌های مصرف‌کننده انرژی به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. از طرفی سوخت‌های تجدیدپذیر نظیر بیودیزل و بیواتانول در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند.

در حقیقت بیودیزل سوختی جایگزین گازوئیل بوده که از روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی به دست می‌آید. بیودیزل را می‌توان در ترکیب با سوخت دیزل در موتورهای احتراق داخلی دیزل استفاده نمود.

برای کاهش ویسکوزیته و بهبود خصوصیات روغن به‌عنوان ماده اولیه تولید سوخت، راه‌های مختلفی وجود دارد. پیرولیز، میکرو امولسیون و ترانس استریفیکاسیون مهم‌ترین روش‌های مرسوم می‌باشند. بیودیزل به‌دست‌آمده از میکرو امولسیون و کراکینگ حرارتی به دلیل محتوای انرژی پایین و عدد ستان کم به احتراق ناقص منجر می‌شوند [۱]. روش ترانس استریفیکاسیون روشی ساده و کارآمد است و به‌طور گسترده‌ای برای تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

به دلیل سرعت کم واکنش ترانس استریفیکاسیون با استفاده از روش مرسوم، روش‌های مختلفی به‌منظور شدت بخشی واکنش تولید بیودیزل معرفی شده است. این روش‌ها با هدف کاهش مواد مصرفی و همچنین کاهش زمان واکنش مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

از جمله این تکنیک‌ها می‌توان به روش فراصوت [۳-۷]، ریزموج [۸-۱۲] و یا ترکیبی از فناوری‌های مختلف [۱۳-۱۵] برای تولید بیودیزل به کمک روش ترانس استریفیکاسیون نام برد.

به‌طور معمول بیودیزل تولید شده با استفاده از روش مرسوم، توان زیادی مصرف می‌کند. استفاده از تابش ریزموج در شرایط یکسان، زمان انجام واکنش را از چند ساعت به چند دقیقه کاهش می‌دهد [۱۶]

در تحقیقی از آنزیم Novozym435 و متانول برای انجام واکنش در حضور امواج ریزموج استفاده شد. متانول در نسبت‌های مولی متفاوت ۱:۴ تا ۱:۸، درصد وزنی نیز بین بازه ۲-۱۰٪ متفاوت مورد بررسی قرار گرفت، حلال مورد استفاده نیز دارای درصد متفاوتی بود (بین ۱-۱۱)، توان ماکروویو از ۷۰۰-۳۰۰ وات متغیر بود، دمای انجام واکنش بین ۳۰-۷۰ درجه سلسیوس متفاوت بود و زمان انجام واکنش نیز از ۰-۱۵۰ دقیقه متفاوت بود. نتایج نشان داد، بهینه‌ترین حالت در میزان حلال ۱:۲، میزان آنزیم ۸٪ وزنی، توان ماکروویو ۴۰۰ وات، درجه حرارت ۵۰ درجه سلسیوس و زمان انجام



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



واکنش ۱۲۰ دقیقه به نسبت تبدیل ۹۵٪ صورت می‌گیرد [۱۷].

مطالعه دیگری تحت پارامترهای مختلف مانند نسبت مولی اتانول به روغن، درجه حرارت، تعداد دور همزنی، زمان و توان ماکروویو به تولید بیودیزل از روغن پنبه‌دانه انجام شد. با استفاده از نرم‌افزار سطح پاسخ بهینه‌ترین حالت در نسبت مولی الکل به روغن ۱:۱۷، دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، دور همزنی ۳۸۰ rpm، زمان انجام واکنش ۱۲ دقیقه و توان ماکروویو ۲۷۰ وات به دست آمد. بیشترین درصد تبدیل تولید بیودیزل ۹۹/۵٪ برای شرایط بهینه به دست آمد [۱۸].

استفاده از حرارت ماکروویو نرخ شتاب انجام واکنش افزایش و زمان انجام واکنش را کاهش می‌دهد که عمدتاً به تعامل الکترومغناطیسی ماکروویو برمی‌گردد. در تحقیقی از چربی ریز جلبک تحت تابش ماکروویو بیودیزل تولید شد. در این تحقیق اثر شرایط مختلف واکنش مانند اثر کاتالیزور، متانول، نسبت چربی، دمای واکنش و زمان واکنش بر روی بازده تولید بیودیزل بررسی شد. با استفاده از ماکروویو به روش نیمه مداوم به درصد تبدیل ۸۴/۰۱٪ رسیدند. این نسبت تبدیل در ۱/۵٪ کاتالیزور، ۶۰ درجه سلسیوس، نسبت ۱:۱۰ متانول و ۱۵ دقیقه زمان انجام واکنش به دست آمده است [۱۹].

در تحقیقی پژوهشگران به بررسی تولید بیودیزل با استفاده از تابش ریزموج پرداختند، در بررسی خود به بررسی اثر مدت زمان تابش ریزموج در محدوده ۴۰-۱۸۰ ثانیه پرداختند، آن‌ها مشاهده کردند که در مدت زمان ۴۰ ثانیه به ضریب تبدیل بالای ۹۹٪ دست یافتند و با افزایش زمان تا ۱۸۰ ثانیه به شدت میزان تولید کاهش یافت [۲۰].

افزایش دمای واکنش منجر به بالا رفتن انرژی جنبشی مواد واکنش‌دهنده شده و در نتیجه باعث افزایش درصد تبدیل بیودیزل در واکنش می‌شود. از طرفی افزایش درجه حرارت به بالاتر از نقطه جوش متانول، باعث ایجاد تعداد زیادی حباب شده که تا حدودی می‌تواند از پیشرفت واکنش جلوگیری کند [۲۱].

در تحقیقی دیگر واکنش ترانس استریفیکاسیون با استفاده از روغن سرخ‌کردنی پسماند به‌عنوان ماده اولیه و در حضور سدیم متواکسید انجام گرفت. پارامترهای مؤثر بر انجام این واکنش شامل، مقدار کاتالیزور (۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵٪ وزنی)، زمان واکنش (۳-۷ و ۹ دقیقه)، دما (۵۵-۶۰-۶۵ درجه سلسیوس) و نسبت متانول به روغن (۱:۴، ۱:۵، ۱:۶) بود. بیش‌ترین محتوای متیل استر بیودیزل تولیدی ۹۰/۰۴٪ تعیین شد. محتوای متیل استر بیودیزل تولیدی از ۹۰/۰۴ تا ۹۸/۸۵ درصد به‌وسیله تقطیر مولکولی افزایش یافت. بهینه‌ترین دمای واکنش ۶۰ درجه سلسیوس گزارش شد [۲۲].

همچنین نوع الکل و نسبت مولی الکل به روغن از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در واکنش ترانس استریفیکاسیون است. متانول و اتانول رایج‌ترین الکل‌ها در تولید بیودیزل هستند [۲۳]. در تحقیقی که بر روی پتانسیل تولید بیودیزل از روغن دانه‌ی هندوانه و همچنین الکل به دست آمده از بافت گوشتی آن انجام گرفت، از منگنز کربنات به‌عنوان کاتالیزور استفاده شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد، زمان انجام واکنش با استفاده از روش ریزموج (۳۵ دقیقه)، روش فراصوت (۲ ساعت) و روش معمولی (۸ ساعت) بود که نشان‌دهنده برتری روش ریزموج برای تولید بیودیزل می‌باشد. در این تحقیق نسبت مولی الکل به روغن ۱:۶ در نظر گرفته شد [۲۴]. همچنین در تحقیقی به پیش‌بینی شرایط بهینه برای تولید بیودیزل از روغن پسماند آفتابگردان، الکل اتانول و کاتالیزور همگن KOH پرداخته شد. نسبت مولی اتانول به روغن ۹/۰۵، درصد وزنی کاتالیزور ۰/۹۹، دمای انجام واکنش ۵۷/۳۱ درجه سلسیوس، زمان انجام واکنش ۷۷/۱۲ دقیقه و تعداد دور همزنی ۴۹۴/۹۴ rpm با استفاده از روش سطح پاسخ به دست آمد. این پارامترها منجر به تولید بیودیزل با نسبت تبدیل ۹۹/۳۳٪ درصد وزنی بیودیزل گردید. [۹]

با توجه به اینکه فرایند تولید بیودیزل یک فرایند زمان‌بر است، بایستی تحقیقات به سمتی پیش برود که واکنش و سنتز بیودیزل سریع‌تر شود. امروزه روش‌های مختلفی برای تولید بیودیزل موضوع تحقیقات پژوهشگران در سرتاسر جهان است. این ضرورت انجام تحقیقات هر چه بیش‌تر در این زمینه را می‌رساند. لذا تحقیق حاضر به‌منظور سرعت بخشیدن به فرایند تولید بیودیزل، تولید بیودیزل ارزان‌تر، استفاده از روغن‌های پسماند و تولید هرچه بیش‌تر و بهتر بیودیزل از روغن پسماند است. بدین منظور از فناوری ریزموج و میدان مغناطیسی در حضور کاتالیزورهای همگن قلبیایی جهت بهبود شرایط تولید بیودیزل به‌عنوان سوختی نو برای دست‌یابی به ضریب تبدیل بالاتر و تولید سوختی مطابق با استانداردهای موجود و قابل‌استفاده در موتورهای دیزلی به‌عنوان جایگزین سوخت دیزل هست. برای محقق شدن این هدف و دست یافتن به این مهم، در این تحقیق سعی بر این است که با استفاده از یک سامانه کارآمد و به کمک امواج ریزموج و میدان مغناطیسی به بیودیزل با خواص ایده آل دست یافت. همچنین در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های هوش مصنوعی نظیر سیستم استنتاج فازی-عصبی، الگوریتم ژنتیک، روش برنامه‌ریزی بیان ژن در زمینه علوم مختلف برای مدل‌سازی استفاده شده است.

برای نمونه، در تحقیقی بازده واکنش ترانس استریفیکاسیون با استفاده از هر دو روش انفیس و سطح پاسخ پیش‌بینی شد، بررسی نتایج با استفاده از پارامترهای آماری نشان داد که روش انفیس پیش‌بینی دقیق‌تری به نسبت روش سطح پاسخ از بازده واکنش ترانس استریفیکاسیون ارائه داد. در پژوهشی که مصطفائی و همکاران بر روی مدل‌سازی توان و قطر راکتور فراصوت انجام دادند و به مقایسه روش انفیس و سطح پاسخ پرداختند نیز روش

انفیس به نسبت سطح پاسخ برتری داشت [۲۵].

از میان روش‌های معرفی شده روش GEP به منظور مدل‌سازی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. به کارگیری این روش جهت مدل‌سازی مسائل مهندسی، کارآمدی این مدل‌ها را نسبت به روش‌های مدل‌سازی مرسوم آشکار ساخته است [۲۶]. در این تحقیق درصد کاتالیزورهای NaOH و KOH، درصد الکل‌های اتانول و متانول، شدت میدان مغناطیسی و توان ریزموج بر راندمان تولید بیودیزل مورد بررسی قرار گرفت. از روش GEP به منظور پیش‌بینی و مدل‌سازی فرآیند تولید سوخت بیودیزل برای تعیین دقیق درصد تبدیل واکنش استفاده گردید.

۲- بخش مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد مورد نیاز

برای انجام پژوهش حاضر از روغن پسماند جمع‌آوری از آشپزخانه‌های دانشگاه رازی کرمانشاه استفاده شد. الکل مورد استفاده در تحقیق حاضر، ترکیب دو الکل اتانول و متانول با خلوص بالای ۹۹٪ در سه سطح ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد استفاده شد. نسبت مولی الکل به روغن ۶ به ۱ در نظر گرفته شده و از کاتالیزورهای NaOH و KOH در سه سطح ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد برای انجام واکنش استفاده گردید.

۲-۲ سامانه مورد استفاده و تولید بیودیزل

برای انجام آزمایش‌ها ابتدا سامانه تولید پیوسته بیودیزل طراحی و ساخته شد. سامانه تولید بیودیزل با استفاده از ترکیب ریزموج و میدان مغناطیسی در شکل ۱ نشان داده شده است. این سامانه شامل مجموعه‌ای متشکل از مخزن روغن و الکل، سیستم میدان مغناطیسی با شدت متغیر و قابل تنظیم، میز وسایل، پایه مخزن و راکتور پیچ‌ای است.

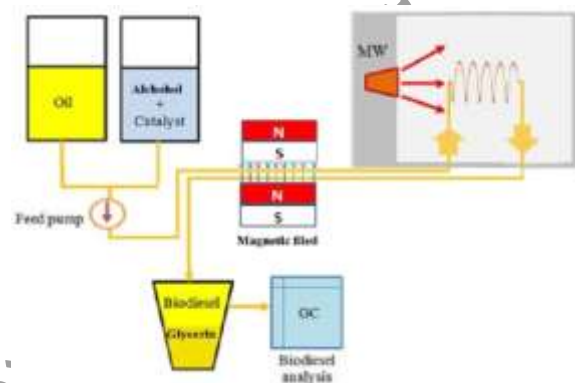


Figure1: A schematic of the continuous biodiesel production setup with simultaneous microwave irradiation and magnetic field application

شکل ۱: شماتیک سامانه تولید پیوسته بیودیزل با استفاده هم‌زمان ریزموج و میدان مغناطیسی.

در سامانه ذکر شده میدان مغناطیسی متغیر با استفاده از آهنرباهای دائمی از جنس نئودیم در سه شدت ۰، ۲۲۵ و ۴۵۰ میلی تسلا ایجاد شد. همچنین میزان توان ریزموج متغیر نیز در سه سطح توانی ۴۰۰، ۸۲۱ و ۱۱۸۱ وات در نظر گرفته شد. زمان ماند مواد برای تحت تأثیر قرار گرفتن از ریزموج ۱/۵ دقیقه در نظر گرفته شد. جهت اختلاط مناسب محلول متوکسید با روغن پسماند، در تمام نمونه‌ها ابتدا همزنی اولیه‌ی ۱۰ دقیقه‌ای با سرعت همزنی ۴۰۰ دور بر دقیقه و تحت دمای ۶۰ درجه‌ی سلسیوس انجام شد. سپس مواد تحت تنظیم‌های مختلف اجاق ریزموج و میدان مغناطیسی و با استفاده از نیروی ثقل، وارد راکتور پیچ‌ای ریزموج شده و بیودیزل تولید شد. محدوده پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق بر اساس کمترین و بیشترین میزان مورد بررسی برای هر متغیر در جدول ۱ نشان داده شده است.



جدول ۱: سطوح متغیرهای مستقل مورد بررسی.

Table 1: the actual levels of independent variables

| Independent variable | Unit | Variable levels | | |
|--------------------------|-------|-----------------|-------|-------|
| | | -1 | 0 | 1 |
| Magnetic field intensity | Tesla | 0 | 0.225 | 0.450 |
| Microwave power | Watt | 400 | 821 | 1181 |
| KOH percentage | % | 0 | 50 | 100 |
| Ethanol percentage | % | 0 | 50 | 100 |

۲-۳ آنالیز نمونه‌ها با آزمون گاز کروماتوگرافی

برای تعیین درصد تبدیل هریک از نمونه‌های آزمایش از روش کروماتوگرافی گازی با استفاده از دستگاه آجیلنت^۱ مدل B ۷۸۹۰ استفاده شد. در این پژوهش از ستون HPS با مشخصات $30 \times m \text{ mm } 0.32$ استفاده گردید. سامانه مجهز به آشکارساز از نوع شعله یونیزیشن^۲ بود. نمونه‌های بیودیزل پس از تولید به منظور متوقف نمودن واکنش در مخلوط یخ قرار داده شد و برای ته‌نشینی گلیسرین موجود در نمونه‌ها از دستگاه سانتریفیوژ با ۴۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۵ دقیقه استفاده شد. فاز بالایی به دست آمده به عنوان بیودیزل خالص برای انجام آزمون‌های کروماتوگرافی گازی مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا به میزان ۰/۱ میکرو لیتر از نمونه (رقیق شده با استفاده از حلال) به دستگاه تزریق گشت. برنامه دمایی آون نیز بدین صورت بود که ابتدا دمای آون به مدت ۲ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس نگاه داشته شده سپس با نرخ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ به دمای ۲۱۰ درجه سلسیوس رسیده و نهایتاً با نرخ $5^\circ\text{C}/\text{min}$ به دمای ۲۳۵ درجه سلسیوس رسیده و به مدت ۷ دقیقه در دمای مذکور ثابت ماند. وزن بیودیزل و همچنین میزان درصد تبدیل روغن به بیودیزل نیز از روابط ۳ و ۴ محاسبه شد [۲۷]

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

$$\text{FAME (\%)} = \frac{W_{\text{Alkyl ester}} / M_{\text{Alkyl ester}}}{3W_{\text{WCO}} / M_{\text{WCO}}} \times 100 \quad (4)$$

در روابط ۱ و ۲، $\sum A$ مجموع سطح زیر پیک مربوط به اسیدهای چرب C6 تا C24، A_{IS} نشانگر سطح زیر پیک متناظر با استاندارد داخلی، M_{IS} نشان دهنده جرم استاندارد داخلی استفاده شده بر حسب میلی گرم، M نیز جرم نمونه بیودیزل بر حسب میلی گرم و $W_{\text{Alkyl ester}}$ و W_{WCO} به ترتیب جرم بیودیزل تولید شده و جرم روغن پسماند استفاده شده بر حسب میلی گرم و $M_{\text{Alkyl ester}}$ و M_{WCO} جرم مولکولی بیودیزل و روغن پسماند بر حسب میلی گرم هستند. برای مدل سازی به کمک روش GEP، داده‌ها به دو قسمت ۲۱ تایی برای آموزش مدل و ۸ تایی برای آزمون مدل تقسیم شدند. توانایی مدل به وسیله پارامترهای ارائه شده در رابطه‌های ۵ و ۶ مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۸]:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i)^2} \right) \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2} \quad (6)$$

که در این رابطه n تعداد پترن یا نمونه در مجموعه داده‌ها، t میزان واقعی داده و o میزان پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. سپس با توجه به روابط بالا و با در نظر گرفتن بیشترین ضریب تبیین و کمترین مقدار برای سایر پارامترها بهترین روش جهت پیش‌بینی داده‌ها انتخاب شد.

¹ Agilent

² Flame ionization detector

۴-۲ مدل سازی با استفاده از روش برنامه ریزی بیان ژن

در این تحقیق به منظور ایجاد رابطه بین متغیرهای ورودی و متغیر خروجی از روش برنامه ریزی بیان ژن (GEP) استفاده شد. در این روش کلیه پارامترهای تأثیرگذار ورودی که در جدول ۱ بیان شد، به عنوان پارامترهای مستقل و میزان درصد بیودیزل به عنوان پارامتر هدف انتخاب شد. در این روش، کلیه فاکتورهای ورودی در مدل سازی فرآیند ترانس استریفیکاسیون اثرگذار بوده و از اثر متقابل هر متغیر بر متغیرهای دیگر صرف نظر می شود. برای انجام مدل سازی، ابتدا داده های انتخاب شده به دو گروه داده های آموزش و داده های آزمون تقسیم بندی شد. ۷۰ درصد داده ها به عنوان داده های آموزش و باقیمانده به گروه داده های آزمون اختصاص داده می شوند. نمودار روندنمای روش برنامه ریزی بیان ژن در شکل ۲ نشان داده شده است.



Figure 2: The procedure of GEP technique

شکل ۲: نمودار روند نمای برنامه ریزی بیان ژن.

توابع مورد استفاده در مدل GEP در جدول نشان داده شده اند. انتخاب مجموعه توابع نشان از میزان پیچیدگی مدل است. میزان عملکرد مدل با استفاده از مقادیر RSME و R2 ارزیابی شد. توابع انتخاب شده در جدول با توجه به انتظار عملکرد سریع از شبکه و با توجه به مقادیر پیشنهاد شده توسط سایر محققان انتخاب شد. مقادیر موجود در جدول همچنین مقادیر نظیر تعداد کروموزوم ها و تعداد ژن ها را نشان می دهد.

Table 2: GEP simulation factors.

جدول ۲: پارامترهای مورد استفاده برای مدل سازی GEP

| Function | Power, Sqrt, EXP, Sin, tan ,+ /- |
|------------------------------|----------------------------------|
| Chromosomes | 40, 50,60 |
| Head size | 10,12 |
| Gene | 3 |
| Linking function | Addition |
| Mutation rate | 0.044 |
| Inverse rate | 0.03 |
| One-point recombination rate | 0.00227 |
| Two-point recombination ate | 0.00227 |
| Gene recombination rate | 0.1 |
| Gene transportation rate | 0.1 |



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



در این کار پژوهشی با افزایش تعداد کروموزومها و ژن‌ها به دلیل پیچیدگی مدل، زمان بهینه‌سازی افزایش پیدا می‌کند. تحقیق حاضر به منظور ایجاد ارتباط دقیق بین پارامترهای ورودی شامل نسبت مولی، درصد کاتالیست، زمان همزنی مکانیکی و همچنین زمان تابش ریزموج انجام شد. پارامتر درصد تبدیل بیودیزل به عنوان پارامتر پاسخ انتخاب شد. بر اساس روش GEP تابع درصد تبدیل بیودیزل به عنوان تابعی از پارامترهای ورودی مطابق رابطه می‌باشد. رابطه ۷ تابع درصد تبدیل بر اساس پارامترهای مستقل را نشان می‌دهد.

$$\text{Conversion (\%)} = f(\text{Magnetic field, Microwave, Ethanol, Catalyst}) \quad (7)$$

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد، روش ترکیبی ریزموج - مغناطیسی به عنوان روش بسیار کارا برای تولید بیودیزل می‌باشد. بیشترین میزان بازده واکنش ۹۷٪ پس از فرایند آبشویی به دست آمد. نتایج درصد تبدیل برای هر یک از تکرارها مطابق جدول ۳ به دست آمد. جهت بررسی کارایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن، در این پژوهش از داده‌های جدول ۲ استفاده گردید.

Table 3: Yield of Biodiesel

جدول ۳: نتایج حاصل از تولید بیودیزل.

| میدان مغناطیسی | توان ریزموج | درصد KOH | درصد اتانول | بازده واکنش |
|----------------|-------------|----------|-------------|-------------|
| ۰ | - | ۰ | ۱ | ۵۱/۷۱ |
| ۰ | ۱ | -۱ | ۰ | ۷۴/۳۶ |
| ۰ | ۰ | ۱ | -۱ | ۶۲/۹۳ |
| -۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۶۹/۰۱ |
| ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۵۱/۸۵ |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۴۶/۰۸ |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۸۷/۶۲ |
| ۰ | ۱ | ۰ | -۱ | ۷۳/۹۵ |
| ۰ | -۱ | ۱ | ۰ | ۷۲/۰۹۵ |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۸۵/۸۰ |
| ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۷۳/۲۷ |
| -۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۴۸/۹۷ |
| -۱ | ۰ | ۰ | -۱ | ۹۰/۰۸ |
| ۱ | -۱ | ۰ | ۰ | ۹۴/۲۹ |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۸۲/۸۹ |
| ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۶۱/۶۲ |
| ۰ | -۱ | -۱ | ۰ | ۶۳/۱۰ |
| ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۶۵/۶۰ |
| ۰ | ۰ | -۱ | -۱ | ۹۶/۲۰ |
| ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۴۹/۴۵ |
| ۱ | ۰ | ۰ | -۱ | ۸۹/۱۶ |
| ۰ | -۱ | ۰ | -۱ | ۹۴/۲۰ |
| ۱ | ۰ | -۱ | ۰ | ۸۶/۴۱ |
| ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۶۶/۱۵ |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۸۵/۳۱ |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۸۵/۳۳ |
| -۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۷۵/۷۴ |
| -۱ | ۰ | -۱ | ۰ | ۵۸/۰۵ |
| -۱ | -۱ | ۰ | ۰ | ۶۴/۳۲ |



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



با انجام شبیه‌سازی و مقایسه معیارهای ارزیابی در مرحله آموزش و آزمون برای تمامی مدل‌ها، مدل با بیشترین میزان ضریب همبستگی به دست آمد. به‌طور کلی از میان مدل‌های متفاوت بررسی شده، تابعی به‌عنوان مدل برتر انتخاب گردید که معیارهای جذر میانگین مربعات خطاها (RSME) و میانگین قدر مطلق خطاهای آن نزدیک‌ترین مقدار به صفر، و میزان ضریب همبستگی (R) آن نزدیک‌ترین مقدار به یک را دارد. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده، ثابت‌های تابع برازش شده مطابق جدول ۴ ارائه گردید.

Table 4: Function result of GEP technique.

جدول ۴: مقادیر ثابت تابع پیش‌بینی به روش GEP.

| Function result | |
|-----------------|-------|
| G2C6 | 10.2 |
| G2C9 | 1.91 |
| G2C4 | 1.97 |
| G3C2 | -6.71 |
| G3C9 | -1.74 |
| G3C3 | -7.03 |

با استفاده از نمودارهای درختی و در نهایت فرم ریاضی جهت تخمین میزان درصد تبدیل تولید بیودیزل برای داده‌های تجربی به‌دست‌آمده در این تحقیق مطابق رابطه ۸ ارائه گردید. شکل ۳ نمودار درختی توابع پیش‌بینی شده به‌منظور مدل‌سازی بر اساس پارامترهای مستقل واکنش ترانس استریفیکاسیون نشان می‌دهد.

(۸)

$$\begin{aligned} \text{Conversion} = & ((\text{realsqrt}(((d(4) + d(4))^4)) + (\sin(d(3)) - (d(4) - d(2)))) \\ & - \tan(\text{realpow}(d(3), d(3)) - \exp(d(4)))) + (((d(2) + d(2)) + (G2C6 + d(3))) \\ & + (d(1)^4)) - (\sinh((d(3) - G2C9)) * \text{realpow}((G2C4 - d(3)), d(1)))) \\ & + ((\text{realsqrt}(((G3C3 + d(4))^4)) - (\tan(G3C2) + (G3C9 - d(2)))) \\ & - \tan((\sin(d(1)) - \exp(d(2)))) \end{aligned}$$

با توجه به مقادیر ارائه‌شده برای نرم‌افزار هر چه ضریب تبیین داده‌ها بالاتر باشد انطباق بین داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از مدل بیش‌تر است، ضریب تبیین داده‌ها برای هر روش GEP برابر ۰/۹۹ که مقداری بسیار بالایی است. بالا بودن ضریب تبیین نشانگر این مسئله است که روش برنامه‌ریزی بیان ژن توانایی بالایی جهت پیش‌بینی بازده واکنش ترانس استریفیکاسیون دارد. پارامتر آماری بعدی RMSE نشان‌دهنده انحراف و خطای اعداد پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشند و به هراندازه که اعداد این پارامترها کم‌تر باشد نشانگر دقت بالای مدل و توانایی بالای مدل جهت پیش‌بینی بازده است. با توجه به مقادیر گزارش‌شده میزان RSME برابر ۴/۲ بوده که این مقدار برای پارامترهای مورد آزمون مقداری کم و قابل قبول بود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بیان داشت که استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن جهت پیش‌بینی بازده واکنش ترانس استریفیکاسیون بسیار کارآمد می‌باشد.

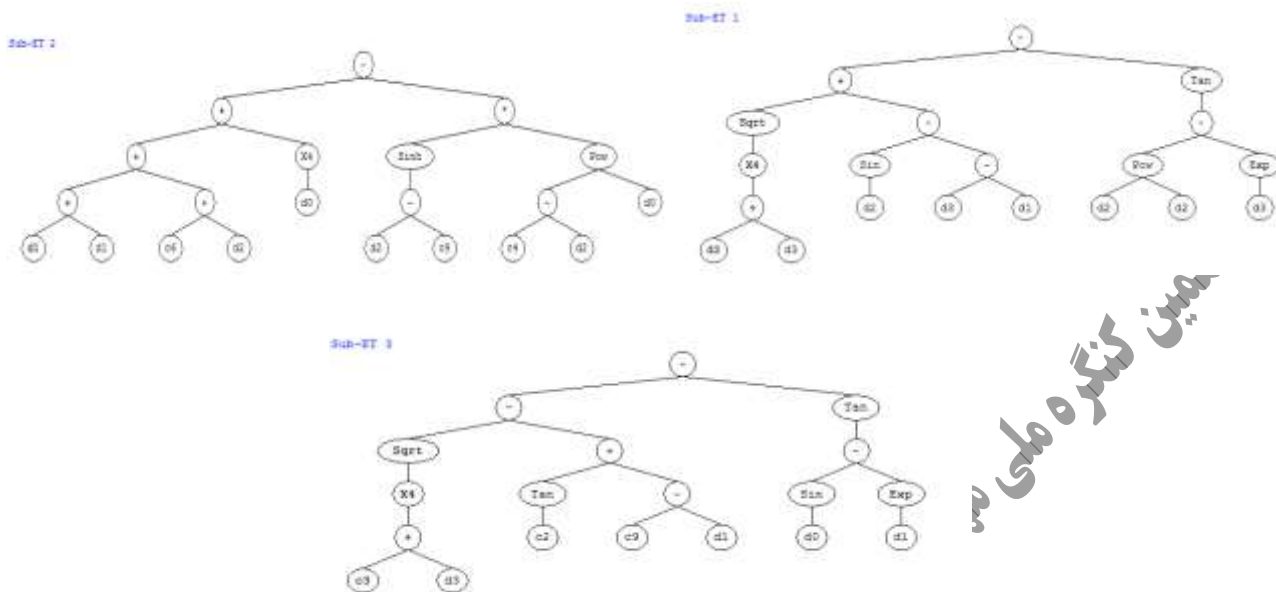


Figure3: Expression tree of the fitted function

شکل ۳: نمودار درختی توابع پیش‌بینی شده.

همچنین نمودار برازش شده برای داده‌های مدل و هدف رسم شده است که نشان می‌دهد مدل به خوبی توانسته است ارتباط بین داده‌ها را برقرار نماید. ارائه رابطه ریاضی بین متغیرهای وابسته و سایر متغیرهای مستقل توسط الگوی GEP از مهم‌ترین مزیت‌های الگو بوده و آن را نسبت به سایر الگوهای هوشمند متمایز می‌کند.



Figure 4: Trade-off model and Target values

شکل ۴: نمودار رسم شده برای داده‌های مدل و هدف.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد ترکیب فناوری ریزموج و میدان مغناطیسی به منظور تولید سوخت بیودیزل روش بسیار کارآمدی است. بیشترین میزان درصد تبدیل برای واکنش ترانس استریفیکاسیون برابر ۹۷ درصد به دست آمد که بر اساس استاندارد ASTM-D6751 میزان قابل قبولی است. از آنجایی که بازده واکنش ترانس استریفیکاسیون بسیار مهم است در پژوهش حاضر با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن واکنش تولید سوخت بیودیزل مدل‌سازی و پیش‌بینی شد. نتایج حاصل نشان داد که روش GEP دارای قدرت مناسب و عملکرد خوبی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بازده واکنش می‌باشد. معیارهای آماری به کاررفته عملکرد مدل را بسیار مطلوب ارزیابی نمود.



ضریب تبیین (R^2) برای روش GEP برابر ۰/۹۹، ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) برابر ۴/۲ گزارش شد. با استفاده از نمودارهای درختی و درنهایت فرم ریاضی جهت تخمین میزان درصد تبدیل تولید بیودیزل بر اساس داده‌های تجربی به دست آمد.

۴- مراجع

- [۱] Leung DY, Wu X, Leung MKH. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. Appl Energy 2010;87:1083–95. doi:10.1016/j.apenergy.2009.10.006.
- [2] Hoseini SS, Najafi G, Ghobadian B, Rahimi A, Yusaf T, Mamat R, et al. Effects of biodiesel fuel obtained from *Salvia macrosiphon* oil (ultrasonic-assisted) on performance and emissions of diesel engine. Energy 2017;131:289–96. doi:10.1016/j.energy.2017.04.150.
- [3] Hsiao MC, Lin CC, Chang YH, Chen LC. Ultrasonic mixing and closed microwave irradiation-assisted transesterification of soybean oil. Fuel 2010;89:3618–22. doi:10.1016/j.fuel.2010.07.044.
- [4] Safaei Z, Mostafaei B, Ghobadian B, Moghadam AZ. Optimization of Biodiesel Production Parameters by Ultrasonic from Iranian Variety of Castor Oil 2012:2012.
- [5] Aghbashlo M, Tabatabaei M, Hosseinpour S, Khounani Z, Hosseini SS. Exergy-based sustainability analysis of a low power, high frequency piezo-based ultrasound reactor for rapid biodiesel production. Energy Convers Manag 2017;148:759–69. doi:10.1016/j.enconman.2017.06.038.
- [6] Badday AS, Abdullah AZ, Lee KT, Khayoon MS. Intensification of biodiesel production via ultrasonic-assisted process: A critical review on fundamentals and recent development. Renew Sustain Energy Rev 2012;16:4574–87. doi:10.1016/j.rser.2012.04.057.
- [7] Choedkiatsakul I, Ngaosuwan K, Cravotto G, Assabumrungrat S. Biodiesel production from palm oil using combined mechanical stirred and ultrasonic reactor. Ultrason Sonochem 2014;21:1585–91. doi:10.1016/j.ultsonch.2013.12.025.
- [8] Barela PS, Silva NA, Pereira JSF, Marques JC, Rodrigues LF, Moraes DP. Microwave-assisted digestion using diluted nitric acid for further trace elements determination in biodiesel by SF-ICP-MS. Fuel 2017;204:85–90. doi:10.1016/j.fuel.2017.05.028.
- [9] Gude VG, Patil P, Martinez-guerra E, Deng S. Microwave energy potential for biodiesel production. Sustain Chem Process 2013;1–31. doi:10.1186/2043-7129-1-5.
- [10] Milano J, Ong HC, Masjuki HH, Silitonga AS, Chen W-H, Kusumo F, et al. Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil- *Calophyllum inophyllum* oil via response surface methodology. Energy Convers Manag 2018;158:400–15. doi:10.1016/j.enconman.2017.12.027.
- [11] Choedkiatsakul I, Ngaosuwan K, Assabumrungrat S, Tabasso S. ScienceDirect Integrated flow reactor that combines high-shear mixing and microwave irradiation for biodiesel production. Biomass and Bioenergy 2015;77:186–91. doi:10.1016/j.biombioe.2015.03.013.
- [12] Tany A, Pulidindi IN, Perkas N, Gedanken A. Continuous flow through a microwave oven for the large-scale production of biodiesel from waste cooking oil. Bioresour Technol 2016. doi:10.1016/j.biortech.2016.10.068.
- [13] Kelkar MA, Gogate PR, Pandit AB. Intensification of esterification of acids for synthesis of biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation. Ultrason Sonochem 2008;15:188–94. doi:10.1016/j.ultsonch.2007.04.003.
- [14] Kelkar MA, Gogate PR, Pandit AB. Intensification of esterification of acids for synthesis of biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation. Ultrason Sonochem 2008;15:188–94. doi:10.1016/j.ultsonch.2007.04.003.
- [15] Crudo D, Bosco V, Cavaglia G, Grillo G, Mantegna S, Cravotto G, et al. Biodiesel production process intensification using a rotor-stator type generator of hydrodynamic cavitation. Ultrason Sonochem 2016;33:220–5. doi:10.1016/j.ultsonch.2016.05.001.
- [16] Patil PD, Gude VG, Mannarswamy A, Cooke P, Munson-McGee S, Nirmalakhandan N, et al. Optimization of microwave-assisted transesterification of dry algal biomass using response surface methodology. Bioresour Technol 2011;102:1399–405. doi:10.1016/j.biortech.2010.09.046.
- [17] Yang W, Li X, Zhang D, Feng L. Catalytic upgrading of bio-oil in hydrothermal liquefaction of algae major model components over liquid acids. Energy Convers Manag 2017;154:336–43. doi:10.1016/j.enconman.2017.11.018.
- [18] Senthilraja R, Sivakumar V, Thirugnanasambandham K, Nedunchezian N. Performance, emission and combustion characteristics of a dual fuel engine with Diesel??Ethanol?? Cotton seed oil Methyl ester blends and Compressed Natural Gas (CNG) as fuel. Energy 2016;112:899–907. doi:10.1016/j.energy.2016.06.114.
- [19] Sharma A, Pareek V, Zhang D. Biomass pyrolysis — A review of modelling , process parameters and catalytic studies. Renew Sustain Energy Rev 2015;50:1081–96. doi:10.1016/j.rser.2015.04.193.
- [20] Priambodo R, Chen T-C, Lu M-C, Gedanken A, Liao J-D, Huang Y-H. Novel technology for bio-diesel production from cooking and waste cooking oil by microwave irradiation. Energy Procedia 2015;75:84–91.
- [21] Nomanbhay S, Ong MY. A Review of Microwave-Assisted Reactions for Biodiesel Production. Bioengineering



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



- 2017;4:57. doi:10.3390/bioengineering4020057.
- [22] Azcan N, Danisman A. Microwave assisted transesterification of rapeseed oil. Fuel 2008;87:1781–8. doi:10.1016/j.fuel.2007.12.004.
- [23] Hoogwijk M, Faaij A, de Vries B, Turkenburg W. Exploration of regional and global cost-supply curves of biomass energy from short-rotation crops at abandoned cropland and rest land under four IPCC SRES land-use scenarios. Biomass and Bioenergy 2009;33:26–43. doi:10.1016/j.biombioe.2008.04.005.
- [24] Chuah LF, Kleme?? JJ, Yusup S, Bokhari A, Akbar MM. A review of cleaner intensification technologies in biodiesel production. J Clean Prod 2017;146:181–93. doi:10.1016/j.jclepro.2016.05.017.
- [25] Mostafaei M, Javadikia H, Naderloo L. Modeling the effects of ultrasound power and reactor dimension on the biodiesel production yield: Comparison of prediction abilities between response surface methodology (RSM) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). Energy 2016;115:626–36. doi:10.1016/j.energy.2016.09.028.
- [26] Roy S, Ghosh A, Das AK, Banerjee R. A comparative study of GEP and an ANN strategy to model engine performance and emission characteristics of a CRDI assisted single cylinder diesel engine under CNG dual-fuel operation. J Nat Gas Sci Eng 2014;21:814–28. doi:10.1016/j.jngse.2014.10.024.
- [27] Safieddin Ardebili SM, Hashjin TT, Ghobadian B, Najafi G, Mantegna S, Cravotto G. Optimization of biodiesel synthesis under simultaneous ultrasound-microwave irradiation using response surface methodology (RSM). Green Process Synth 2015;4:259–67. doi:10.1515/gps-2015-0029.
- [28] Roy S, Ghosh A, Das AK, Banerjee R. Development and validation of a GEP model to predict the performance and exhaust emission parameters of a CRDI assisted single cylinder diesel engine coupled with EGR. Appl Energy 2015;140:52–64. doi:10.1016/j.apenergy.2014.11.065.

مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران