

ارزیابی تأثیر پارامترهای روغن ترانسفورماتور بر شاخص سلامت ترانسفورماتور با استفاده از روش رگرسیون تخمین منحنی

مرتضی سعید و حامد زین‌الدینی میمند

روغن که در اثر خطا در روغن تولید می‌شوند، برای ارزیابی شاخص سلامت ترانسفورماتور و همچنین تأثیر پارامترهای ترانسفورماتور بر یکدیگر استفاده می‌شود. برخی از پارامترهای روغن ترانسفورماتور که بر روی شاخص سلامت ترانسفورماتور تأثیر می‌گذارند عبارتند از گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور، کشش سطحی روغن، فورفورال، ولتاژ شکست روغن، ضریب تلفات، مؤلفه رطوبت و اسید. با اعمال روش رگرسیون تخمین منحنی^۱ به عنوان مثال می‌توان دریافت که بین مؤلفه رطوبت و مؤلفه اسید در روغن ترانسفورماتور چه نوع رابطه‌ای وجود دارد یا کدام نوع گاز در تولید مؤلفه اسید نقش بیشتری دارد.

گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۱]. گازهای CO و CO_۲ در ترانسفورماتور نشان‌دهنده خطای فرسودگی و تجزیه عایق کاغذی است. گازهای CH_۴، C_۲H_۶ و C_۲H_۴ نشان‌دهنده خطای اضافه بار ترانسفورماتور هستند و وجود گاز استیلن نشان‌دهنده خطای قوس الکتریکی^۲ در ترانسفورماتور است که می‌تواند در اثر خرابی کنتاکت‌های تپ چنجر یا اتصال حلقه در ترانسفورماتور باشد. اگر گازهای CH_۴، C_۲H_۶، C_۲H_۴، CO و CO_۲ هم‌زمان در روغن دی‌الکتریک تولید شوند، ترانسفورماتور دارای خطای فلز داغی است که عایق کاغذی را می‌سوزاند. گاز H_۲ نشان‌دهنده خطای تخلیه جزئی است؛ البته این گاز در هنگام وقوع اکثر خطاها نیز مقداری تولید می‌شود.

کشش سطحی بین آب و روغن راهی برای اندازه‌گیری نیروی مولکولی بین آب و روغن است. کشش سطحی در روغن دی‌الکتریک باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا تضمین کند که اکسیداسیون روغن باعث تولید آلاینده‌های شیمیایی و ذرات دیگر در روغن نشوند [۲] و [۳].

فوران یا فورفورال یک گروه از مؤلفه‌های شیمیایی هستند و شامل furfuraldehyde-۲ و سایر زیرمجموعه‌های وابسته می‌شوند که در زمان پیری و تجزیه عایق کاغذی به وجود می‌آیند. مؤلفه فوران می‌تواند برای تعیین درجه پلیمریزاسیون^۳ عایق کاغذی و تخمین عمر باقیمانده عایق کاغذی ترانسفورماتور استفاده شود [۴] و [۵]. درجه پلیمریزاسیون نیز بیانگر وزن مولکولی در مواد سلولزی است.

ولتاژ شکست روغن دی‌الکتریک باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا تضمین کند که روغن دی‌الکتریک در مقابل تنش‌های الکتریکی مانند قوس الکتریکی تجزیه نشود [۶] و [۷].

ضریب تلفات یکی از تست‌های الکتریکی ترانسفورماتور است و به عنوان یکی از شاخص‌های اندازه‌گیری ضریب قدرت عایقی سیم‌پیچ و

چکیده: ترانسفورماتورها از گران‌ترین و مهم‌ترین تجهیزات در سیستم‌های قدرت هستند که تحت تأثیر تنش‌های الکتریکی، حرارتی و واکنش‌های شیمیایی می‌باشند. شاخص سلامت ترانسفورماتور معیار است که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و بازرسی‌های میدانی برای ارزیابی وضعیت و تعیین عمر باقیمانده ترانسفورماتور از آن استفاده می‌شود. هدف از این مقاله به صورت یک ایده جدید، تعیین روابط بین پارامترهای الکتریکی، فیزیکی، شیمیایی روغن، گازهای محلول در روغن و شاخص سلامت ترانسفورماتور می‌باشد. یکی از مزایای استفاده از روش رگرسیون در تحلیل داده‌های ترانسفورماتور نسبت به روش‌های دیگر برای تعیین شاخص سلامت ترانسفورماتور، تعیین تأثیرپذیری پارامترهایی است که بیشترین تأثیر را بر یکدیگر دارند از جمله: (۱) معرفی رطوبت به عنوان پارامتری که بیشترین نقش را در کاهش ولتاژ شکست روغن دی‌الکتریک و شاخص سلامت ترانسفورماتور دارد. (۲) تعیین وجود رابطه معکوس بین مؤلفه اسید و مؤلفه فورفورال. (۳) تعیین فورفورال به عنوان پارامتری که بیشترین نقش را در کاهش کشش سطحی (به هم پیوستگی مولکول‌های) روغن دارد. (۴) تعیین گاز CO به عنوان گازی که بیشترین نقش را در تولید مؤلفه فورفورال دارد. (۵) تعیین گاز C_۲H_۶ به عنوان گازی که بیشترین نقش را در تولید مؤلفه اسید دارد. در این مقاله از روش رگرسیون تخمین منحنی استفاده شده و نتایج با رسم نمودارها توسط نرم‌افزار آماری SPSS برای تحلیل پارامترها ترسیم گردیده است. برای انجام شبیه‌سازی‌ها داده‌های آزمایشگاهی مربوط به ۱۲۰ عدد ترانسفورماتور در نظر گرفته شده است.

کلیدواژه: رگرسیون تخمین منحنی، شاخص سلامت ترانسفورماتور، گازهای محلول در روغن.

۱- مقدمه

همان‌طور که با نمونه‌گیری از خون انسان و انجام آزمایش بر روی خون می‌توان بسیاری از بیماری‌های انسان را تشخیص داد، با نمونه‌گیری از روغن ترانسفورماتور و انجام آزمایش بر روی روغن می‌توان بسیاری از خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور، تخمین عمر باقیمانده و ارزیابی شرایط ترانسفورماتور را مشخص نمود. در این مقاله از پارامترهای الکتریکی، فیزیکی و شیمیایی روغن ترانسفورماتور به همراه گازهای محلول در

این مقاله در تاریخ ۲۷ مهر ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۲۱ اردیبهشت ماه ۱۴۰۲ بازنگری شد.

مرتضی سعید، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران،
(email: mortezasaeid.13651365@gmail.com)

حامد زین‌الدینی میمند (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، کرمان، ایران،
(email: h.zeinodini@kgut.ac.ir)

1. Curve Estimation Regression
2. Arcing
3. Degree of Polymerization

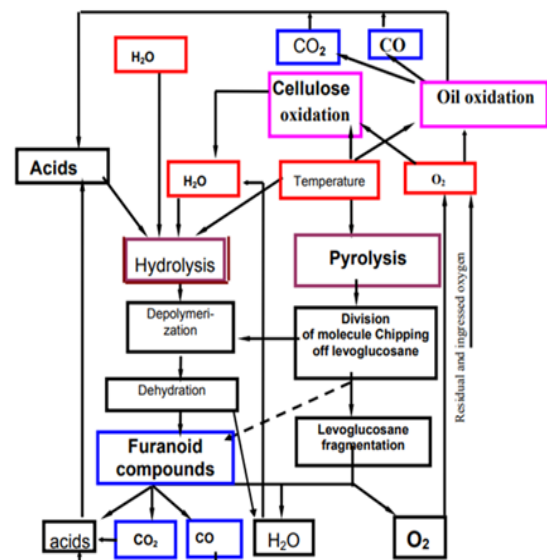
ارائه شده در بعضی از استانداردها برای محاسبه شاخص‌های DGA و کیفیت روغن استفاده می‌شود؛ سپس از فیلتر ذره برای تعیین حالت عایق کاغذی و تخمین عمر عایق با اعمال عدم قطعیت‌های خطای اندازه‌گیری جریان و خطای دمای روغن در محاسبه نقطه داغ سیم‌پیچ ترانسفورماتور استفاده می‌شود. شاخص سلامت ترانسفورماتور علاوه بر محاسبه شاخص‌های DGA و کیفیت روغن می‌تواند از طریق شاخص دیگری مانند شاخص اقتصادی نیز محاسبه شود [۲۳]. در [۲۴] شاخص‌های DGA و کیفیت روغن به همراه شاخص کیفیت عایق کاغذی در پنج گروه طبقه‌بندی و نرمالیزه شده و از ترکیب منطق فازی و ماشین بردار پشتیبان برای تعیین شاخص سلامت ترانسفورماتور استفاده شده است.

شاخص‌هایی نظیر شاخص DGA یا همان آنالیز گازهای محلول و شاخص کیفیت روغن برای تعیین شاخص سلامت روغن ترانسفورماتور استفاده می‌شوند. از شاخص DGA برای تعیین خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور [۲۵] و [۲۶] و از شاخص کیفیت روغن برای تعیین پارامترهای الکتریکی، فیزیکی و شیمیایی روغن استفاده می‌شود [۲۲] تا [۲۵]. یکی از روش‌های رایج محاسبه شاخص DGA جهت تشخیص خطا در ترانسفورماتورها استفاده از شبکه‌های عصبی است [۲۶].

تشخیص خطا، نحوه بارگیری و ارزیابی شرایط ترانسفورماتور یکی از کارهای ضروری در بهره‌برداری از ترانسفورماتورها می‌باشد [۲۷] و [۲۸]. معمولاً برای تعیین شاخص سلامت عایق کاغذی ترانسفورماتور از مؤلفه فورفورال در روغن ترانسفورماتور استفاده می‌شود [۲۹]. مؤلفه فورفورال همچنین تعیین‌کننده درجه پلیمریزاسیون عایق کاغذی ترانسفورماتور است [۳۰] و [۳۱].

در مقالاتی که قبلاً ارائه شده است برای تعیین شاخص سلامت و یا تشخیص خطا در ترانسفورماتور، هر کدام از شاخص‌های کیفیت روغن و شاخص DGA به صورت کلی برای تعدادی از پارامترها محاسبه می‌شد (شاخص کیفیت روغن برای پارامترهای الکتریکی، فیزیکی و شیمیایی روغن و شاخص DGA برای گازهای محلول در روغن دی‌الکتریک). ولی اثر هر کدام از پارامترهای الکتریکی، فیزیکی و شیمیایی روغن بر یکدیگر یا اثر گازها در کاهش یا افزایش برخی از پارامترهای روغن در نظر گرفته نمی‌شد. در این مقاله به صورت یک ایده جدید، تأثیر هر کدام از گازهای محلول در روغن روی پارامترهای الکتریکی، فیزیکی و شیمیایی روغن، تأثیر پارامترهای روغن بر یکدیگر و تأثیر هر دو مورد ذکر شده بر شاخص سلامت ترانسفورماتور که به عنوان معیاری جهت ارزیابی شرایط ترانسفورماتور استفاده می‌شود با روش‌های رگرسیون تخمین منحنی مشخص می‌گردد [۳۲]. در شکل ۱ روند فرسودگی روغن و عایق کاغذی ترانسفورماتور نشان داده شده است [۳۳].

با توجه به شکل ۱ همیشه در روغن ترانسفورماتور، مقداری اکسیژن وجود دارد. وجود اکسیژن باعث اکسیداسیون روغن، تولید گازهای CO و CO₂ و پیدایش مؤلفه اسید در روغن ترانسفورماتور می‌شود. رطوبتی که در روغن ترانسفورماتور وجود دارد یا رطوبتی که در اثر افزایش دما و اکسیداسیون عایق کاغذی تولید می‌شود به همراه مؤلفه اسید باعث خوردگی و تجزیه عایق کاغذی ترانسفورماتور می‌گردد که این پدیده، هیدرولیز نام دارد. از طرفی افزایش دما در ترانسفورماتور باعث شکنندگی و تخریب عایق کاغذی ترانسفورماتور می‌شود و نام این پدیده نیز پیرولیز است. مؤلفه‌های حاصل از پدیده‌های هیدرولیز و پیرولیز با یکدیگر ترکیب شده و باعث به‌وجود آمدن عامل مخربی به نام فورفورال می‌شوند. نهایتاً مؤلفه‌های پارامتر فورفورال که شامل اکسیژن، اسید، رطوبت و گازهای CO و CO₂ هستند دوباره چرخه فرسودگی روغن و عایق کاغذی



شکل ۱: روند فرسودگی روغن و عایق کاغذی ترانسفورماتور.

نشستی جریان الکتریکی در روغن ترانسفورماتور تلقی می‌شود [۸] و [۹]. کسر جرمی بیانگر نسبت جرم یک ماده به نسبت کل جرم محلول آن ماده است. اگر مقدار رطوبت در عایق کاغذی ترانسفورماتور در کسر جرمی بیشتر از ۰٫۵ به مقدار ۱٪ افزایش یابد، مقدار خرابی عایق کاغذی ترانسفورماتور دو برابر می‌شود [۱]. توزیع آب بین روغن و عایق کاغذی ترانسفورماتور ثابت نیست و با سیکل حرارتی که در طول کار ترانسفورماتور اتفاق می‌افتد تغییر می‌کند [۱۰].

اسید موجود در روغن، خاصیت عایقی کاغذ سیم‌پیچ را از بین برده و روند اکسیداسیون موجود در روغن را افزایش می‌دهد. همچنین در صورت وجود رطوبت، باعث زنگ‌زدگی آهن در ترانسفورماتور می‌شود [۱۱] و [۱۲].

شاخص سلامت، ابزاری کاربردی است که نتایج عملکرد، بازرسی‌های میدانی و آزمایشگاهی را با هم ترکیب می‌کند [۱۳]. ترکیب این نتایج به یک شاخص کمی و هدفمند تبدیل می‌شود که شرایط ترانسفورماتور را ارزیابی می‌کند [۱۴] و [۱۵]. روش‌های متعددی برای تعیین شاخص سلامت ترانسفورماتور ارائه شده است [۱۶] و [۱۷]. در [۱۸] شاخص سلامت برای هر یک از گازهای محلول در روغن و پارامترهای الکتریکی، فیزیکی و شیمیایی روغن با استفاده از ضرایب وزنی و رتبه مقدار هر کدام از پارامترها محاسبه می‌شود و با استفاده از گازهای احتراق‌پذیر محلول در روغن ترانسفورماتور و مؤلفه فورفورال جهت تعیین خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور، وضعیت ترانسفورماتور ارزیابی می‌شود. شاخص سلامت می‌تواند از روی پارامترهایی نظیر شرایط کنتاکت‌های تپ چنجر، کیفیت روغن تپ چنجر، شرایط بوشینگ‌ها، آنالیز پاسخ فرکانسی سیم‌پیچ‌ها، وضعیت خنک‌کنندگی ترانسفورماتور، شاخص‌های DGA^۱ و کیفیت روغن، داده‌های جریان الکتریکی و مقاومت سیم‌پیچ‌ها محاسبه شود [۱۹]. در [۲۰] از ضرایب وزنی و رتبه‌ها برای محاسبه شاخص DGA و کیفیت روغن و همچنین از مؤلفه فورفورال جهت تعیین شاخص سلامت عایق کاغذی ترانسفورماتور استفاده می‌شود. شاخص DGA بیانگر گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور است که در اثر خطا و افزایش دما در روغن تولید می‌شوند. روابط مختلفی جهت تعیین شاخص سلامت ترانسفورماتور ارائه شده است [۲۱]. در [۲۲] از ضرایب وزنی و رتبه‌های

رگرسیون مرکب^۷

$$Y = ab_1^X \quad (۷)$$

رگرسیون لجستیک^۸ (مقدار حد بالا)

$$Y = \frac{1}{\frac{1}{u} + ab_1^X} \quad (۸)$$

رگرسیون رشد^۹

$$Y = e^{a+bX} \quad (۹)$$

رگرسیون نمایی^{۱۰}

$$Y = ae^{bX} \quad (۱۰)$$

رگرسیون منحنی^{۱۱}

$$Y = e^{a+\frac{b}{X}} \quad (۱۱)$$

در (۱) تا (۱۱)، متغیرهای X تا X^n نقش متغیرهای مستقل^{۱۲} را دارند. از طرفی متغیر Y نیز متغیر وابسته^{۱۳} است. به عنوان مثال اگر مؤلفه رطوبت در روغن ترانسفورماتور، متغیر مستقل و مؤلفه اسیدیته، متغیر وابسته باشد، هدف از رگرسیون تخمین منحنی آن است که با تغییر ppm^{۱۴} از مؤلفه رطوبت (متغیر مستقل)، مؤلفه اسید (متغیر وابسته) چند ppm تغییر کند. مقدار این تغییرات نیز توسط ضریب تشخیص^{۱۴} مشخص می‌شود. ضرایب b_1 تا b_n نیز ضرایب مدل رگرسیونی برای متغیرهای متناظر محسوب می‌شوند. البته منظور از پارامتر a ، مقدار ثابت بدون در نظر گرفتن هر یک از متغیرهای مستقل است. به عبارتی با داشتن داده‌های عددی بعضی از متغیرها به عنوان متغیر مستقل و وابسته و همچنین استفاده از رگرسیون تخمین منحنی می‌توان رابطه ریاضی بین متغیرهای مستقل و وابسته را به دست آورد.

۳- نتایج شبیه‌سازی

داده‌های ۱۲۰ عدد ترانسفورماتور که شامل گازهای محلول در روغن، تست‌های کیفیت روغن و شاخص سلامت ترانسفورماتور هستند برای تعیین تغییرات پارامترها در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این داده‌ها مربوط به ترانسفورماتورهای صناعی مانند سیمان آباده، نیروگاه خلیج فارس، پتروشیمی خلیج فارس، فولاد هرمزگان، تایلر صبا، نفت پارس و ترانسفورماتورهای صنعت آب و برق هستند. تغییر شاخص سلامت ترانسفورماتور نسبت به همه گازهای محلول در روغن، تغییر شاخص سلامت ترانسفورماتور نسبت به همه پارامترهای کیفیت روغن یا تغییر پارامترهای کیفیت روغن نسبت به هم (مانند تغییرات مؤلفه فورفورال نسبت به مؤلفه رطوبت)، حدود ۵۰ مورد است که توسط نرم‌افزار آماری SPSS شبیه‌سازی شده و بهترین نتایج آنها انتخاب و در این مقاله درج گردیده است. برای این ۵۰ مورد از تغییرات پارامترهای ترانسفورماتور

ترانسفورماتور را به صورت مجدد تکرار می‌کنند. برخی از دستاوردهای این مقاله عبارتند از (۱) معرفی رطوبت به عنوان پارامتری که بیشترین نقش را در کاهش ولتاژ شکست روغن دی‌الکتریک و شاخص سلامت ترانسفورماتور دارد. (۲) تعیین رابطه معکوس بین مؤلفه اسید و مؤلفه فورفورال که با رسم منحنی بین این دو متغیر مشخص می‌شود که این دو متغیر منحنی شبیه به منحنی گشتاور سرعت موتور DC سری دارند. (۳) تعیین فورفورال به عنوان پارامتری که بیشترین نقش را در کاهش کشش سطحی (به هم پیوستگی مولکول‌ها) روغن دارد. (۴) تعیین گاز CO به عنوان گازی که بیشترین نقش را در تولید مؤلفه فورفورال دارد. (۵) تعیین گاز C_2H_2 به عنوان گازی که بیشترین نقش را در تولید مؤلفه اسید دارد.

۲- روش رگرسیون تخمین منحنی

تحلیل رگرسیون به صورت گسترده برای پیش‌بینی و همچنین برای شناخت ارتباط میان متغیر مستقل و وابسته و شکل این روابط استفاده می‌شود. در مدل‌های آماری، تحلیل رگرسیون، یک فرایند آماری برای تخمین روابط بین متغیرها است. این روش شامل تکنیک‌های زیادی برای مدل‌سازی و تحلیل متغیرهای خاص و منحصربه‌فرد با تمرکز بر رابطه بین متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل می‌باشد. این تحلیل بیان می‌کند که چگونه مقدار متغیر وابسته با تغییر هر کدام از متغیرهای مستقل و با ثابت‌بودن دیگر متغیرهای مستقل تغییر می‌کند. بیشترین کاربرد تحلیل رگرسیون، تخمین امید ریاضی شرطی متغیر وابسته از متغیرهای مستقل معین است که معادل مقدار متوسط متغیر وابسته است، وقتی که متغیرهای مستقل ثابت هستند. هدف تخمین در همه موارد، یک تابع از متغیرهای مستقل است که تابع رگرسیون نامیده می‌شود [۳۴]. رگرسیون تخمین منحنی شامل ۱۱ نوع رگرسیون است که در زیر به آنها اشاره شده و باید بهترین مدل رگرسیونی که با داده‌ها برازش دارد انتخاب شود [۳۵].

رگرسیون خطی^۱

$$Y = a + bX \quad (۱)$$

رگرسیون لگاریتمی^۲

$$Y = a + b \ln X \quad (۲)$$

رگرسیون معکوس^۳

$$Y = a + \frac{b}{X} \quad (۳)$$

رگرسیون سهمی^۴

$$Y = a + b_1X + b_2X^2 \quad (۴)$$

رگرسیون درجه ۳^۵

$$Y = a + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 \quad (۵)$$

رگرسیون توانی^۶

$$Y = aX^b \quad (۶)$$

7. Compound

8. Logistic

9. Growth

10. Exponential

11. S-Curve

12. Independent Variable

13. Dependent Variable

14. R-Square

1. Linear

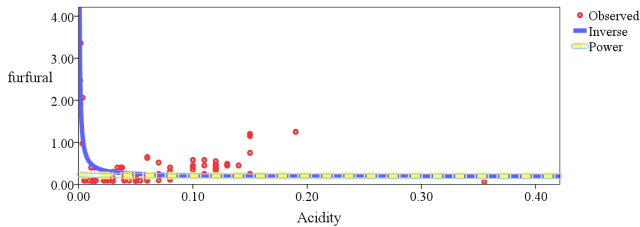
2. Logarithmic

3. Inverse

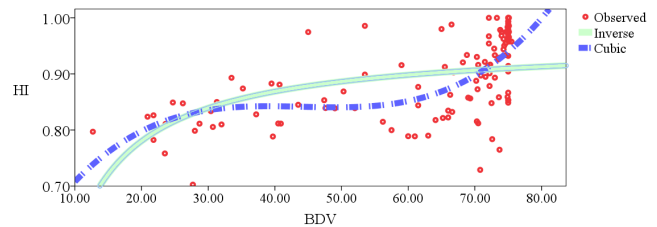
4. Quadratic

5. Cubic

6. Power



شکل ۱: تغییرات مؤلفه فورفورال در اثر تغییرات مؤلفه اسید در روغن ترانسفورماتور.



شکل ۲: تغییرات شاخص سلامت نسبت به ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور.

جدول ۱: تغییرات شاخص سلامت نسبت به ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور.

Dependent variable: HI

Equation	Model Summary					Parameter Estimates			
	R-Square	F	df ₁	df ₂	Sig	Constant	b ₁	b ₂	b ₃
Inverse	۰٫۲۵۱	۳۹٫۵۸۵	۱	۱۱۸	۰	۰٫۹۵۷	-۳٫۵۳۶	-	-
Cubic	۰٫۴۱۳	۲۷٫۲۱۶	۳	۱۱۶	۰	۰٫۵۴۴	۰٫۰۲۱	۰	۰٫۰۰۰۰۰۳۶۲

Independent variable: BDV

جدول ۲: تغییرات مؤلفه فورفورال در اثر تغییرات مؤلفه اسید در روغن ترانسفورماتور.

Dependent variable: Furfural

Equation	Model Summary					Parameter Estimates	
	R-Square	F	df ₁	df ₂	Sig	Constant	b ₁
Inverse	۰٫۵۶۹	۱۵۵٫۸۶۴	۱	۱۱۸	۰	۰٫۱۸۳	۰٫۰۰۳
Power	۰٫۰۰۱	۰٫۱۳۶	۱	۱۱۸	۰٫۷۱۳	۰٫۱۸۹	-۰٫۰۳۱

Independent variable: Acidity

شکل ۲ تغییرات شاخص سلامت ترانسفورماتور را نسبت به دو رگرسیون معکوس و درجه ۳ نشان می‌دهد. بر اساس رگرسیون درجه ۳، هرچه ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور بالاتر باشد شاخص سلامت ترانسفورماتور نیز بالاتر است. رگرسیون معکوس نیز بیانگر آن است که با کاهش ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور، شاخص سلامت ترانسفورماتور کاهش می‌یابد.

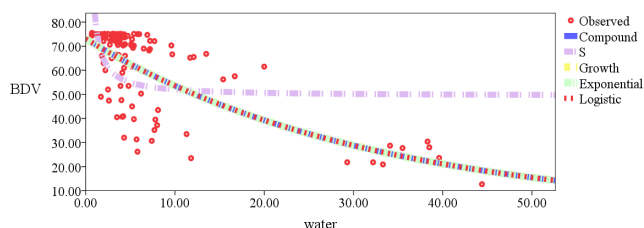
ولتاژ شکست روغن، یکی از پارامترهای الکتریکی روغن ترانسفورماتور و نشان‌دهنده میزان تحمل تنش‌هایی مانند قوس الکتریکی است. با فرسودگی روغن ترانسفورماتور، تدریجاً ذرات رسانا در روغن افزایش پیدا کرده و در صورت وقوع اتصال حلقه یا قوس الکتریکی، مسیرهایی برای عبور جریان ناشی در روغن ترانسفورماتور ایجاد می‌شود.

در جدول ۲ مؤلفه اسید به عنوان متغیر مستقل و مؤلفه فورفورال به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده است. بیشترین ضریب تشخیص مربوط به رگرسیون معکوس و کمترین ضریب مربوط به رگرسیون توان می‌باشد. همچنین مؤلفه فورفورال که در اثر فرسودگی عایق کاغذی ترانسفورماتور به وجود می‌آید با مؤلفه اسید در روغن ترانسفورماتور رابطه معکوس دارد؛ به این صورت که با افزایش ۱ ppm مؤلفه اسید در روغن ترانسفورماتور، مؤلفه فورفورال به اندازه ۰٫۵۶۹ ppm کاهش می‌یابد.

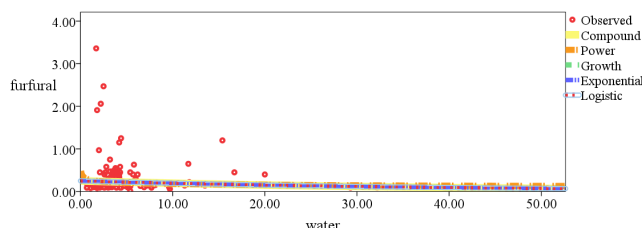
مرجع [۳۳] اکسیژن و اکسیداسیون روغن را عامل اصلی تولید اسید در روغن ترانسفورماتور برشمرده و اکسیژن، هیدرولیز (تجزیه به وسیله آب) و پیرولیز (تجزیه در اثر حرارت) را سه عامل فرسودگی عایق کاغذی ترانسفورماتور و تولید مؤلفه فورفورال معرفی می‌کند. در شکل ۳ به خوبی رابطه معکوس بین دو متغیر اسید و فورفورال دیده می‌شود. با افزایش مؤلفه اسید در روغن ترانسفورماتور، مؤلفه فورفورال کاهش پیدا می‌کند. البته در شکل ۳ منحنی رگرسیون معکوس بین مؤلفه‌های اسید و فورفورال شبیه منحنی گشتاور سرعت موتور DC سری است.

اعم از گازهای محلول در روغن، پارامترهای الکتریکی، فیزیکی و شیمیایی روغن با هم و همچنین با شاخص سلامت ترانسفورماتور توسط رگرسیون‌های تخمین منحنی دسته‌بندی شده‌اند که بهترین نتایج آنها در جداول ادامه مقاله آمده است. در این جداول R-Square، ضریب تعیین (تشخیص) درصدی از داده‌هایی را که نزدیک خط بهترین برازش قرار گرفته‌اند بیان می‌کند. به عبارتی به ازای یک واحد تغییر در متغیر مستقل، متغیر وابسته به اندازه R-Square تغییر می‌کند. همچنین پارامتر F ، توزیع آماری و df_1 و df_2 درجه آزادی است که مفهومی آماری می‌باشد و به حداکثر حق انتخاب تغییر ارزش‌های متغیرها در یک داده نمونه اشاره می‌کند؛ در واقع این مفهوم به میزان حق انتخاب اشاره دارد. پارامتر Sig ، ستون معناداری آماری مدل تحلیل رگرسیون را نشان می‌دهد که چنانچه میزان به‌دست‌آمده کمتر از ۰٫۰۵ باشد نتیجه می‌گیریم که مدل به‌کاررفته، پیش‌بینی‌کننده خوبی برای متغیر وابسته است. مهم‌ترین پارامتری که در رگرسیون تخمین منحنی، وابستگی بین دو متغیر را تعیین می‌کند ضریب تشخیص می‌باشد.

در جدول ۱ نشان داده شده که بیشترین تغییرات شاخص سلامت ترانسفورماتور در اثر تغییر ولتاژ شکست روغن دی‌الکتریک است. این تغییر از روی ضریب تشخیص که بیانگر تغییرات بین دو متغیر مستقل و وابسته می‌باشد، مشخص می‌شود. همچنین رگرسیون معکوس، کمترین و رگرسیون درجه ۳، بیشترین مقدار ضریب تشخیص را تعیین می‌کند. به عبارتی ضریب تشخیص رگرسیون درجه ۳ بیان می‌کند که اگر ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور (متغیر مستقل) به اندازه ۱ kV تغییر کند، شاخص سلامت ترانسفورماتور (متغیر وابسته) به اندازه ۰٫۳۱۴ مقدار کیفیت اولیه ترانسفورماتور تغییر می‌کند. در اثر وجود ذراتی مانند براده فلز، ناخالصی‌ها و رطوبت در روغن دی‌الکتریک، مقدار ولتاژ شکست و تحمل عایقی روغن دی‌الکتریک کاهش می‌یابد.



شکل ۵: تغییرات ولتاژ شکست روغن نسبت به مؤلفه رطوبت در روغن ترانسفورماتور.



شکل ۴: تغییرات مؤلفه فورفورال نسبت به مؤلفه رطوبت در روغن ترانسفورماتور.

جدول ۳: تغییرات مؤلفه فورفورال نسبت به مؤلفه رطوبت در روغن ترانسفورماتور.

Dependent variable: Furfural							
Equation	Model Summary				Parameter Estimates		
	R-Square	F	df ₁	df ₂	Sig	Constant	b ₁
Compound	۰٫۰۶۹	۸٫۶۹۱	۱	۱۱۸	۰٫۰۰۴	۰٫۲۴۹	۰٫۹۷۶
Power	۰٫۰۳۶	۴٫۴۵۱	۱	۱۱۸	۰٫۰۳۷	۰٫۲۷۷	-۰٫۱۸۹
Growth	۰٫۰۶۹	۸٫۶۹۱	۱	۱۱۸	۰٫۰۰۴	-۱٫۳۹۰	-۰٫۰۲۵
Exponential	۰٫۰۶۹	۸٫۶۹۱	۱	۱۱۸	۰٫۰۰۴	۰٫۲۴۹	-۰٫۰۲۵
Logistic	۰٫۰۶۹	۸٫۶۹۱	۱	۱۱۸	۰٫۰۰۴	۴٫۰۱۵	۱٫۰۲۵

Independent variable: Water

جدول ۴: تغییرات ولتاژ شکست روغن نسبت به مؤلفه رطوبت در روغن ترانسفورماتور.

Dependent variable: BDV							
Equation	Model Summary				Parameter Estimates		
	R-Square	F	df ₁	df ₂	Sig	Constant	b ₁
Compound	۰٫۵۸۳	۱۶۴٫۸۷۸	۱	۱۱۸	۰	۷۳٫۰۴۹	۰٫۹۶۹
S	۰٫۱۶۵	۲۳٫۳۴۳	۱	۱۱۸	۰	۳٫۸۹۷	۰٫۵۴۱
Growth	۰٫۵۸۳	۱۶۴٫۸۷۸	۱	۱۱۸	۰	۴٫۲۹۱	-۰٫۰۳۱
Exponential	۰٫۵۸۳	۱۶۴٫۸۷۸	۱	۱۱۸	۰	۷۳٫۰۴۹	-۰٫۰۳۱
Logistic	۰٫۵۸۳	۱۶۴٫۸۷۸	۱	۱۱۸	۰	۰٫۰۱۴	۱٫۰۳۲

Independent variable: Water

متغیر مستقل و ولتاژ شکست روغن به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده‌اند. بیشترین مقدار ضریب تشخیص در رگرسیون‌های نمایی، مرکب، رشد و لجستیک یکسان می‌باشند؛ به عبارتی با افزایش ۱ ppm مؤلفه رطوبت، ولتاژ شکست روغن به اندازه ۰٫۵۸۳ kV تحت تأثیر رگرسیون‌های نمایی، مرکب، رشد و لجستیک تغییر می‌کند (کاهش می‌یابد). کمترین مقدار ضریب تشخیص مربوط به رگرسیون نوع منحنی S است.

در شکل ۵ زمانی که مؤلفه رطوبت در روغن ترانسفورماتور کم باشد، ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور در بالاترین مقدار خود است و در مقابل تنش‌های الکتریکی، بیشترین تحمل را دارد. با افزایش مؤلفه رطوبت و رسانایی روغن، مسیرهایی برای عبور جریان ناشی در روغن ترانسفورماتور به وجود می‌آید، ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور کاهش یافته و در صورت وقوع خطا احتمال گسترش خطا بسیار زیاد است. می‌توان از سنسورهای رطوبت برای تعیین مقدار رطوبت در روغن استفاده کرد. همچنین با استفاده از روابط رطوبت بین روغن و عایق کاغذی، مقدار رطوبت موجود در عایق کاغذی را نیز تخمین زد [۱۰].

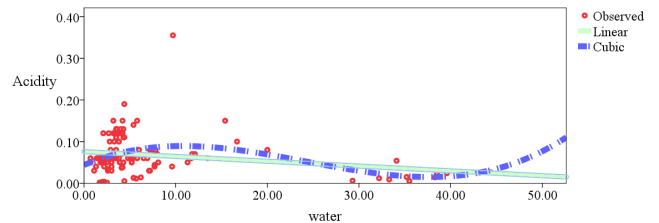
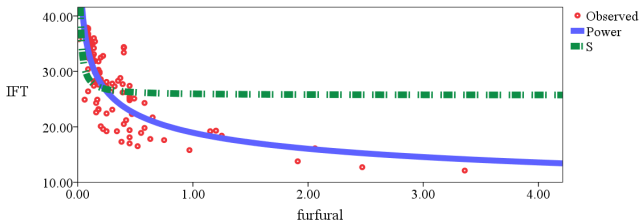
در جدول ۵ مؤلفه رطوبت متغیر مستقل و مؤلفه اسید متغیر وابسته در نظر گرفته شده‌اند. بیشترین ضریب تشخیص مربوط به رگرسیون درجه ۳ است. به عبارتی با ۱ ppm افزایش در مؤلفه رطوبت، مؤلفه اسید ppm ۰٫۱۳۴ به صورت یک رابطه درجه ۳ افزایش می‌یابد و کمترین ضریب تشخیص مربوط به رگرسیون نوع خطی است.

در جدول ۳ مؤلفه رطوبت به عنوان متغیر مستقل و مؤلفه فورفورال، متغیر وابسته در نظر گرفته شده است. ضریب تشخیص مؤلفه فورفورال نسبت به مؤلفه رطوبت در رگرسیون‌های نمایی، رشد، لجستیک و مختلط به یک اندازه است؛ به آن معنی که با تغییر ۱ ppm از مؤلفه رطوبت، مقدار ppm ۰٫۰۶۹ از مؤلفه فورفورال نسبت به رگرسیون‌های نمایی، رشد، لجستیک و مختلط تغییر می‌کند. همچنین کمترین ضریب تشخیص بین مؤلفه رطوبت و فورفورال مربوط به رگرسیون توان می‌باشد.

در شکل ۴ تغییرات مؤلفه فورفورال نسبت به مؤلفه رطوبت نشان داده شده است. علاوه بر رطوبتی که ممکن است از محیط بیرون در اثر نقص در دیافراگم به روغن ترانسفورماتور نشت پیدا کند، هیدرولیز (تجزیه در اثر آب) عایق کاغذی نیز باعث وجود رطوبت در داخل روغن ترانسفورماتور گردیده و یکی از مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده فورفورال نیز می‌باشد [۳۳].

با افزایش دما رطوبت داخل روغن ترانسفورماتور تبدیل به حباب شده و سبب خطای تخلیه جزئی و تولید گاز هیدروژن می‌شود و می‌توان از آنالیز پاسخ فرکانسی و تبدیل موجک گسسته برای تشخیص این خطا استفاده کرد [۳۶] و [۳۷]. همچنین شبکه‌های عصبی و فازی نیز در تشخیص خطا در ترانسفورماتور استفاده شده‌اند [۳۸].

متغیری که بیشترین تأثیر را بر روی ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور می‌گذارد مؤلفه رطوبت است. با افزایش این مؤلفه در روغن ترانسفورماتور، رسانایی روغن، افزایش پیدا کرده و ولتاژ قابل تحمل روغن در مقابل تنش‌های الکتریکی کاهش می‌یابد. در جدول ۴ مؤلفه رطوبت به عنوان



شکل ۵: تغییرات مؤلفه کشش سطحی روغن ترانسفورماتور نسبت به مؤلفه فورفورال.

شکل ۶: تغییرات مؤلفه اسید نسبت به مؤلفه رطوبت در روغن ترانسفورماتور.

جدول ۵: تغییرات مؤلفه اسید نسبت به مؤلفه رطوبت در روغن ترانسفورماتور.

Dependent variable: Acidity									
Equation	Model Summary					Parameter Estimates			
	R-Square	F	df ₁	df ₂	Sig	Constant	b ₁	b ₂	b ₃
Linear	۰٫۰۵۲	۶٫۴۹۵	۱	۱۱۸	۰٫۰۱۲	۰٫۰۷۶	-۰٫۰۰۱	-	-
Cubic	۰٫۱۳۴	۵٫۹۷۸	۳	۱۱۶	۰٫۰۰۱	۰٫۰۴۴	۰٫۰۰۹	۰	۰٫۰۰۰۰۰۷۶۷

Independent variable: Water

جدول ۶: تغییرات مؤلفه کشش سطحی روغن ترانسفورماتور نسبت به مؤلفه فورفورال.

Dependent variable: IFT							
Equation	Model Summary					Parameter Estimates	
	R-Square	F	df ₁	df ₂	Sig	Constant	b ₁
Power	۰٫۶۴۴	۲۱۳٫۵۰۹	۱	۱۱۸	۰	۱۸٫۹۳۷	-۰٫۲۴۰
S	۰٫۱۳۹	۱۸٫۹۸۸	۱	۱۱۸	۰	۳٫۲۴۶	۰٫۰۱۱

Independent variable: Furfural

جدول ۷: تغییرات شاخص سلامت ترانسفورماتور نسبت به گاز CO₂.

Dependent variable: HI									
Equation	Model Summary					Parameter Estimates			
	R-Square	F	df ₁	df ₂	Sig	Constant	b ₁	b ₂	b ₃
Cubic	۰٫۴۷۰	۳۴٫۳۳۴	۳	۱۱۶	۰	۰٫۹۸۳	-۰٫۰۰۰۰۳۷۹	۱٫۰۳۳×۱۰ ^{-۱۰}	۲٫۳۱۹×۱۰ ^{-۱۳}
S	۰٫۱۴۸	۲۰٫۵۲۴	۱	۱۱۸	۰	-۰٫۱۴۳	۳۷٫۲۰۲	-	-

Independent variable: CO₂

از بین رفتن کشش سطحی روغن ترانسفورماتور باعث کاهش پیوستگی مولکول‌های روغن، کاهش تبادل حرارتی در سیم‌پیچ‌ها و کاهش ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور گردیده و بارگیری از ترانسفورماتور را محدود می‌کند.

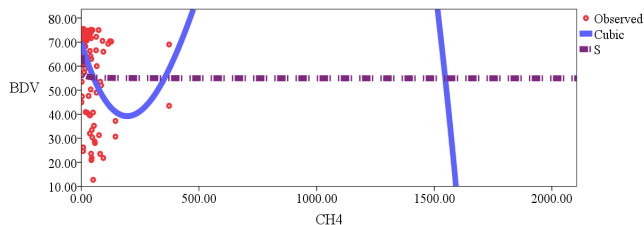
گازهایی که در اثر خطا و تنش‌های حرارتی در روغن ترانسفورماتور به وجود می‌آیند نیز بر روی شاخص سلامت ترانسفورماتور تأثیر می‌گذارند. گازی که بیشترین تأثیر را بر شاخص سلامت ترانسفورماتور می‌گذارد گاز CO₂ است که در اثر تجزیه عایق کاغذی ترانسفورماتور تولید می‌شود و این گاز را یکی از مؤلفه‌های فورفورال معرفی می‌نماید [۳۳]. در جدول ۷ بیشترین ضریب تشخیص بین شاخص سلامت ترانسفورماتور و گاز CO₂ مربوط به رگرسیون درجه ۳ است. در این جدول گاز CO₂ متغیر مستقل و شاخص سلامت ترانسفورماتور متغیر وابسته در نظر گرفته شده است. به عبارتی با تغییر ۱ ppm گاز CO₂، شاخص سلامت ترانسفورماتور به اندازه ۰٫۴۷ کیفیت اولیه کاهش می‌یابد و کمترین ضریب تشخیص مربوط به رگرسیون منحنی S می‌باشد.

در شکل ۸ نشان داده شده که زمانی که گاز CO₂ مقداری بین ۰ تا ۲۰۰۰ ppm دارد شاخص سلامت ترانسفورماتور به مقدار نهایی خود نزدیک است و به تدریج با افزایش خطا در ترانسفورماتور و تجزیه عایق

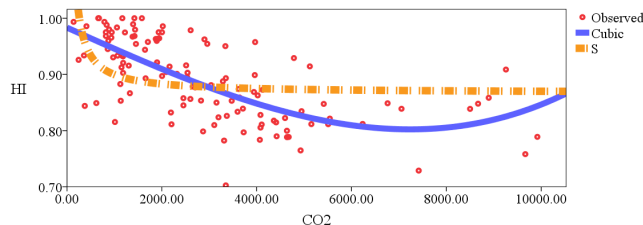
در شکل ۶ تغییرات مؤلفه اسید نسبت به مؤلفه رطوبت با دو رگرسیون درجه ۳ و خطی نشان داده شده است. در [۲۸] مؤلفه‌های رطوبت و اسید هر کدام یکی از مؤلفه‌های فورفورال هستند. مؤلفه اسید در اثر وجود اکسیژن در روغن و مؤلفه آب در اثر هیدرولیز عایق کاغذی تولید می‌شوند. بیشترین تغییرات بین این دو متغیر به صورت یک رابطه درجه ۳ است؛ اما از روی شکل ۶ تحلیل اینکه با افزایش مؤلفه رطوبت، مؤلفه اسید روند افزایشی یا کاهشی دارد مشکل است.

متغیری که بیشترین تأثیر را روی کشش سطحی روغن ترانسفورماتور می‌گذارد مربوط به مؤلفه فورفورال می‌باشد که در جدول ۶ بیشترین ضریب تشخیص مربوط به رگرسیون توان است و با ۱ ppm تغییر در مؤلفه فورفورال، کشش سطحی روغن ترانسفورماتور ۰٫۶۴۴ mN/m تغییر می‌کند و کمترین ضریب تشخیص مربوط به رگرسیون منحنی S است.

در شکل ۷ زمانی که مؤلفه فورفورال در روغن ترانسفورماتور حداقل باشد، کشش سطحی (پیوستگی مولکول‌های) روغن ترانسفورماتور حداکثر خواهد بود و با افزایش مؤلفه فورفورال، پارامتر کشش سطحی روغن ترانسفورماتور کاهش می‌یابد. فورفورال دارای مؤلفه‌هایی نظیر اکسیژن، رطوبت، اسید و گازهای CO و CO₂ می‌باشد [۳۳]. وجود این مؤلفه‌ها در روغن از جمله اسید سبب فرسودگی روغن ترانسفورماتور می‌شود.



شکل ۸: تغییرات ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور نسبت به گاز CH_۴.



شکل ۹: تغییرات شاخص سلامت ترانسفورماتور نسبت به گاز CO_۲.

جدول ۸: تغییرات ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور نسبت به گاز CH_۴.

Dependent variable: BDV									
Equation	Model Summary					Parameter Estimates			
	R-Square	F	df _۱	df _۲	Sig	Constant	b _۱	b _۲	b _۳
Cubic	۰٫۲۱۶	۱۰٫۶۵۹	۳	۱۱۶	۰	۶۹٫۸۷۸	-۰٫۳۳۵	۰٫۰۰۱	-۵٫۱۷۱×۱۰ ^{-۷}
S	۰٫۰۵۸	۷٫۲۹۹	۱	۱۱۸	۰٫۰۰۸	۴٫۰۰۶	۰٫۳۴۰	-	-

Independent variable: CH_۴

جدول ۹: تغییرات مؤلفه فورفورال نسبت به گاز CO.

Dependent variable: Furfural									
Equation	Model Summary					Parameter Estimates			
	R-Square	F	df _۱	df _۲	Sig	Constant	b _۱	b _۲	b _۳
Inverse	۰٫۰۴۷	۵٫۸۷۶	۱	۱۱۸	۰٫۰۱۷	۰٫۴۲۳	-۱۶٫۱۱۸	-	-
Cubic	۰٫۶۲۲	۶۳٫۷۱۹	۳	۱۱۶	۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	-۵٫۱۲۶×۱۰ ^{-۶}	۳٫۵۹۱×۱۰ ^{-۹}

Independent variable: CO

باشد، مؤلفه فورفورال نیز کم است. با تجزیه عایق کاغذی ترانسفورماتور در اثر حرارت و افزایش گاز CO، مؤلفه فورفورال هم در روغن ترانسفورماتور افزایش می‌یابد.

مؤلفه فورفورال از پارامترهایی است که برای تعیین درجه پلیمریزاسیون و تخمین عمر عایق کاغذی ترانسفورماتور استفاده می‌شود. رطوبت در ترانسفورماتور از طریق تجزیه عایق کاغذی در اثر حرارت، رطوبت باقیمانده در تجهیزات مانند تخته‌های چوبی که به عنوان نگهدارنده در تانک روغن ترانسفورماتور استفاده می‌شود یا رطوبتی که از محیط بیرون به مخزن روغن نشت می‌کند به وجود می‌آید. بیشترین گازی که روی مؤلفه رطوبت روغن ترانسفورماتور تأثیر می‌گذارد گاز C_۲H_۶ است. این هیدروکربن دارای بیشترین اتم هیدروژن نسبت به سایر گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور می‌باشد. با توجه به جدول بیشترین ضریب تشخیص مربوط به رگرسیون درجه ۳ با ضریب تشخیص ۰٫۲۰۷ است و بنابراین با تغییر ۱ ppm از گاز C_۲H_۶، مؤلفه رطوبت به اندازه ۰٫۲۰۷ ppm تغییر می‌کند. کمترین مقدار ضریب تشخیص مشترکاً مربوط به رگرسیون‌های مرکب، رشد، لجستیک و نمایی بوده که دارای مقدار یکسان هستند.

در شکل ۱۱ تغییرات مؤلفه رطوبت نسبت به گاز C_۲H_۶ نشان داده شده است. در این شکل زمانی که مقدار گاز C_۲H_۶ کم است مقدار مؤلفه رطوبت نیز پایین می‌باشد؛ اما تغییرات بین دو متغیر مستقل و وابسته به صورت منحنی درجه ۳ است.

درجه آزادی رگرسیون‌ها، داده‌های رطوبت بین مقادیر ۳۰ ppm تا ۴۰ ppm را انتخاب نکرده است. در صورت انتخاب مقادیر رطوبت بین ۳۰ ppm تا ۴۰ ppm، تعیین روابط بین دو متغیر گاز C_۲H_۶ و رطوبت دچار مشکل می‌شود؛ زیرا در زمان کم بودن گاز C_۲H_۶ مقدار زیادی رطوبت در روغن ترانسفورماتور به وجود می‌آید.

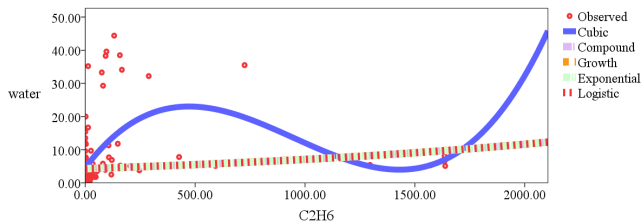
کاغذی، مقدار گاز CO_۲ افزایش و شاخص سلامت ترانسفورماتور کاهش می‌یابد. گاز CO_۲ همچنین یکی از مؤلفه‌های فورفورال نیز می‌باشد که بیانگر فرسودگی عایق کاغذی ترانسفورماتور است [۳۳].

گازی که بیشترین تأثیر را بر روی ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور دارد، CH_۴ است که در اثر خطای اضافه بار در روغن ترانسفورماتور تولید می‌شود. در جدول ۸ بیشترین ضریب تشخیص بین ولتاژ شکست روغن و گاز CH_۴ مربوط به رگرسیون نوع درجه ۳ است. در این جدول، گاز CH_۴ متغیر مستقل و ولتاژ شکست روغن متغیر وابسته می‌باشد. اگر گاز CH_۴ به اندازه ۱ ppm تغییر کند ولتاژ شکست روغن نیز به اندازه ۰٫۲۱۶ kV تغییر خواهد کرد و کمترین ضریب تشخیص مربوط به رگرسیون منحنی S است.

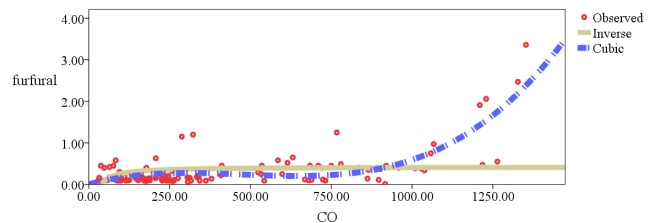
برای افزایش یا کاهش ولتاژ شکست روغن در اثر گاز CH_۴ می‌توان به شکل ۹ رجوع کرد. در این شکل زمانی که مقدار گاز CH_۴ کم است مقدار ولتاژ شکست روغن بالا می‌باشد و با افزایش مقدار گاز CH_۴ به *k* صورت، منحنی درجه ۳ ولتاژ شکست روغن کاهش می‌یابد. البته متغیرهایی مانند مؤلفه رطوبت، اسید، براده‌های فلزی و مواد تجزیه شده از عایق کاغذی باعث کاهش ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور می‌شوند.

یکی از گازهایی که در اثر تجزیه عایق کاغذی ترانسفورماتور به وجود می‌آید، گاز CO است که همچنین یکی از مؤلفه‌های فورفورال می‌باشد [۳۳]. گازی که بیشترین تأثیر را بر روی مؤلفه فورفورال می‌گذارد گاز CO است. در جدول ۹ بیشترین ضریب تشخیص بین گاز CO و مؤلفه فورفورال مربوط به رگرسیون سهمی و کمترین ضریب تشخیص مربوط به رگرسیون نوع معکوس می‌باشد. گاز CO متغیر مستقل و فورفورال متغیر وابسته در نظر گرفته شده و با ۱ ppm تغییر در گاز CO، مؤلفه فورفورال به اندازه ۰٫۶۲۲ ppm تغییر می‌کند.

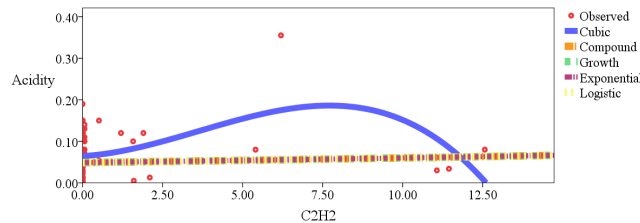
با توجه به شکل ۱۰ زمانی که گاز CO در روغن ترانسفورماتور کم



شکل ۱۱: تغییرات مؤلفه رطوبت روغن ترانسفورماتور نسبت به گاز C_۲H_۶.



شکل ۱۰: تغییرات مؤلفه فورفورال نسبت به گاز CO.



شکل ۱۲: تغییرات مؤلفه اسید در روغن ترانسفورماتور نسبت به گاز C_۲H_۲.

جدول ۱۰: تغییرات مؤلفه رطوبت روغن ترانسفورماتور نسبت به گاز C_۲H_۶.

Dependent variable: Water

Equation	Model Summary					Parameter Estimates			
	R-Square	F	df _۱	df _۲	Sig	Constant	b _۱	b _۲	b _۳
Cubic	۰٫۲۰۷	۱۰٫۱۰۸	۳	۱۱۶	۰	۴٫۵۹۱	۰٫۱۰۸۸	۰	۴٫۳۴×۱۰ ^{-۸}
Compound	۰٫۰۳۹	۴٫۷۳۴	۱	۱۱۸	۰٫۰۳۲	۴٫۲۹۲	۱	-	-
Growth	۰٫۰۳۹	۴٫۷۳۴	۱	۱۱۸	۰٫۰۳۲	۱٫۴۵۷	۰	-	-
Exponential	۰٫۰۳۹	۴٫۷۳۴	۱	۱۱۸	۰٫۰۳۲	۴٫۲۹۲	۰	-	-
Logistic	۰٫۰۳۹	۴٫۷۳۴	۱	۱۱۸	۰٫۰۳۲	۰٫۲۳۳	۱	-	-

Independent variable: C_۲H_۶

جدول ۱۱: تغییرات مؤلفه اسید در روغن ترانسفورماتور نسبت به گاز C_۲H_۲.

Dependent variable: Acidity

Equation	Model Summary					Parameter Estimates			
	R-Square	F	df _۱	df _۲	Sig	Constant	b _۱	b _۲	b _۳
Cubic	۰٫۱۱۱	۴٫۸۳۲	۳	۱۱۶	۰٫۰۰۳	۰٫۰۶۴	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵	۰
Compound	۰٫۰۰۲	۰٫۲۱۰	۱	۱۱۸	۰٫۶۴۸	۰٫۰۴۹	۱٫۰۲۱	-	-
Growth	۰٫۰۰۲	۰٫۲۱۰	۱	۱۱۸	۰٫۶۴۸	-۳٫۰۱۹	۰٫۰۲۱	-	-
Exponential	۰٫۰۰۲	۰٫۲۱۰	۱	۱۱۸	۰٫۶۴۸	۰٫۰۴۹	۰٫۰۲۱	-	-
Logistic	۰٫۰۰۲	۰٫۲۱۰	۱	۱۱۸	۰٫۶۴۸	۲۰٫۴۷۳	۰٫۹۸۰	-	-

Independent variable: C_۲H_۲

متغیر وابسته می‌باشند. بنا به رگرسیون درجه ۳ با ۱ ppm تغییر در گاز C_۲H_۲، مؤلفه اسید به اندازه ۰٫۱۱۱ ppm تغییر می‌کند.

در شکل ۱۲ تغییرات مؤلفه اسید نسبت به گاز C_۲H_۲ نشان داده شده و زمانی که مقدار گاز C_۲H_۲ کم باشد مؤلفه اسید دارای رنج ۱۰ ppm تا ۱۹ ppm است. به تدریج با افزایش گاز C_۲H_۲ مؤلفه اسید هم افزایش می‌یابد. مرجع [۳۳] اکسیژن و اکسیداسیون روغن را عامل تولید اسید در روغن ترانسفورماتور معرفی می‌کند.

در جدول ۱۲ بعضی از پارامترهای کیفیت روغن و گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور به صورت متغیر مستقل یا وابسته توسط رگرسیون تخمین منحنی و ضریب تشخیص بین آنها نشان داده شده است. نوع رگرسیون آمده در این جدول با توجه به بهترین جواب جداول قبلی استخراج شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود نوع رگرسیون در بین اکثر این پارامترها رگرسیون درجه ۳ می‌باشد. اگرچه مقدار دقیق افزایشی

اسید و همچنین بخارهای اسیدی که در بالای محفظه تانک روغن ترانسفورماتور جمع می‌شوند به ترتیب سبب خوردگی عایق کاغذی ترانسفورماتور و بدنه تانک روغن می‌شوند.

بیشترین گازی که روی مؤلفه اسید تأثیر می‌گذارد گاز C_۲H_۲ است که در اثر قوس الکتریکی در روغن ترانسفورماتور به وجود می‌آید. طبق قوانین ترمودینامیک، ازدیاد دمای ناشی از قوس الکتریکی سیم‌پیچ‌ها یا تپ چنجر توسط روغن ترانسفورماتور کاهش یافته و به دمای تعادل می‌رسد ولی کاهش دمای فلز داغ، ابتدا باعث تولید گاز C_۲H_۲ و سپس باعث کاهش کیفیت روغن و تولید اسید در روغن ترانسفورماتور می‌شود. طبق جدول ۱۱ بیشترین ضریب تشخیص بین گاز C_۲H_۲ و مؤلفه اسید مربوط به رگرسیون درجه ۳ و کمترین مقدار ضریب تشخیص مشترکاً مربوط به رگرسیون‌های مرکب، رشد، لجستیک و نمایی بوده که دارای مقدار یکسان هستند. در جدول ۱۱ گاز C_۲H_۲ متغیر مستقل و مؤلفه اسید

جدول ۱۲: نتایج به‌دست‌آمده از رگرسیون‌ها برای متغیرهای مستقل و وابسته.

Parameter (Dependent)	Parameter (Independent)	Regression Type	R-Square
Health Index (HI)	Breakdown Voltage (BDV)	Cubic	۰٫۴۱۳
BDV	Water	Compound Growth Exponential Logistic	۰٫۵۸۳
Furfural	Acidity	Inverse	۰٫۵۶۹
IFT	Furfural	Power	۰٫۶۴۴
BDV	CH _۴	Cubic	۰٫۲۱۶
HI	CO _۲	Cubic	۰٫۴۷۰
Furfural	CO	Cubic	۰٫۶۲۲
Water	C _۲ H _۶	Cubic	۰٫۲۰۷
Acidity	C _۲ H _۴	Cubic	۰٫۱۱۱
Acidity	Water	Cubic	۰٫۱۳۴

مؤلفه رطوبت روغن ترانسفورماتور می‌گذارد C_۲H_۶ می‌باشد و گازی که بیشترین تأثیر را روی مؤلفه اسیدیت می‌گذارد C_۲H_۴ است. می‌توان چنین نتیجه گرفت که فورفورال از مهم‌ترین پارامترهای روغن ترانسفورماتور است که در زمان کاهش کیفیت روغن، در روغن ترانسفورماتور مشخص می‌شود. فورفورال دارای مؤلفه‌هایی نظیر اسید، رطوبت و گازهای CO و CO_۲ است. افزایش دما به همراه رطوبت باعث پدیده هیدرولیز (تجزیه به وسیله آب) و همچنین افزایش شدید دما باعث پدیده پیرولیز (تجزیه به وسیله دما) می‌گردد و عایق کاغذی شکننده می‌شود. مؤلفه‌های حاصل از پدیده‌های هیدرولیز و پیرولیز با هم ترکیب و باعث تولید فورفورال می‌شوند. اما شایان ذکر، این موضوع است که وجود خطاهایی مانند اتصال کوتاه، قوس الکتریکی، افزایش دمای حاصل از اضافه بار و افزایش تنش‌های حرارتی باعث پدیده‌های پیرولیز، هیدرولیز، تولید رطوبت، فرسودگی روغن و عایق کاغذی ترانسفورماتور می‌شوند. با توجه به دلایل ذکرشده، رتبه‌بندی پارامترها در فرسودگی روغن، عایق کاغذی و شاخص سلامت ترانسفورماتور به صورت زیر تعیین می‌شوند که در نتیجه‌گیری مقاله هم ذکر شده است:

$$DGAF > Furfural > IFT > DF > BDV >$$

$$Acidity > Water$$

مراجع

- [1] CIGRE A2.49, *Condition Assessment of Power Transformers*, Technical Brochure CIGRE, no. 761, 2019.
- [2] N. A. Baka, A. Abu-Siada, S. Islam, and M. F. El-Naggar, "A new technique to measure interfacial tension of transformer oil using UV-Vis spectroscopy," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 2, pp. 1275-1282, Apr. 2015.
- [3] R. Soni and B. Mehta, "Diagnosis and prognosis of incipient faults and insulation status for asset management of power transformer using fuzzy logic controller & fuzzy clustering means," *Electric Power Systems Research*, vol. 220, Article ID: 109256, Jul. 2023.
- [4] W. Chen, Z. Gu, J. Zou, F. Wan, and Y. Xiang, "Analysis of furfural dissolved in transformer oil based on confocal laser Raman spectroscopy," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 2, pp. 915-921, Apr. 2016.
- [5] Q. Chen, W. Sun, S. Cheng, and G. Huang, "A review on a novel method for aging evaluation of transformer insulating paper based on methanol," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 17, no. 9, pp. 1955-1971, May 2023.
- [6] A. M. Abd-Elhady, M. E. Ibrahim, T. A. Taha, and M. A. Izzularab, "Effect of temperature on AC breakdown voltage of nanofilled transformer oil," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 138-144, Jan. 2018.
- [7] A. Maher, D. E. A. Mansour, K. Helal, and R. A. Abd El Aal, "Dissolved gas analysis and dissipation factor measurement of mineral oil-based nanofluids under thermal and electrical faults," *High Voltage*, vol. 8, no. 3, pp. 455-465, Jun. 2023.

یا کاهش ضریب تشخیص در جدول‌های نرم‌افزار آماری SPSS مشخص نیست، اما با رسم شکل رگرسیون‌ها بین متغیرهای مستقل و وابسته در این نرم‌افزار به خوبی می‌توان افزایشی یا کاهش‌ی بودن ضریب تشخیص را تعیین نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برخی از پارامترهای الکتریکی، فیزیکی و شیمیایی روغن ترانسفورماتور با گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور و معیار شاخص سلامت ترانسفورماتور با هم توسط رگرسیون‌ها دسته‌بندی شده‌اند. مثلاً شاخص سلامت ترانسفورماتور برای پارامترهای فورفورال، اسیدیت، کشش سطحی روغن، ولتاژ شکست روغن، ضریب تلفات و مؤلفه رطوبت توسط رگرسیون‌ها مقایسه شده و از بین ۵۰ مرتبه مقایسه پارامترهای کیفیت روغن، گازهای محلول در روغن و معیار شاخص سلامت ترانسفورماتور، مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده در زیر آمده است.

بیشترین تغییرات شاخص سلامت ترانسفورماتور در اثر تغییر ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور می‌باشد. در اثر وجود ذرات و ناخالصی‌ها در روغن ترانسفورماتور، مقدار ولتاژ شکست و تحمل عایقی روغن دی‌الکتریک کاهش می‌یابد.

پارامتری که بیشترین تأثیر را روی ولتاژ شکست دارد، مؤلفه رطوبت است؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین پارامتری که شاخص سلامت ترانسفورماتور را کاهش می‌دهد مؤلفه رطوبت می‌باشد که با نتایج [۳۳] مطابقت دارد. البته مؤلفه فورفورال با مؤلفه اسیدیت رابطه معکوس دارند و با افزایش اسیدیت، مقدار فورفورال کاهش می‌یابد.

بیشترین تغییرات کشش سطحی روغن ترانسفورماتور در اثر مؤلفه فورفورال است. با افزایش مؤلفه فورفورال، پیوستگی مولکول‌های روغن ترانسفورماتور کاهش یافته و کشش سطحی مولکول‌های روغن کم شده و تبادل حرارتی بین سیم‌پیچ‌ها و روغن به درستی انجام نمی‌شود.

گازی که بیشترین تأثیر را روی ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور می‌گذارد CH_۴ است. این گاز در زمانی که ترانسفورماتور تحت اضافه بار است در روغن ترانسفورماتور تولید می‌شود. گازی که بیشترین تأثیر را روی معیار شاخص سلامت ترانسفورماتور می‌گذارد CO_۲ است. این گاز در اثر تجزیه شدن عایق کاغذی ترانسفورماتور در روغن ترانسفورماتور تولید می‌شود و از مؤلفه‌های فورفورال نیز می‌باشد.

گازی که بیشترین تأثیر را روی مؤلفه فورفورال می‌گذارد CO است که در اثر تجزیه عایق کاغذی ترانسفورماتور در روغن ترانسفورماتور تولید می‌شود و از مؤلفه‌های فورفورال است. گازی که بیشترین تأثیر را روی

- [27] G. C. Jaiswal, M. S. Ballal, H. M. Surywanshi, and M. Wath, "Diagnostic approach and condition monitoring methods to boost up the reliability of transformer," in *Proc. IEEE First Int. Conf. on Smart Technologies for Power, Energy and Control, STPEC'20*, 5 pp., Nagpur, India, 25-26 Sept. 2020.
- [28] A. J. C. Trappey, C. V. Trappey, L. Ma, and J. C. M. Chang, "Intelligent engineering asset management system for power transformer maintenance decision supports under various operating conditions," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 84, pp. 3-11, Jun. 2015.
- [29] Y. Lin, L. Yang, R. Liao, W. Sun, and Y. Zhang, "Effect of oil replacement on furfural analysis and aging assessment of power transformers," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 5, pp. 2611-2619, Oct. 2015.
- [30] J. Brady, T. Dürig, P. I. Lee, and J. X. Li, *Polymer properties and characterization, Developing solid oral dosage forms*, Academic Press, pp. 181-223, 2017.
- [31] T. Nakajima, K. Kajiwara, and J. E. McIntyre, *Advanced Fiber Spinning Technology*, Woodhead Publishing, 1994.
- [32] K. Benhmed, A. Mooman, A. Younes, K. Shaban, and A. El-Hag, "Feature selection for effective health index diagnoses of power transformers," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, pp. 3223-3226, Dec. 2018.
- [33] CIGRE A2.18, *Guidelines for Life Management Techniques for Power Transformers*, Technical Brochure, no. 227, 2002.
- [34] Q. Zou, J. Zhao, and J. Wen, "Robust quantile regression analysis for probabilistic modelling of SN curves," *International J. of Fatigue*, pt. A, vol. 167, Article ID: 107326, Feb. 2023.
- [35] T. Z. Keith, *Multiple Regression and Beyond: An Introduction to Multiple Regression and Structural Equation Modeling*, 3rd Edition, New York: Routledge, 2019.
- [36] A. Bouzida, et al., "Fault diagnosis in industrial induction machines through discrete wavelet transform," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 4385-4395, Sept. 2011.
- [37] A. Abu Siada, M. Bagheri, and T. Phung, *Power Transformer Condition Monitoring and Diagnosis: Chapter 3: Frequency Response Analysis*, IET, United Kingdom, 2018.
- [38] S. A. Khan, M. D. Equbal, and T. Islam, "ANFIS based identification and location of paper insulation faults of an oil immersed transformer," in *Proc. IEEE 6th Power India Int. Conf., PIICON'14*, 6 pp., Delhi, India, 5-7 Dec. 2014.
- [8] D. Peng, D. Yang, C. Wang, and M. Li, "The influence of transformer oil aging to dielectric dissipation factor and its insulating lifetime," in *Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf.*, 4 pp., Wuhan, China, 27-31 Mar. 2009.
- [9] S. Zandbaaf, M. R. K. Khorrami, and M. G. Afshar, "Prediction of dielectric dissipation factor by ATR-FTIR spectroscopy based on multivariate calibration methods for transformer oil samples in power industry," *Infrared Physics & Technology*, vol. 128, Article ID: 104528, Jan. 2023.
- [10] CIGRE A2.30, *Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems*, Technical Brochure CIGRE, no. 349, 2008.
- [11] S. Forouhari and A. Abu-Siada, "Remnant life estimation of power transformer based on IFT and acidity number of transformer oil," in *Proc. IEEE 11th Int. Conf. on the Properties and Applications of Dielectric Materials, ICPADM'15*, pp. 552-555, Sydney, Australia, 19-22 Jul. 2015.
- [12] Y. Kittikhuntharadol, et al., "Physical and chemical properties' comparison of natural ester and palm oil used in a distribution transformer," *Energy Reports*, vol. 9, Sup. 1, pp. 549-556, Mar. 2023.
- [13] H. Zeinoddini-Meymand, S. Kamel, and B. Khan, "An efficient approach with application of linear and nonlinear models for evaluation of power transformer health index," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 150172-150186, 2021.
- [14] E. Baker, S. V. Nese, and E. Dursun, "Hybrid condition monitoring system for power transformer fault diagnosis," *Energies*, vol. 16, no. 3, Article ID: 1151, 2023.
- [15] S. Li, et al., "Review of condition monitoring and defect inspection methods for composited cable terminals," *High Voltage*, vol. 8, no. 3, pp. 431-444, Jun. 2023.
- [16] Y. Luo, et al., "Dynamic state evaluation method of power transformer based on Mahalanobis-Taguchi system and health index," *Energies*, vol. 16, no. 6, Article ID: 2765, 2023.
- [17] N. Islam, et al., "Power transformer health condition evaluation: a deep generative model aided intelligent framework," *Electric Power Systems Research*, vol. 218, Article ID: 109201, May 2023.
- [18] I. G. N. et al., "Application of health index method for transformer condition assessment," in *Proc. IEEE Region 10 Conf., TENCON'14*, 6 pp., Bangkok, Thailand, 22-25 Oct. 2014.
- [19] M. Augusta Martins, "Condition and risk assessment of power transformers: a general approach to calculate a health index," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 26, no. 1, pp. 9-16, Jan./Jun. 2014.
- [20] G. Brandtzaeg, *Health Indexing of Norwegian Power Transformers*, MS Thesis, NTNU, 2015.
- [21] A. Azmi, J. Jasni, N. Azis, and M. A. Kadir, "Evolution of transformer health index in the form of mathematical equation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 687-700, Sept. 2017.
- [22] J. I. Aizpurua, B. G. Stewart, S. D. J. Mc Arthur, B. Lambert, J. G. Cross, and V. M. Catterson, "Improved power transformer condition monitoring under uncertainty through soft computing and probabilistic health index," *Applied Soft Computing*, vol. 85, Article ID: 105530, Dec. 2019.
- [23] H. Zeinoddini-Meymand and B. Vahidi, "Health index calculation for power transformers using technical and economical parameters," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 10, no. 7, pp. 823-830, Jun. 2016.
- [24] A. Dehghani Ashkezari, H. Ma, T. K. Saha, and C. Ekanayake, "Application of fuzzy support vector machine for determining the health index of the insulation system of in-service power transformers," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 3, pp. 965-973, Jun. 2013.
- [25] R. A. Prasojo, K. Diwyacitta, Suwarno, and H. Gumilang, "Transformer paper expected life estimation using ANFIS based on oil characteristics and dissolved gases (case study: Indonesian transformers)," *Energies*, vol. 10, no. 8, Article ID: 1135, 2017.
- [26] F. R. Barbosa, et al., "Artificial neural network application in estimation of dissolved gases in insulating mineral oil from physical-chemical datas for incipient fault diagnosis," in *Proc. IEEE 15th Int. Conf. on Intelligent System Applications to Power Systems*, 5 pp., Curitiba, Brazil, 8-12 Nov. 2009.

مرتضی سعید در سال ۱۳۸۵ مدرک کاردانی خود را در رشته برق قدرت از دانشکده شهید چمران کرمان دریافت کرد و پس از انجام خدمت سربازی در سال ۱۳۸۷ در شرکت مدیریت تولید برق زرنند کرمان استخدام شد. در سال ۱۳۹۱ مدرک کارشناسی مهندسی الکترونیک خود را از دانشکده شهید چمران کرمان و در سال ۱۳۹۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت خود را از دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان دریافت نمود. وی هم‌اکنون به عنوان کارشناس بهره‌برداری در شرکت مدیریت تولید برق زرنند و کارشناس ناظر بهره‌برداری در نیروگاه مهتاب کویر زرنند مشغول فعالیت می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده‌های نو در تشخیص خطاهای داخلی و تعیین شاخص سلامت ترانسفورماتور و همچنین الکترونیک قدرت می‌باشد.

حامد زین‌الدینی میمند تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۵ از دانشگاه‌های فردوسی مشهد، صنعتی شیراز و صنعتی امیرکبیر به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مدل سازی و تحلیل سیستم قدرت، کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در مطالعات سیستم قدرت، یادگیری ماشین، هوش مصنوعی، تجزیه و تحلیل گذرای سیستم قدرت، مطالعات صاعقه و کلیدزنی، پایش وضعیت فنی- اقتصادی ترانسفورماتورهای قدرت، ارزیابی سلامت ترانسفورماتور قدرت و تشخیص خطا، تجزیه و تحلیل احتمالی سیستم‌های قدرت، بهره‌برداری از شبکه توزیع، ریزشبکه ها، منابع انرژی تجدیدپذیر، تولید پراکنده، مدیریت انرژی.