

## پیش‌بینی و بهینه‌سازی برخی ویژگی‌های بیودیزل پالم با استفاده از خواص دی‌الکتریک به روش سطح پاسخ

محمد زارعی<sup>۱</sup>، محمدهادی خوش‌تقاضا<sup>۲\*</sup>، برات قبادیان<sup>۳</sup> و حسین عامری مهابادی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> - دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، m.zarein@modares.ac.ir

<sup>۲</sup> - استاد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، khoshtag@modares.ac.ir

<sup>۳</sup> - استاد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ghobadib@modares.ac.ir

<sup>۴</sup> - استاد، مهندسی برق، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، تهران، ameri@ieee.org

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۴ دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۶/۲۲، پذیرش: ۹۷/۷/۹)

**چکیده:** استفاده از سامانه پایش کیفی بیودیزل تولیدی (به‌صورت برخط و ناپیوسته) همواره نیاز اساسی تولید این فرآورده است که نیازمند تحقیقاتی در این زمینه است. هدف از این تحقیق پیش‌بینی و بهینه‌سازی ویژگی‌های بیودیزل پالم با استفاده از خواص دی‌الکتریک آن است. متغیرهای خواص دی‌الکتریک بیودیزل (ε، ثابت دی‌الکتریک و "ε، فاکتور اتلاف) در فرکانس‌های میکروویو (۴۳۴، ۹۱۵ و ۲۴۵۰ MHz) به‌عنوان متغیرهای ورودی مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های بیودیزل پالم، محتوای متیل استر اسیدهای چرب و نقطه اشتعال در سه سطح مختلف زمان واکنش (۷، ۲۱ و ۶۳ دقیقه) و غلظت کاتالیزور (۱، ۱/۵ و ۲٪ w/w<sub>oil</sub>) به‌عنوان متغیرهای خروجی مدل در نظر گرفته شد. روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی محتوای متیل استر و نقطه اشتعال مورد ارزیابی قرار گرفت. شرایط بهینه با استفاده از سطح پاسخ برای محتوای متیل استر به میزان ۹۱/۸۷ درصد و نقطه اشتعال به میزان ۱۶۲/۷ °C با مطلوبیت ۰/۹۹۹ به‌دست آمد. همچنین، با استفاده از این روش معادله درجه دو برای پیش‌بینی محتوای متیل استر و نقطه اشتعال به‌دست آمد.

**کلیدواژگان:** محتوای متیل استر، نقطه اشتعال، ثابت دی‌الکتریک، فاکتور اتلاف، شرایط بهینه

### مقدمه

با توجه به کاهش منابع نفتی در ایران، مسائل زیست‌محیطی (به‌ویژه در شهرهای بزرگ) و به‌منظور تامین پایدار انرژی، حرکت به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و نسبتاً پاک ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. احتراق سوخت‌های برپایه گیاهی در واقع استفاده غیرمستقیم از انرژی خورشید است. سوخت‌های گیاهی به‌طور عمده آلودگی‌های کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی دارند و به‌راحتی می‌توانند از بقایای مواد گیاهی تولید شوند [۱، ۲]. در دهه ۱۹۸۰ میلادی، اتحادیه اروپا (EU) بیودیزل را به‌عنوان عاملی برای جلوگیری از فروپاشی مناطق روستایی (به‌عنوان درآمد اقتصادی) و راه حلی برای افزایش سطح تقاضای انرژی مطرح کرد [۳]. تولید بیودیزل عرصه بسیار فنی و پیشرفته‌ای برای محققان است که به‌دلیل افزایش قیمت نفت و مزایای زیست‌محیطی آن هر روز در این زمینه پیشرفتی حاصل می‌شود [۴]. بیودیزل را از هر ماده‌ای که دارای اسیدهای چرب (به‌صورت متصل به مولکول‌های دیگر یا به‌صورت آزاد) باشد می‌توان تولید کرد. بنابراین، روغن‌های مختلف گیاهی، چربی‌های حیوانی و پسماند روغن‌های خوراکی را می‌توان به‌عنوان منبع تولید بیودیزل استفاده کرد. از روغن‌های گیاهی مرسوم برای تولید بیودیزل می‌توان به سویا، آفتابگردان، روغن نخل [۵]، کلزا، کانولا [۶]، پنبه و جatroفا [۷] اشاره کرد.

رایج‌ترین روش تولید بیودیزل واکنش ترانس‌استریفیکاسیون روغن گیاهی و چربی‌های حیوانی است [۸]. واکنش ترانس‌استریفیکاسیون تحت تأثیر نوع الکل، نسبت مولی الکل به روغن، نوع و مقدار کاتالیزور، دما و زمان واکنش، محتوای اسیدهای چرب آزاد و مقدار آب موجود در روغن است. واکنش ترانس‌استریفیکاسیون همراه با کاتالیزور یا بدون حضور آن و با استفاده از الکل‌های نوع اول بیان می‌شود [۹، ۱۰]. الکل‌های مورد استفاده در واکنش ترانس‌استریفیکاسیون الکل‌های با زنجیره کوتاه همچون متانول، اتانول، پروپانول و بوتانول است. زمانی که روغن سویا با متانول، اتانول و بوتانول واکنش می‌دهد، می‌توان بعد از یک ساعت ۹۶ تا ۹۸ درصد استر به‌دست آورد [۱۱]. کاتالیزورهای مورد استفاده در ترانس‌استریفیکاسیون تری‌گلیسریدها به‌صورت قلیایی، اسیدی، آنزیمی و کاتالیزورهای غیرهمگن تقسیم بندی می‌شوند که از بین آن‌ها کاتالیزورهای قلیایی همچون سدیم هیدروکسید، سدیم متوکسید، پتاسیم هیدروکسید و پتاسیم متوکسید مؤثرترند [۱۲]. پس از تولید بیودیزل، در حالت ایدئال همه ویژگی‌های تعیین‌شده سوخت توسط استانداردها باید اندازه‌گیری شود تا انطباق آن‌ها با مقادیر مورد نیاز بررسی شود. مشکل عدم کنترل کیفیت در شرکت‌های متوسط و کوچک، جدی و جهانی بوده و فقط به برخی از کشورها محدود نمی‌شود [۱۳].

تحقیقات مختلفی برای تعیین ویژگی‌های کیفی بیودیزل انجام شده است. در تحقیقی، مقایسه بیودیزل استخراجی از دو گیاه کاملیا و کلزا نشان داد که میزان عدد ستان بیودیزل حاصل از گیاه کاملیا نسبت به کلزا، به‌اندازه ۷/۵ درصد افزایش و نقطه ریزش آن ۵ درجه سلسیوس کاهش داشت [۱۴]. همچنین، در تحقیق دیگری، نمونه‌های مختلف بیودیزل از ۲۱ نوع روغن مختلف برای تجزیه و تحلیل برخی ویژگی‌های بیودیزل از قبیل چگالی، گرانیوی سینماتیکی، متانول و محتوای آب با رویکرد شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک انتخاب شد. نتایج نشان دادند که برای انواع مختلف روغن پایه بیودیزل، رابطه نزدیکی بین شبکه عصبی مصنوعی و ویژگی‌های بیودیزل مورد ارزیابی به‌منظور پیش‌بینی این ویژگی‌ها وجود دارد [۱۵]. از طرفی، مطالعه‌ای بر روی تغییرات خواص فیزیکی، از قبیل گرانیوی، چگالی، ضریب شکست و نقطه اشتعال (FP) روغن آفتابگردان، حین فرایند ترانس‌استریفیکاسیون به‌منظور پیش‌بینی محتوای متیل استر اسیدهای چرب (FAME) <sup>۲</sup> (ضریب تبدیل تری‌گلیسرید به متیل استر) انجام شد. نتایج نشان دادند که با افزایش درصد متیل استر همه خواص فیزیکی کاهش پیدا کردند [۱۶].

از آنجا که تجهیزات لازم برای اندازه‌گیری ویژگی‌های کیفی بیودیزل به‌سادگی در دسترس نیستند و یا بسیار پرهزینه‌اند، برخی از روش‌ها و تجهیزاتی وجود دارند که می‌توانند با هزینه معقول طراحی و ساخته شوند. از سوی دیگر، با اندازه‌گیری خواص الکتریکی می‌توان اطلاعات مربوطه در مورد کیفیت سوخت زیستی را به‌دست آورد [۱۷].

استفاده از امواج مایکروویو یک تکنولوژی غیرمخرب برای پیش‌بینی ویژگی‌های کیفی مواد است [۱۸]. روش استفاده از امواج مایکروویو مزایای فراوانی مانند اندازه‌گیری و تفسیر سریع، دقت بالا، نفوذ به درون موادی که از نظر اپتیکی کدرند، هزینه تقریباً مناسب، نداشتن خطر تشعشع و میسر بودن امکان اندازه‌گیری برخط را داراست [۱۹]. سامانه‌های بازتابش خطی شیاردار <sup>۳</sup>، خط انتقال هم‌محور اتصال کوتاه <sup>۴</sup>، انتقال فضای آزاد <sup>۵</sup>، تشدید حفره پرشده <sup>۶</sup> و سامانه بازتابش خط هم‌محور <sup>۷</sup> برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک مواد مختلف به‌کار برده می‌شوند. از آنجا که تلفات دی‌الکتریک برای مواد بیولوژیک خیلی بالاست ( $\tan \delta \gg 0.1$ )، برای افزایش دقت اندازه‌گیری، سه سامانه هم‌محور اتصال کوتاه، انتقال فضای آزاد و بازتابش پروب <sup>۸</sup>

1. Flash Point
2. Fatty acid methyl ester
3. Slotted line reflection system
4. Shorted transmission line
5. Free space transmission system
6. Filled cavity resonance system
7. Coaxial line reflection system
8. Probe reflection system

برای اندازه‌گیری استفاده می‌شوند [۲۰]. مطالعاتی بر روی خواص دی‌الکتریک متانول و اتانول به‌عنوان ترکیبات اصلی و پایه‌ای بیودیزل، در حالت‌های مختلف با/بدون کاتالیزور در فرکانس و دماهای مختلف، برای طراحی و ارزیابی سامانه تولید بیودیزل براساس خواص به‌دست‌آمده انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس و غلظت کاتالیزور خواص دی‌الکتریک کاهش می‌یابند [۲۱]. از طرفی، تحقیقی بر روی تاثیر پرتودهی مایکروویو بر روی بعضی از ویژگی‌های روغن سویا مانند ساختار، گرانبوی و ویژگی‌های حرارتی آن صورت گرفت. نتایج حاکی از این بود که پرتودهی مایکروویو موجب افزایش گرانبوی و اکسیداسیون روغن سویا می‌شود [۲۲].

درنهایت، بالا بردن قابلیت اجرایی و بازده سیستم‌ها در فرایندها بدون افزایش هزینه مقوله‌ای است که بسیار حائز اهمیت است. روش اجرایی که بدین منظور به‌کار می‌رود بهینه‌سازی نامیده می‌شود. روش سطح پاسخ (RSM) <sup>۱</sup> مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که برای توسعه، پیشبرد و بهینه‌سازی فرایندهایی به‌کار می‌رود که در آن‌ها سطح مورد نظر تحت تاثیر متغیرهای مختلفی قرار داشته و هدف بهینه‌کردن پاسخ مزبور است [۲۳]. هدف از این پژوهش پیش‌بینی و بهینه‌سازی ویژگی‌های بیودیزل پالم (محتوای متیل استر و نقطه اشتعال) با استفاده از خواص دی‌الکتریک آن در زمان‌های متفاوت واکنش، درصد کاتالیزور و فرکانس‌های اندازه‌گیری مایکروویو گوناگون است.

## مواد و روش‌ها

### تهیه روغن پالم

روغن پالم با خلوص ۹۹ درصد از شرکت توسعه صنایع روغن نباتی گل بهار پارسیان، زرنديه خریداری شد. سپس، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن مطابق جدول ۱ اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عدد اسیدی از روش تیتراسیون به‌کمک شناساگر فنول فتالین، برای اندازه‌گیری چگالی و گرانبوی سینماتیکی از دستگاه Stabinger Viscometer مدل SVM3000 ساخت شرکت Anton Paar اتریش و همچنین برای اندازه‌گیری نقطه اشتعال، از دستگاه MiniFlashFLP مدل G-G85 ساخت شرکت گرابر اتریش استفاده شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی روغن پالم استفاده‌شده

Table 1- The physical and chemical properties of used palm oil

Properties	Test Method	Unit	Measured Value
Acid Value	ASTM D664	mg KOH/ g oil	0.85±0.02
Density (15 °C)	ASTM D1298	g/cm <sup>3</sup>	0.908±0.001
Kinematic Viscosity (25 °C)	ASTM D445	mm <sup>2</sup> /s	53.268±2.76
Flash Point	ASTM D93	°C	228±1
Free Fatty Acid	ASTM D5555	%	5.27±0.01
Color	-	-	Dark red
Mean Molecular Weight	-	g/mol	840

### فرایند تولید بیودیزل پالم

از سامانه فراصوت با توان نامی ۴۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز (Hielscher, Germany) برای انجام واکنش ترانس استریفیکاسیون بازی در این پژوهش استفاده شد. همچنین، از یک پروب میله‌ای به قطر ۱۴ میلی‌متر و رآکتور شیشه‌ای دوجداره به قطر ۶۳ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. طول موثر پروب برای انجام آزمایش در داخل محلول ۵۵ میلی‌متر بود. دمای واکنش به‌کمک آبی که بین دو جداره رآکتور در گردش بود بر روی ۴۵±۱ درجه سلسیوس تنظیم شد و تمامی آزمایش‌ها در فشار اتمسفر انجام شد [۲۴]. برای آزمون محتوای متیل استر از دستگاه کروماتوگراف گازی

1. Response surface method

(GC) مدل<sup>۱</sup> (Claus 580 GC model, Perkin Elmer Co., USA) و با استفاده از معادله (۱) و برای آزمون نقطه اشتعال از دستگاه (MiniFlashFLP, Grabner, Austria) به روش پیاله بسته<sup>۲</sup> طبق استاندارد ASTM D93 استفاده شد [۲۵].

$$\text{FAME content (\%)} = \frac{\sum A - A_{IS}}{A_{IS}} \times \frac{C_{IS} \times V_{IS}}{m} \quad (1)$$

در معادله (۱)،  $\sum A$  مجموع سطح زیر پیکها ( $\mu\text{V}\cdot\text{s}$ )،  $A_{IS}$  سطح زیر پیک مربوط به استاندارد داخلی ( $\mu\text{V}\cdot\text{s}$ )،  $C_{IS}$  غلظت محلول استاندارد داخلی ( $\text{mg}/\text{mL}$ )،  $V_{IS}$  حجم استفاده از محلول استاندارد داخلی ( $\text{mL}$ ) و  $m$  وزن بیودیزل برای تجزیه در GC ( $\text{mg}$ ) است. با توجه به ماهیت نمونه‌های آزمایشی (سوخت مایع)، استفاده از باند فرکانسی بالا، پایش و کنترل دما و دقت بالای اندازه‌گیری از سامانه بازتابش پروب برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک ( $\epsilon'$  ثابت دی‌الکتریک و  $\epsilon''$  فاکتور اتلاف) استفاده شد. در شکل ۱، اجزای اصلی سامانه بازتابش پروب برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک شامل تحلیلگر شبکه، دهانه تحلیلگر شبکه، کابل هم‌محور و پروب بازتابش نشان داده شده است. برای آزمون‌های خواص دی‌الکتریک از دستگاه تحلیلگر شبکه مدل (Agilent ENA series E5071C, USA) در محدوده فرکانسی بین ۱۰ kHz تا ۴/۵ GHz با دقت اندازه‌گیری  $\pm 0.2\text{dB}$  استفاده شد. در این تحقیق، از فرکانس‌های ۴۳۴، ۹۱۵ و ۲۴۵۰ MHz طبق استاندارد فرکانس‌های ISM<sup>۳</sup> برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک بیودیزل استفاده شد. همه آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. برای کالیبراسیون دستگاه تحلیلگر شبکه در فرکانس‌های میکروویو از سه استاندارد اتصال کوتاه، اتصال باز و بار مرجع استفاده شد [۲۶]. برای انجام این کار از قطعات استاندارد، که توسط کارخانه سازنده تهیه و در قالب کیت‌های کالیبراسیون ارائه می‌شود، استفاده شد. خروجی تحلیلگر شبکه به صورت دامنه و فاز است که مقادیر دامنه و فاز خروجی اندازه‌گیری شده با بهره‌گیری از الگوریتم‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در نرم‌افزار CST Studio Suite نسخه SP5 به مقادیر دی‌الکتریک متناظر تبدیل شدند. آزمون خواص دی‌الکتریک نمونه‌های سوخت با امواج میکروویو در آزمایشگاه آنتن و امواج رادیویی مرکز تحقیقات مخابرات ایران انجام شد.

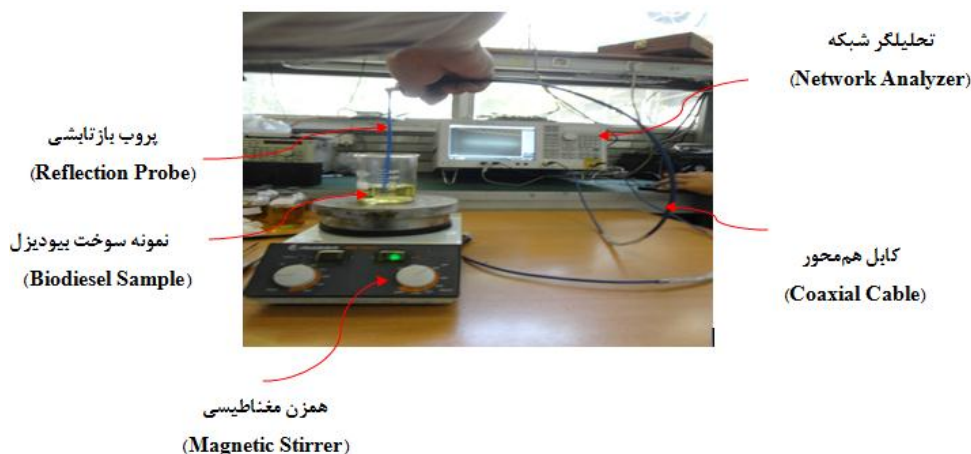


Figure 1- Probe reflection system for measuring the permittivity properties of palm biodiesel  
 شکل ۱- سامانه بازتابش پروب برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک بیودیزل پالم

### پیش‌بینی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای توسعه و بهینه‌کردن فرایندهایی به کار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تاثیر قرار می‌گیرد و هدف توصیف رابطه بین پاسخ و متغیرهای مستقل توسط

1. Gas Chromatography
2. Closed cup
3. Industrial, Scientific and Medical frequencies

مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی این پاسخ است [۲۷]. مدل مورد استفاده در روش سطح پاسخ، عموماً، رابطه درجه دوم است. مدل درجه دوم را می‌توان به صورت معادله (۲) نوشت.

$$Y_i = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $\beta_0$  عرض از مبدا و  $\beta_i$ ،  $\beta_{ii}$  و  $\beta_{ij}$  ضرایب رگرسیونی به ترتیب خطی، درجه دوم و برهم‌کنش و  $X_i$  و  $X_j$  متغیرهای مستقل کدبندی شده‌اند. ضرایب مدل با استفاده از روش حداقل مربع‌ها محاسبه می‌شوند که یک تکنیک رگرسیونی چندگانه است [۲۸]. نمادسازی ماتریس در معادله‌های (۳) و (۴) آمده است.

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

دستگاه معادلات بالا با استفاده از روش حداقل مربع‌ها حل شده و ضرایب معادله به دست می‌آیند. بعد از اینکه ضرایب معادله به دست آمدند، با حل معادله بالا، پاسخ پیش‌بینی می‌شود. سپس، باید مطابقت مدل با داده‌های آزمایش بررسی شود. برای این کار، روش‌های متعددی نظیر تحلیل باقی‌مانده، ریشه میانگین مربع‌های خطاهای پیش‌بینی شده و آزمون عدم تطابق وجود دارد. قابلیت پیش‌بینی کلی مدل توسط ضریب تبیین ( $R^2$ ) بیان شد و اهمیت آماری آن به وسیله آزمون آماری فیشر<sup>۱</sup> ( $F$ -Value) مشخص شد. اهمیت هر یک از ضرایب رگرسیون (مدل) نیز براساس آزمون  $t$  به دست آمد. البته، باید توجه داشت که  $R^2$  به تنهایی نمی‌تواند دقت مدل را توضیح دهد، زیرا این شاخص بیان‌کننده تغییرات حول میانگین پاسخ است. لذا، از ضریب دیگری به نام ضریب تبیین تنظیم‌شده ( $R^2_{adj}$ ) استفاده شد. در محاسبه این ضریب، برخلاف  $R^2$ ، به جای مجموع مربع‌ها میانگین مجموع مربع‌ها استفاده می‌شود. نحوه محاسبه این دو ضریب در معادله‌های (۵) و (۶) ارائه شده است [۲۹].

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{total}} \quad (5)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_{residual} / DF_{residual}}{SS_{total} / (DF_{model} + DF_{residual})} \quad (6)$$

در روابط بالا،  $SS_{residual}$  بیانگر مجموع مربع‌های باقی‌مانده،  $DF$  معرف درجه آزادی و  $SS_{total}$  معرف مجموع مربع‌های کل ( $SS_{residual} + SS_{model}$ ) است. تحلیل داده‌ها برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی و رسم نمودارها توسط نرم‌افزار Design Expert 7.1.6 انجام شد. در این تحقیق، با در نظر گرفتن همه شرایط آزمایش و لحاظ کردن کلیه داده‌ها، از روش Historical Data استفاده شد. روشی چندپاسخه برای بهینه‌سازی چند هدف معرفی شد که آن را مطلوبیت می‌نامند [۲۰]. این روش تابع هدفی می‌سازد که تابع مطلوبیت ( $D$ ) نام دارد. معادله (۷) بیان‌کننده محدوده مطلوبیت برای هر پاسخ ( $d_i$ ) است. محدوده مطلوبیت از صفر تا یک تغییر می‌کند که عدد یک بیانگر حداکثر مطلوبیت است.

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{\frac{1}{n}} = (\prod_{i=1}^n d_i)^{\frac{1}{n}} \varepsilon \quad (7)$$

در معادله (۷)،  $n$  نماینده تعداد پاسخ‌هاست. اگر هر کدام از پاسخ‌ها یا متغیرهای مستقل خارج از محدوده مطلوبیت قرار گیرند، تابع صفر می‌شود. در بهینه‌سازی براساس تابع مطلوبیت، برای هر متغیر و هر پاسخ می‌توان هدفی تعیین کرد.

1. Fisher

## نتایج و بحث

در تولید بیودیزل به روش فراصوت، بیشینه زمان لازم برای رسیدن به بیشینه ضریب تبدیل برای روغن پالم به روش فراصوت ۶۳ دقیقه است [۳۰]. برای مدل سازی فرایند تولید بیودیزل روغن پالم، با درصد خلوص متیل استر ۲۷/۷ تا ۹۱/۱ در سه سطح زمان واکنش (۷، ۲۱ و ۶۳ دقیقه) با کاتالیزور پتاسیم هیدروکسید (KOH)، با غلظت ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی روغن به دست آمد. نمونه‌ای از گراف‌های حاصل از دستگاه کروماتوگرافی گازی در زمان واکنش ۶۳ دقیقه (به عنوان بیشینه زمان واکنش و نقطه پایانی آزمایش با بیشترین محتوای متیل استر آورده شد)، در حضور کاتالیزور با غلظت ۲ درصد وزنی در شکل ۲ آورده شده است. همچنین، میانگین نتایج حاصل از داده‌های خواص دی‌الکتریک به دست آمده در سطوح مختلف فرکانس، غلظت کاتالیزور و زمان واکنش در جدول ۲ آورده شده است.

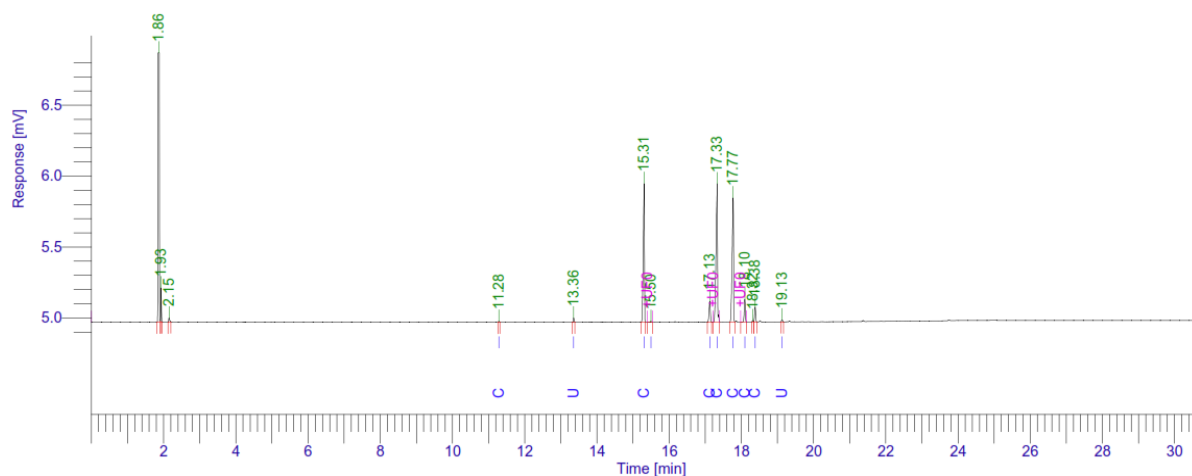


Figure 2- Biodiesel GC graph at 45 °C, 63 min and 2% catalyst

شکل ۲- نمودار آنالیز GC نمونه بیودیزل در دمای ۴۵ °C، زمان واکنش ۶۳ دقیقه و غلظت کاتالیزور ۲ درصد وزنی

همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه فرکانس‌ها و غلظت کاتالیزور مورد ارزیابی، با افزایش زمان واکنش، مقادیر ثابت دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف بیودیزل پالم افزایش می‌یابند. همچنین، با افزایش غلظت کاتالیزور در شرایط مختلف، مقادیر ثابت دی‌الکتریک کاهش و مقادیر فاکتور اتلاف افزایش می‌یابند. با افزایش زمان واکنش، میزان تبدیل روغن به سوخت بیودیزل افزایش می‌یابد. طول زنجیره‌های کربنی در سوخت بیودیزل نسبت به روغن پایه آن بلندتر است که این امر موجب می‌شود بیشتر انرژی موج صرف گشتاور دوقطبی مولکولی سوخت شود. در نتیجه، مقاومت در برابر گذردهی (ثابت دی‌الکتریک) سوخت افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش زمان واکنش، کسری از انرژی موج به صورت انرژی تکانه زاویه‌ای و گشتاور دوقطبی مولکولی به نمونه‌های سوخت منتقل می‌شود که این امر منجر به افزایش مقدار فاکتور اتلاف می‌شود [۲۱]. از طرفی، با افزایش فرکانس اندازه‌گیری تا ۹۱۵ MHz، روند تغییرات ثابت دی‌الکتریک به صورت افزایشی و بعد از آن کاهش‌ی است که این روند برای فاکتور اتلاف به صورت عکس اتفاق می‌افتد. بیشترین مقدار ثابت دی‌الکتریک در فرکانس ۹۱۵ MHz، غلظت کاتالیزور ۱ درصد و زمان واکنش ۶۳ دقیقه به میزان ۴/۳۵ به دست آمد. همچنین، بیشترین مقدار فاکتور اتلاف در فرکانس ۲۴۵۰ MHz، غلظت کاتالیزور ۲ درصد و زمان واکنش ۶۳ دقیقه به میزان ۰/۹۸ به دست آمد. برای خاصیت دی‌الکتریک، تا فرکانس خاصی، مقدار گشتاور دوقطبی منتقل شده بر اثر امواج الکترومغناطیس افزایش می‌یابد و سپس، روند کاهش‌ی خواهد داشت. در این تحقیق، بیشینه انرژی منتقل شده به مولکول‌های ماده سوختی در فرکانس ۹۱۵ MHz است که در این فرکانس مقدار ثابت دی‌الکتریک بیشینه است. در حالی که با افزایش فرکانس، مقدار فاکتور اتلاف به طور پیوسته با کاهش دامنه امواج عبوری افزایش می‌یابد [۲۱]. پس از تولید بیودیزل پالم با استفاده از سامانه فراصوت، نمونه‌های آزمایشی سوخت تحت شرایط مختلف

تولید برای اندازه‌گیری ویژگی‌های محتوای متیل استر و نقطه اشتعال و خواص دی‌الکتریک متناظر آن آماده شدند. میانگین نتایج حاصل از داده‌های ویژگی‌های بیودیزل پالم در سطوح مختلف غلظت کاتالیزور و زمان واکنش در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲- میانگین مقادیر خواص دی‌الکتریک بیودیزل پالم در سطوح مختلف فرکانس، غلظت کاتالیزور و زمان واکنش

Table 2- Mean values of palm biodiesel dielectric properties at different levels of frequency, catalyst and reaction time

Frequency (MHz)	Catalyst (%)	Reaction time (min)	'E	$\epsilon''$
434	1	7	3.4	0.33
		21	3.93	0.55
		63	4.27	0.64
	1.5	7	3.31	0.44
		21	3.84	0.65
		63	4.16	0.75
	2	7	3.19	0.56
		21	3.75	0.77
		63	4.07	0.86
915	1	7	3.55	0.26
		21	4.08	0.48
		63	4.35	0.57
	1.5	7	3.46	0.37
		21	3.97	0.58
		63	4.27	0.68
	2	7	3.34	0.47
		21	3.88	0.7
		63	4.21	0.8
2450	1	7	3.3	0.45
		21	3.82	0.67
		63	4.13	0.75
	1.5	7	3.19	0.56
		21	3.71	0.78
		63	4.02	0.86
	2	7	3.08	0.68
		21	3.6	0.9
		63	3.91	0.98

جدول ۳- میانگین مقادیر ویژگی‌های بیودیزل پالم در سطوح مختلف غلظت کاتالیزور و زمان واکنش

Table 3- Mean values of palm biodiesel characteristics at different levels of catalyst and reaction time

Catalyst (%)	Reaction time (min)	FAME Content (%)	FP (°C)
1	7	28.2	196
	21	67.3	180
	63	88.1	165
1.5	7	29.8	194
	21	69.7	178
	63	89.7	161
2	7	31.6	192
	21	70.9	174
	63	90.6	158

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت کاتالیزور و زمان واکنش، مقدار محتوای متیل استر افزایش و مقدار نقطه اشتعال کاهش می‌یابد. وجود زنجیره‌های بلند کربنی گروه‌های عاملی استر در تشکیل سوخت بیودیزل موجب افزایش محتوای متیل استر مخلوط سوخت می‌شود. با افزایش غلظت کاتالیزور و زمان واکنش، مقدار ضریب تبدیل روغن به بیودیزل مخلوط سوخت افزایش پیدا کرده و میزان محتوای متیل استر افزایش می‌یابد. همچنین، وجود زنجیره‌های بلند کربنی با ساختار مولکولی پیچیده و باندهای چندگانه موجب افزایش نقطه اشتعال می‌شود [۳۱]. هر چه درصد مقدار روغن در مخلوط سوخت بیشتر باشد، مقدار نقطه اشتعال افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت کاتالیزور و زمان واکنش، مقدار روغن مخلوط سوخت کاهش پیدا کرده و میزان درصد متیل استر (ضریب تبدیل) افزایش می‌یابد. در نتیجه، با افزایش ضریب تبدیل مخلوط سوخت، مقدار

نقطه اشتعال مخلوط سوخت کاهش می‌یابد [۳۲]. بیشترین مقدار محتوای متیل استر در غلظت کاتالیزور ۲ درصد و زمان واکنش ۶۳ دقیقه به میزان ۹۰/۶ درصد به دست آمد که در این شرایط، کمترین مقدار نقطه اشتعال به میزان ۱۵۸°C به دست آمد. با افزایش غلظت کاتالیزور تا ۲ درصد و زمان واکنش تا ۶۳ دقیقه، میزان تبدیل روغن به سوخت به بیشینه رسید که در نتیجه مقادیر محتوای متیل استر و نقطه اشتعال به ترتیب افزایش و کاهش پیدا کردند. در نهایت، برای پیش‌بینی ویژگی‌های بیودیزل پالم، از خواص دی‌الکتریک به دست آمده در شرایط مختلف فرایند تولید استفاده شد. در جدول ۴، آنالیز واریانس اثرات مقادیر ثابت دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف بر روی محتوای متیل استر و نقطه اشتعال بیودیزل پالم در روش سطح پاسخ به صورت مدل درجه دوم آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهد مدل درجه دوم، با ضریب تبیین و ضریب تبیین تنظیم‌شده بالا، بهترین مدل برای تخمین محتوای متیل استر و نقطه اشتعال به ازای تغییرات مقادیر ثابت دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تحلیل به روش سطح پاسخ، اثرات مقادیر ثابت دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف و اثرات متقابل آن‌ها بر مقادیر محتوای متیل استر و نقطه اشتعال در سطوح مختلف فرکانسی در سطح احتمال ۵ درصد معنادار است. با تغییرات مقدار غلظت کاتالیزور و زمان واکنش حین فرایند تولید، مقادیر ویژگی‌های کیفی محتوای متیل استر و نقطه اشتعال و مقادیر خواص دی‌الکتریک به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کنند. لذا، اثرات این تغییرات برای این دو متغیر وابسته نسبت به هم معنادار است. از آنجا که برای مدل‌سازی رگرسیونی ابتدا باید معناداری متغیرها نسبت به یکدیگر بررسی شود، لذا، پس از آزمون معناداری و تعیین آن، مدل‌سازی انجام می‌شود. مدل‌های پیش‌بینی رگرسیونی برای هر یک از ویژگی‌های سوخت با خواص دی‌الکتریک، در فرکانس‌های مختلف، در جدول ۵، آمده است.

جدول ۴- آنالیز واریانس محتوای متیل استر و نقطه اشتعال بیودیزل پالم با مدل درجه دوم در روش سطح پاسخ

Table 4- Analysis of variance of palm biodiesel FAME content and flash point by quadratic equation using RSM

Biodiesel Characteristics	Frequency (MHz)	Mean Square						
		Model	$\hat{\epsilon}$	$\epsilon''$	$\hat{\epsilon} \times \epsilon''$	$\hat{\epsilon}^2$	$\epsilon''^2$	Residual
FAME Content (%)	434	1105.68**	0.34*	0.41*	0.06*	0.57*	0.98*	0.39
	915	1104.78**	0.54*	0.13*	0.02*	0.71*	0.11*	1.88
	2450	1105.78**	0.21*	1.19*	0.26*	0.53*	0.19*	0.21
Flash Point (°C)	434	330.31**	0.68*	5.82**	2.95*	0.17*	5.40**	0.22
	915	329.97**	0.43*	4.04*	1.69*	0.10*	7.46*	0.79
	2450	330.28**	1.97*	9.29**	4.13*	0.66*	9.47**	0.28

\*\* و \* به ترتیب معناداری در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ است.

جدول ۵- مدل‌های رگرسیونی ویژگی‌های بیودیزل پالم بر حسب خواص دی‌الکتریک در سطوح مختلف فرکانس

Table 5- Regression models of palm biodiesel characteristics based on permittivity at different frequency

Frequency (MHz)	Regression Models	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
434	FAME = -215.29 + 74.94 $\hat{\epsilon}$ + 90.29 $\epsilon''$ - 5.45 $\hat{\epsilon}\epsilon''$ - 2.89 $\hat{\epsilon}^2$ - 14.76 $\epsilon''^2$	0.9964	0.9956
	FP = +58.68 + 75.99 $\hat{\epsilon}$ + 128.51 $\epsilon''$ - 47.47 $\hat{\epsilon}\epsilon''$ - 9.68 $\hat{\epsilon}^2$ + 11.61 $\epsilon''^2$	0.9462	0.9334
915	FAME = -175.71 + 52.59 $\hat{\epsilon}$ + 74.03 $\epsilon''$ - 1.36 $\hat{\epsilon}\epsilon''$ + 0.03 $\hat{\epsilon}^2$ - 11.81 $\epsilon''^2$	0.9905	0.9883
	FP = +70.91 + 69.66 $\hat{\epsilon}$ + 137.58 $\epsilon''$ - 46.91 $\hat{\epsilon}\epsilon''$ - 9.18 $\hat{\epsilon}^2$ + 6.61 $\epsilon''^2$	0.9205	0.9016
2450	FAME = -159.62 + 51.41 $\hat{\epsilon}$ + 31.87 $\epsilon''$ + 8.83 $\hat{\epsilon}\epsilon''$ - 0.73 $\hat{\epsilon}^2$ - 4.25 $\epsilon''^2$	0.9972	0.9965
	FP = -7.88 + 103.58 $\hat{\epsilon}$ + 181.17 $\epsilon''$ - 61.75 $\hat{\epsilon}\epsilon''$ - 11.84 $\hat{\epsilon}^2$ + 2.31 $\epsilon''^2$	0.9555	0.9449

FAME: متیل استر اسیدهای چرب و FP: نقطه اشتعال

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فرکانس ۴۳۴ MHz، مقدار محتوای متیل استر بیودیزل پالم رابطه مستقیم و معناداری با مقادیر ثابت دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف دارد و نسبت به اثر متقابل آن‌ها رابطه عکس و غیرمعناداری دارد. همچنین، مقدار نقطه اشتعال فقط نسبت به اثر متقابل ثابت دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف رابطه عکس داشته و نسبت به بقیه متغیرها رابطه مستقیم دارد [۳۳]. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین مقدار ضریب تبیین و ضریب تبیین تنظیم‌شده، برای هر دو



ویژگی محتوای متیل استر و نقطه اشتعال، در فرکانس ۲۴۵۰ MHz به دست آمد. در نتیجه، می توان پیش بینی با دقت بالاتری برای این ویژگی ها با استفاده از مقادیر خواص دی الکتریک در فرکانس ۲۴۵۰ MHz داشت. در حالت کلی، خواص دی الکتریک با دقت بالایی می توانند ویژگی های محتوای متیل استر و نقطه اشتعال بیودیزل پالم را پیش بینی کنند. در شکل ۳، نمودار سه بعدی هر یک از ویژگی ها با خواص دی الکتریک متناظر در فرکانس های مختلف آمده است.

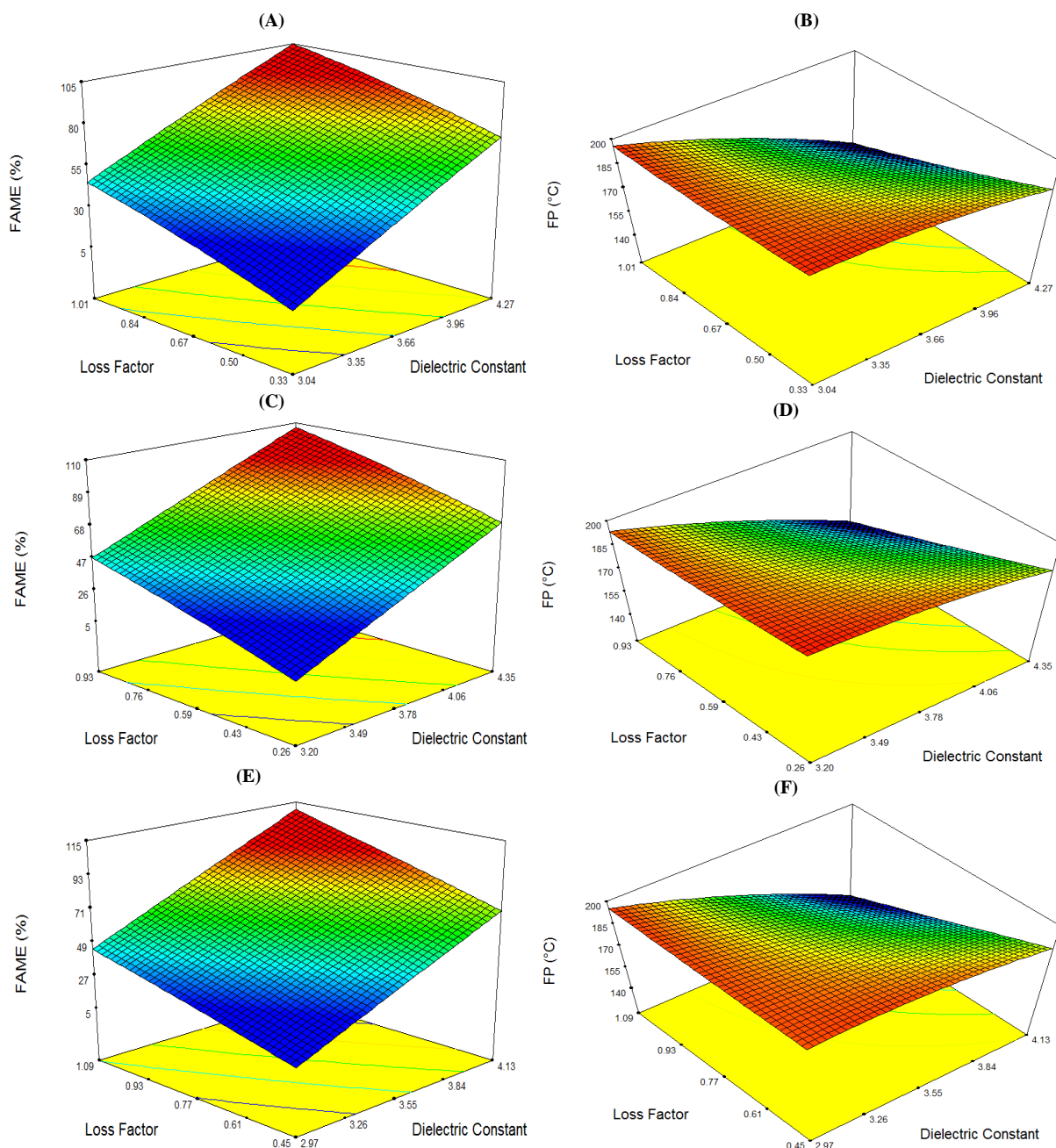


Figure 3- The 3D surface based on the permittivity (A, C, E) for FAME and (B, D, F) for FP at frequencies of 434, 915 and 2450 MHz, respectively

شکل ۳- نمودار سه بعدی بر حسب خواص دی الکتریک (A,C,E) برای محتوای متیل استر و (B,D,F) برای نقطه اشتعال به ترتیب در فرکانس های ۴۳۴، ۹۱۵ و ۲۴۵۰MHz

همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش محتوای متیل استر، مقادیر ثابت دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف با هم افزایش می‌یابند. در توجه این مسئله می‌توان عنوان کرد، با افزایش ضریب تبدیل، به دلیل وجود گلیسرین آزاد و مولکول‌های با طول زنجیره‌های بلند کربن در ساختمان بیودیزل، هدایت الکتریکی سوخت کاهش می‌یابد. در نتیجه، ثابت دی‌الکتریک آن افزایش می‌یابد. همچنین، با کاهش هدایت الکتریکی، مقدار افت امواج عبوری از مولکول‌های سوخت حین فرایند تولید افزایش می‌یابد. این امر منجر به افزایش مقدار فاکتور اتلاف سوخت می‌شود [۱۸]. از طرفی، با افزایش زمان فرایند و افزایش محتوای متیل استر، مقدار نقطه اشتعال کاهش می‌یابد. از آنجا که در سوخت بیودیزل میزان نقطه اشتعال وابستگی بالایی با محتوای متانول دارد، با افزایش محتوای متیل استر، مقدار متانول سوخت کاهش می‌یابد. از آنجا که متانول دارای مولکول قطبی است، کاهش مقدار متانول در سوخت خاصیت عایقی (دی‌الکتریک) سوخت را افزایش می‌دهد. بنابراین، با افزایش مقدار نقطه اشتعال، مقادیر ثابت دی‌الکتریک کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش قطبش‌پذیری مولکول‌های سوخت، به علت وجود بیشتر مولکول‌های قطبی متانول در مخلوط سوخت، فاکتور اتلاف نیز کاهش می‌یابد [۳۴، ۳۵]. از آنجا که ویژگی‌های محتوای متیل استر و نقطه اشتعال نسبت به خواص دی‌الکتریک در فرکانس ۲۴۵۰ MHz با دقت بالاتری ارزیابی و پیش‌بینی شدند، برای بهینه‌سازی از این فرکانس برای یافتن شرایط بهینه استفاده می‌شود. جدول ۶ مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی محتوای متیل استر و نقطه اشتعال با خواص دی‌الکتریک در فرکانس ۲۴۵۰ MHz را نشان می‌دهد.

جدول ۶- مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی ویژگی‌های بیودیزل پالم در فرکانس ۲۴۵۰MHz

Table 6- Predicted and actual values of palm biodiesel characteristics at frequency of 2450 MHz

Run	$\epsilon'$	$\epsilon''$	FAME Content (%)		Flash Point (°C)	
			Predicted	Obtained	Predicted	Obtained
1	3.91	0.68	28.63	28.2	195.27	196
2	3.84	0.75	28.98	29.8	194.37	194
3	3.77	0.82	29.78	31.6	193.72	192
4	3.82	0.8	68.09	67.30	179.37	181
5	3.74	0.85	68.60	69.70	177.99	178
6	3.68	0.91	69.54	71.30	163.82	165
7	3.71	0.92	89.04	88.10	163.07	161
8	3.65	0.97	88.54	89.70	162.62	158
9	3.57	1.02	90.13	91.10	161.83	159

شکل ۴ همبستگی قابل قبولی بین مقادیر به دست آمده و پیش‌بینی شده برای محتوای متیل استر و نقطه اشتعال بیودیزل پالم در فرکانس ۲۴۵۰ MHz به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۹۸ و ۰/۹۸۵ را نشان می‌دهد. در نهایت، برای رسیدن به مقادیر بهینه ویژگی‌های بیودیزل به صورت بیشترین مقدار محتوای متیل استر و کمترین مقدار نقطه اشتعال در فرکانس ۲۴۵۰ MHz، شرایط بهینه به صورت جدول ۷ به دست آمده است.

جدول ۷- شرایط پیشنهادی برای رسیدن به ویژگی‌های بهینه بیودیزل در فرکانس ۲۴۵۰MHz

Table 7- Suggested conditions to reach optimum biodiesel characteristics at frequency of 2450 MHz

Number	$\epsilon'$	$\epsilon''$	FAME content (%)	Flash point (°C)	Desirability
1	4.34	0.61	91.87	162.7	0.999
2	3.83	1.10	91.02	156.7	0.998
3	4.50	0.53	90.74	167.6	0.996
4	3.50	1.46	90.59	163.7	0.995
5	3.77	1.16	90.45	157.7	0.995
6	3.78	1.14	90.38	157.6	0.994
7	3.93	0.99	89.53	157.9	0.993
8	3.93	0.98	89.13	158.3	0.992
9	3.42	1.50	88.39	167.9	0.991
10	3.65	1.24	87.10	161.2	0.991

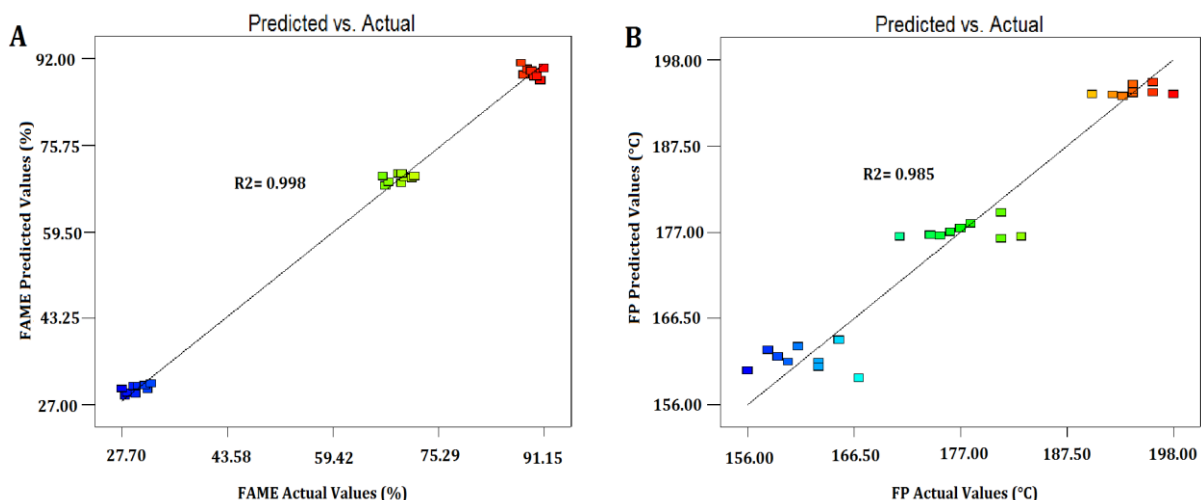


Figure 4- Actual values vs. predicted values of (A) FAME content and (B) FP at frequency of 2450 MHz

شکل ۴- نمودار مقادیر واقعی نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده (A) محتوای متیل استر و (B) نقطه اشتعال در فرکانس ۲۴۵۰ MHz

شرایط بهینه با مطلوبیت ۰/۹۹۹ برای محتوای متیل استر ۹۱/۸۷ درصد و نقطه اشتعال ۱۶۲/۷°C، وقتی که مقدار ثابت دی‌الکتریک ۴/۳۴ و فاکتور اتلاف ۰/۶۱ است، به دست آمد که این مقادیر خواص دی‌الکتریک معادل غلظت کاتالیزور ۱/۲۸ درصد و زمان واکنش ۶۲/۷۰ دقیقه است. به منظور تایید مدل پیش‌بینی‌کننده، مقادیر بهینه به دست آمده در یک آزمایش تجربی بررسی شد. مقادیر محتوای متیل استر و نقطه اشتعال به دست آمده در این شرایط در آزمایش تجربی به ترتیب ۸۹/۴۱ درصد و ۱۶۱/۹°C به دست آمد که خیلی نزدیک به مقدار پیش‌بینی شده است. نتایج نشان می‌دهند که روش سطح پاسخ پیش‌بینی مناسبی از ویژگی‌های بیودیزل پالم در حین فرایند تولید با استفاده از خواص دی‌الکتریک آن داشته است.

## نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان داد که مقدار محتوای متیل استر بیودیزل پالم رابطه مستقیم و معناداری با مقادیر ثابت دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف دارد و نسبت به اثر متقابل آن‌ها رابطه عکس و غیرمعناداری دارد. همچنین، مقدار نقطه اشتعال فقط نسبت به اثر متقابل ثابت دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف رابطه عکس داشته و نسبت به بقیه متغیرها رابطه مستقیم دارد. همچنین، بیشترین مقدار ضریب تبیین، برای هر دو ویژگی محتوای متیل استر و نقطه اشتعال، در فرکانس ۲۴۵۰ MHz، به ترتیب ۰/۹۹۶۵ و ۰/۹۴۴۹، به دست آمد. با افزایش محتوای متیل استر و نقطه اشتعال، مقادیر ثابت دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف به ترتیب با هم افزایش و کاهش می‌یابند. شرایط بهینه (بیشترین مقدار محتوای متیل استر و کمترین مقدار نقطه اشتعال در فرکانس ۲۴۵۰ MHz) با مطلوبیت ۰/۹۹۹ برای محتوای متیل استر ۹۱/۸۷ درصد و نقطه اشتعال ۱۶۲/۷°C، وقتی که مقدار ثابت دی‌الکتریک ۴/۳۴ و فاکتور اتلاف ۰/۶۱ است، به دست آمد که این مقادیر خواص دی‌الکتریک معادل غلظت کاتالیزور ۱/۲۸ درصد و زمان واکنش ۶۲/۷۰ دقیقه است. نتایج نشان می‌دهند که روش سطح پاسخ پیش‌بینی مناسبی از ویژگی‌های بیودیزل پالم در حین فرایند تولید با استفاده از خواص دی‌الکتریک آن داشته است.

## تشکر و قدردانی

کلیه مراحل استخراج، استریفیکاسیون و تجزیه در پژوهشکده انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. بدین وسیله از مسئول آزمایشگاه‌های پژوهشکده انرژی‌های تجدیدپذیر، جناب آقای مهندس زارعی، بابت همکاری در انجام این تحقیق، قدردانی می‌شود.

## منابع

1. B. Ghobadian, "Developmental Trends of Sustainable Bioenergy Systems at TMU Laboratories," *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2, 2012, pp. 11-18.
2. J. V. Gerpen, "Biodiesel Processing and Production," *Fuel Processing Technology*, 86, 2005, pp. 1097-1107.
3. H. Fukuda, A. Kondo, and H. Noda, "Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92, 2001, pp. 405-416.
4. J. M. Marchetti, V. U. Miguel and A. F. Errazu, "Possible Methods for Biodiesel Production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 2007, pp. 1300-1311.
5. P. Chand, V. R. Chintareddy, J. G. Verkade and D. Grewell, "Enhancing Biodiesel Production from Soybean Oil using Ultrasonics," *Energy & Fuels*, 24, 2010, pp. 2010-2015.
6. L. Zou and S. Atkinson, "Characterising Vehicle Emissions from the Burning of Biodiesel Made from Vegetable Oil," *Environmental Technology*, 24, 2003, pp. 1253-1260.
7. W. M. J. Achten, L. Verchot, Y. J. Franken, E. Mathijs, V. P. Singh, R. Aerts and B. Muys, "Jatropha Bio-Diesel Production and use," *Biomass and Bioenergy*, 32, 2008, pp. 1063-1084.
8. M. Balat and H. Balat, "A Critical Review of Bio-Diesel as a Vehicular Fuel," *Energy Conversion and Management*, 49, 2008, pp. 2727-2741.
9. A. Demirbas, "Biodiesel from Sunflower Oil in Supercritical Methanol with Calcium Oxide," *Energy Conversion and Management*, 48, 2007, pp. 937-941.
10. G. Najafi, B. Ghobadian and T.F. Yusaf, "Algae as a Sustainable Energy Source for Biofuel Production in Iran: A Case Study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2011, pp. 3870-3876.
11. S. Dmytryshyn, A. Dalai, S. Chaudhari, H. Mishra and M. Reaney, "Synthesis and Characterization of Vegetable Oil Derived Esters: Evaluation for Their Diesel Additive Properties," *Bioresource Technology*, 92, 2004, pp. 55-64.
12. L. C. Meher, D. Vidya Sagar and S. N. Naik, "Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification-A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 2006, pp. 248-268.
13. J. E. De Souza, M. D. Scherer, J. A. S. Cáceres, A. R. L. Caires, and J. C. M'Peko, "A Close Dielectric Spectroscopic Analysis of Diesel/Biodiesel Blends and Potential Dielectric Approaches for Biodiesel Content Assessment," *Fuel*, 105, 2013, pp. 705-710.
14. H. Bakhoda, M. Almassi, N. Moharamnejad, R. Moghaddasi and M. Azkia, "Energy Production Trend in Iran and its Effect on Sustainable Development," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2011, pp. 1335-1339.
15. R.M. Balabin, E.I. Lomakina and R.Z. Safieva, "Artificial Neural Network (ANN) Approach to Biodiesel Analysis: Analysis of Biodiesel Density, Kinematic Viscosity, Methanol and Water Contents using Near Infrared (NIR) Spectroscopy," *Fuel*, 90, 2011, pp. 2007-2015.
16. A. E. Ghanei, R. Moradi, G. R. Taherpour and R. Kalantari, "Variation of Physical Properties During Transesterification of Sunflower Oil to Biodiesel as an Approach to Predict Reaction Progress," *Fuel Processing Technology*, 92, 2011, pp. 1593-1598.
17. W. S. Jie, H. Abdullah, N. Yusof and Z. Abbas, "Dielectric Properties of Oil Palm Trunk Core," *Journal of Clean Energy Technologies*, 3, 2015, pp. 422-427.
18. I. E. Elbatawi, "An Acoustic Impact Method to Detect Hollow Heart of Potato Tubers," *Biosystem Engineering*, 100, 2008, pp. 206-213.
19. J. Cheeke and N. Davis, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, Second Edition, Florida, CRC Press, 2002.
20. M. S. Venkatesh and G. S. V. Raghavan, "An Overview of Dielectric Properties Measuring Techniques," *Canadian Biosystem Engineering*, 47, 2005, pp. 15-30.
21. D. P. Muley and D. Boldor, "Investigation of Microwave Dielectric Properties of Biodiesel Components," *Bioresource Technology*, 127, 2013, pp. 165-174.
22. A. Biswas, A. Adhvaryu, D. G. Stevenson, B.K. Sharma, J. L. Willet and S. Z. Erhan, "Microwave Irradiation Effects on the Structure, Viscosity, Thermal Properties and Lubricity of Soybean oil," *Industrial Crops and Products*, 25, 2007, pp. 1-7.
23. R. H. Myers and D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments*, New York, John Wiley & Sons, 1995.
24. V. B. Veljkovic, J. M Avramovic and O. S. Stamenkovic, "Biodiesel Production by Ultrasound-Assisted Transesterification: State of the Art and the Perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, pp. 1193-1209.
25. M. Maghami, S. M. Sadrameli and B. Ghobadian, "Production of Biodiesel from Fishmeal Plant Waste Oil using Ultrasonic and Conventional Methods," *Applied Thermal Engineering*, 75, 2015, pp. 575-579.
26. D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Fourth Edition, Wiley, Massachusetts, 2005.
27. D. Başand, I. H. Boyacı, "Modeling and Optimization I: Usability of Response Surface Methodology," *Journal of Food Engineering*, 78, 2007, pp. 836-845.
28. M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar and L. A. Escalera, "Response Surface Methodology (RSM) as a Tool for Optimization in Analytical Chemistry," *Talanta*, 76, 2008, pp. 965-977.

29. S. Ghafari, H. AbdulAziz, M. H. Isa and A. A. Zinatizadeh, "Application of Response Surface Methodology (RSM) to Optimize Coagulation-Flocculation Treatment of Leachate using Poly-Aluminum Chloride (PAC) and Alum," *Journal of Hazardous Materials*, 163, 2009, pp. 650-656.
30. G. Chen, R. Shan, J. Shi and B. Yan, "Ultrasonic-Assisted Production of Biodiesel from Transesterification of Palm Oil Over Ostrich Eggshell-Derived CaO Catalysts," *Bioresource Technology*, 171, 2014, pp. 428-432.
31. J. Mejía, N. Salgado and C. Orrego, "Effect of Blends of Diesel and Palm-Castor Biodiesels on Viscosity, Cloud Point and Flash Point," *Industrial Crops and Products*, 43, 2013, pp. 791-797.
32. M. Ijaz, K. H. Bahtti, Z. Anwar, U. F. Dogar and M. Irshad, "Production, Optimization and Quality Assessment of Biodiesel from Ricinus Communis L. Oil," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9, 2016, pp. 180-184.
33. A. Joshi, S. Pund, M. Nivsarkar, K. Vasu and C. Shishoo, "Dissolution Test for Site-Specific Release Ionized Pellets in USP Apparatus 3 (Reciprocating Cylinder): Optimization using Response Surface Methodology," *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 69, 2008, pp. 769-775.
34. S. D. Romano and P. A. Sorichetti, *Dielectric Spectroscopy in Biodiesel Production and Characterization*, Springer-Verlag London, London, 2011.
35. P. A. Sorichetti and S. D. Romano, "Physico-Chemical and Electrical Properties for the Production and Characterization of Biodiesel," *Physics and Chemistry of Liquids*, 43, 2005, pp. 37-48.

## English Abstract

### Prediction and Optimization of Palm Biodiesel Characteristics using Permittivity Properties and Response Surface Methodology

Mohammad Zarein<sup>1</sup>, Mohammad Hadi Khoshtaghaza<sup>2\*</sup>, Barat Ghobadian<sup>3</sup>  
and Hossein Ameri Mahabadi<sup>4</sup>

1- Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, m.zarein@modares.ac.ir

2- Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, khoshtag@modares.ac.ir

3- Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, ghobadib@modares.ac.ir

4- Electrical Engineering Department, Iran Telecommunication Research Center (ITRC), Tehran, Iran, ameri@ieee.org

\*Corresponding author

(Received: 2018.06.25, Received in revised form: 2018.09. 13, Accepted: 2018.10. 09)

The usage of biodiesel quality monitoring system (online and batch) is always the basic requirement of its production which requires to research in this area. The purpose of this study is to predict and optimize the palm biodiesel characteristics using its permittivity properties. The parameters of biodiesel permittivity properties ( $\epsilon'$ , dielectric constant and  $\epsilon''$ , loss factor) at microwave frequencies of (434, 915 and 2450 MHz) were used as input variables. The palm biodiesel characteristics as fatty acid methyl ester (FAME) content and flash point (FP) at three different level of reaction time (3, 9 and 27 min) and catalyst concentration (1, 1.5 and 2 % w/w<sub>oil</sub>) were selected as output parameters for the models. The response surface methodology was developed for prediction and optimization of FAME content and flash point. The optimum condition was obtained using RSM by FAME content of 95.87% and flash point of 162.7 °C with desirability of 0.999.

**Keywords:** FAME Content, Flash Point, Dielectric constant, Loss factor, Optimum conditions