

تخمین طول عمر ترانسفورماتورهای روغنی بر مبنای درجه پلیمریزاسیون

محمد رضا آرین نیک^۱، کارشناسی ارشد؛ علی اصغر رضی کاظمی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران - mr.ariannik@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران - razi.kazemi@kntu.ac.ir

چکیده: امروزه قابلیت اطمینان سیستم قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو وضعیت ترانسفورماتورها به عنوان یکی از المان‌های حیاتی و گران‌قیمت سیستم قدرت می‌بایست پایش و ارزیابی شود. عامل غالب در محدودیت طول عمر ترانسفورماتور، عایق کاغذی آن است. در این پژوهش اثر سه پارامتر رطوبت، اکسیژن و دما که بر وضعیت عایق کاغذی تأثیرگذار هستند، بررسی شده‌اند. معیار مورد استفاده برای بررسی وضعیت عایق کاغذی، درجه پلیمریزاسیون است که به طور غیرمستقیم می‌تواند به دست آورده شود. با محاسبه دمای نقطه داغ ترانسفورماتور به صورت ساعتی و در نظر گرفتن رشد رطوبت سالیانه خطی، طول عمر ترانسفورماتور بر اساس معیار درجه پلیمریزاسیون به عنوان نمونه برای سه جفت دمای محیطی و ضریب بار تخمین زده شده است. طول عمرهای به دست آمده از این تخمین، مطابق طول عمرهای واقعی ترانسفورماتورها هستند. این تخمین طول عمر برای دو نوع کاغذ کرافت و کاغذ تقویت شده انجام شده است و همچنین مقایسه‌ای بین طول عمر این دو نوع کاغذ تحت شرایط مختلف محیطی و عملکردی ترانسفورماتور صورت پذیرفته است. در نهایت با توجه به پروفیل درجه پلیمریزاسیون به دست آمده برای عایق کاغذی ترانسفورماتور، زمان بهینه برای انجام کاهش رطوبت عایق کاغذی در قالب سه سناریوی مختلف ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ترانسفورماتور، تخمین عمر، درجه پلیمریزاسیون، عایق کاغذی.

Lifetime Estimation of Oil-Impregnated Transformers based on Degree of Polymerization

Mohamadreza Ariannik¹, M.Sc.; Ali Asghar Razi-Kazemi², Assistant professor

1- Faculty of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Email: mr.ariannik@gmail.com

2- Faculty of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Email: Razi.Kazemi@Kntu.ac.ir

Abstract: Nowadays, reliability of power system is of great importance. Therefore, the condition of transformers as the expensive and critical components of a power system have to be monitored and assessed. The dominant factor that causes limitation in transformers lifetime is the paper insulation. The influence of moisture, oxygen and temperature that affect the paper insulation have been investigated in this thesis. Degree of polymerization (DP) is the indirect measurable criterion used for assessing paper insulation. With consideration of the calculated hot-spot temperature of transformer in hourly steps along with an annual linear growth rate for the water content, the lifetime of transformer has been estimated with regards to DP criterion for three couple of ambient temperatures and load factors. The resultant lifetimes are in agreement with real lifetime of the transformers. This lifetime estimation has been conducted for Kraft paper and thermally upgraded Kraft paper and lifetime of these two paper types are compared under various operating and environmental conditions. Finally, considering the obtained DP profiles, the optimum time for implementing moisture reduction in the paper insulation has been studied and discussed in form of three scenarios.

Keywords: Transformer, life estimation, degree of polymerization, paper insulation.

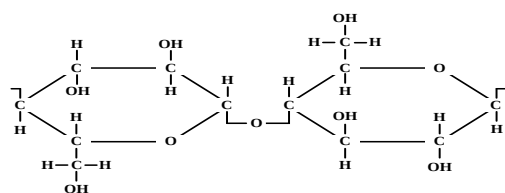
تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵

نام نویسنده مسئول: علی اصغر رضی کاظمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - سیدخندان - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق.



شکل ۱: ساختار شیمیایی یک مولکول سلولز [۱]

در محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۲۵۰ است [۲]. طبق یک معیار متداول هنگامی که درجه پلیمریزاسیون به مقدار ۲۰۰ برسد، عایق کاغذی به پایان عمر مفید خود رسیده است [۲]. هنگامی که مقدار درجه پلیمریزاسیون عایق کاغذی به این عدد برسد، معادل این است که استحکام کششی کاغذ به ۳۰٪ مقدار اولیه خود رسیده است [۲].

تاکنون چندین آزمایش تجربی برای تعیین میزان اثرگذاری هرکدام از عوامل مخرب چهارگانه اشاره شده بر وضعیت عایق کاغذی بر مبنای رابطه (۱) انجام شده اند [۱۰-۱۳]. این پژوهش‌ها در شرایط ثابت از منظر دمای نقطه داغ، میزان رطوبت و سطح اکسیژن انجام شده اند. در نهایت بر مبنای نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، یک سری منحنی تحت عنوان منحنی‌های طول عمر ارائه شده اند [۱۰-۱۳]. در صورت کاملاً ثابت بودن دمای نقطه داغ، میزان رطوبت و سطح اکسیژن، این منحنی‌ها یک تخمین را از طول عمر عایق کاغذی و در نتیجه طول عمر ترانسفورماتور در اختیار می‌گذارند؛ اما بدیهی است که شرایط کارکرد یک ترانسفورماتور در طول عمر خود، رفتار پویایی را از خود بروز می‌دهد. به این علت منحنی‌های طول عمر به دست آمده در [۱۰-۱۳] قابل استفاده برای یک ترانسفورماتور واقعی نیستند.

در این پژوهش یک مدل جامع برای تخمین طول عمر یک ترانسفورماتور روغنی بر مبنای ارزیابی درجه پلیمریزاسیون ارائه می‌شود. در این مدل جامع، با استفاده از داده‌های دمای محیطی و ضریب بار ترانسفورماتور، دمای نقطه داغ آن در بازه‌های ساعتی محاسبه می‌شود. همچنین رطوبت متغیر و فزاینده عایق کاغذی نیز در این مدل دخیل می‌گردد. با توجه به سطوح از پیش تعیین شده برای اکسیژن، اثرات تغییرات اکسیژن نیز در مدل در نظر گرفته می‌شوند. خروجی نهایی این پژوهش شامل یک پروفیل درجه پلیمریزاسیون برای ترانسفورماتور است که می‌تواند برای تخمین طول عمر باقی مانده ترانسفورماتور و همچنین تعیین زمان بهینه برای انجام کاهش رطوبت در عایق کاغذی استفاده شود. در نتیجه نوآوری این مقاله شامل ارائه یک مدل جامع برای تخمین طول عمر ترانسفورماتور است که می‌تواند برای هر ترانسفورماتور روغنی به شرط در دسترس بودن داده‌های دمای محیطی و ضریب بار به کار رود.

۲ - مدل سازی فرایند پیری عایق کاغذی

برای ایجاد یک مدل پویا که در آن تغییرات پارامترهای دخیل در پیری عایق کاغذی در نظر گرفته شوند، شکل بازگشتی رابطه (۱) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]:

۱- مقدمه

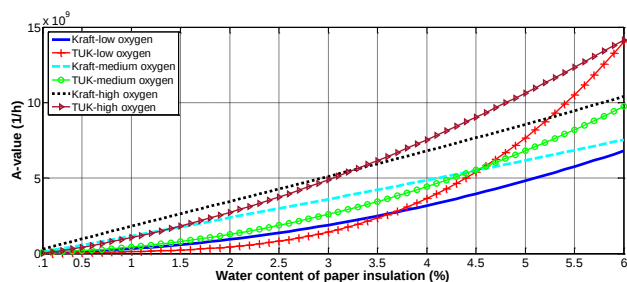
ترانسفورماتورها از اجزای بالارزش و حیاتی یک سیستم قدرت به شمار می‌روند. از این رو، پایش وضعیت و تخمین طول عمر آن‌ها از اهمیت به سزایی برخوردار است. طول عمر یک ترانسفورماتور را در واقع طول عمر عایق بندی آن تعیین می‌کند. عایق‌های موجود در داخل ترانسفورماتور به دودسته عایق روغنی و عایق کاغذی تقسیم می‌شوند. در صورتی که عایق روغنی دچار مشکل شود، می‌توان آن را تصفیه و یا حتی تعویض نمود؛ اما از آنجاکه دسترسی به عایق کاغذی دشوار است، ترمیم و یا تعویض عایق کاغذی گزینه مناسبی به شمار نمی‌رود. در نتیجه عامل محدودکننده در طول عمر یک ترانسفورماتور، طول عمر عایق کاغذی آن است. از این رو در این مقاله سعی می‌شود که طول عمر عایق کاغذی ترانسفورماتور و به تبع آن طول عمر ترانسفورماتور تخمین زده شود.

عایق کاغذی ترانسفورماتور از مولکول‌های سلولز تشکیل شده است. شمای یک مولکول سلولز در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. هر مولکول سلولز از زنجیره درازی از حلقه‌های گلوکز تشکیل شده است. متوسط تعداد حلقه‌های گلوکز در یک مولکول سلولز، درجه پلیمریزاسیون نامیده می‌شود [۱]. اثبات شده است که چهار عامل دما، رطوبت، اسیدهای با وزن مولکولی کم و اکسیداسیون باعث تخریب عایق کاغذی می‌شوند [۱، ۲]. این عوامل باعث گسستگی حلقه‌های گلوکز و همچنین شکستن پیوندهای میان حلقه‌های گلوکز می‌شوند. این امر در نهایت منجر به کاهش استقامت عایق کاغذی و زوال آن و همچنین کاهش مقدار درجه پلیمریزاسیون می‌شود.

تاکنون در چند پژوهش نشان داده شده است که برخی از محصولات تولید شده ناشی از زوال عایق کاغذی و یا عایق روغنی می‌توانند برای تعیین وضعیت عایق کاغذی به کار روند. از جمله این محصولات می‌توان به متانول [۳، ۴] و ۲-فورفورال [۵] اشاره کرد. همچنین گازهای محلول در روغن نیز می‌توانند برای این تعیین وضعیت به کار روند [۶-۹] اما در این مقاله به ارزیابی وضعیت عایق کاغذی بر مبنای سرعت واکنش‌های شیمیایی پرداخته می‌شود؛ زیرا این روش تمامی عوامل تأثیرگذار در پیری عایق کاغذی را در بر می‌گیرد و همچنین برای هر ترانسفورماتور روغنی قابل استفاده است. امسلی و استیونز [۱۰] رابطه زیر را که بر مبنای سرعت واکنش‌های شیمیایی است، برای محاسبه مقدار درجه پلیمریزاسیون ارائه داده اند:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = A \times e^{-\frac{E_a}{RT}} \times t \quad (1)$$

که در آن DP_t و DP_0 به ترتیب برابر مقدار درجه پلیمریزاسیون در زمان اولیه و بعد از زمان t هستند. A یک مقدار ثابت بر حسب h^{-1} و وابسته به شرایط محیطی (اکسیژن و رطوبت) است. E_a انرژی فعال سازی بر حسب J/mol و R ثابت گازها $(8.314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$ است. t زمان سپری شده بر حسب h و T دمای نقطه داغ ترانسفورماتور بر حسب K است. برای یک ترانسفورماتور نو، مقدار درجه پلیمریزاسیون



شکل ۲: ضریب A برای کاغذ کرافت و کاغذ کرافت تقویت شده در سه سطح اکسیژن برحسب $E_a = 111 \text{ kJ/mol}$

جدول ۱: مقدار ضریب A به صورت تابعی از رطوبت کاغذ برحسب درصد (m)

بر مبنای $E_a = 111 \text{ kJ/mol}$ به فرم $A = am^3 + bm^2 + cm + d$

د	c	b	a	سطح اکسیژن	نوع کاغذ
$5/3E+7$	$1/0E+8$	$1/7E+8$	$1/0E+5$	کم	کرافت
$-2/9E+7$	$1/2E+9$	$-3/6E+6$	$2/3E+6$	متوسط	کرافت
$1/3E+8$	$1/7E+9$	$-2/9E+7$	$5/2E+6$	زیاد	کرافت
$-6/2E+7$	$3/2E+8$	$-2/2E+8$	$9/3E+7$	کم	کرافت تقویت شده
$5/6E+7$	$1/5E+8$	$2/2E+8$	$4/0E+6$	متوسط	کرافت تقویت شده
$-7/9E+7$	$8/6E+8$	$2/8E+8$	$-4/7E+6$	زیاد	کرافت تقویت شده

حسگری مجهز نیستند، یک روش جایگزین می‌بایست ارائه شود. نتایج یک تحقیق میدانی نشان داده‌اند که نرخ سالانه افزایش رطوبت در عایق کاغذی برای ترانسفورماتورهای با نوع تنفس آزاد تا ۰/۲٪ و برای ترانسفورماتورهای با محفظه بسته بین ۰/۳٪ تا ۰/۶٪ است [۱۶]. بر این مبناء، در این پژوهش رشد رطوبت عایق کاغذی به صورت خطی در طی طول عمر ترانسفورماتور در نظر گرفته می‌شود و مقدار این رشد رطوبت سالانه مطابق مقادیر فوق‌الذکر است. در نتیجه با توجه به توابع ذکر شده در جدول ۱، مقدار ضریب A در هر تکرار از رابطه (۲) دسترس خواهد بود.

۴-۲ دمای نقطه داغ

برای این‌که بتوان دمای نقطه داغ ترانسفورماتور را در هر تکرار از رابطه (۲) به دست آورد، نیاز به یک مدل دینامیک است. این مدل باید بتواند تأثیرات دمای محیطی و ضریب بار را در دمای نقطه داغ لحاظ کند. برای این منظور از مدل ارائه شده در استاندارد IEC ۶۰۰۷۶-۷ [۱۷] استفاده شده است. در این مدل برای راحتی محاسبات، معادلات دیفرانسیل مربوطه به شکل معادلات تفاضلی تبدیل شده‌اند. برای این‌که این تبدیل از دقت محاسباتی قابل قبولی برخوردار باشد، لازم است که بازه زمانی مربوط به هر محاسبه بزرگ‌تر از نصف کوچک‌ترین ثابت زمانی موجود در مدل نباشد. از آنجاکه کوچک‌ترین ثابت زمانی موجود در مدل برابر ۲ دقیقه است، بازه زمانی در نظر گرفته شده برای

$$\frac{1}{DP_{(n)}} - \frac{1}{DP_{(n-1)}} = A_{(n-1)} e^{-\frac{E_a(n-1)}{RT_{(n-1)}}} \times (t_{(n)} - t_{(n-1)}) \quad (2)$$

که در این رابطه n بیانگر مرتبه تکرار است. در این پژوهش مقادیر اولیه و نهایی درجه پلیمریزاسیون به ترتیب برابر ۱۰۰۰ و ۲۰۰ در نظر گرفته شده‌اند [۲]. همچنین مقادیر پارامترها به صورت ساعتی به روز می‌شوند و این تکرار ساعتی تا جایی ادامه پیدا می‌کند که مقدار درجه پلیمریزاسیون به حد ۲۰۰ برسد. مجموع زمان‌های این تکرارهای ساعتی طول عمر ترانسفورماتور را در اختیار می‌گذارد. در ادامه به نحوه به دست آوردن پارامترهای مربوطه برای هر تکرار پرداخته می‌شود.

۲ محاسبه ضرایب A و E

اگر K به عنوان سرعت واکنش به صورت زیر تعریف شود [۱۰]:

$$K = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

آنگاه با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\ln(K) = \ln(A) + \frac{-E_a}{RT} \quad (4)$$

حال با رسم $\ln(K)$ در برابر $1/T$ یک خط مستقیم به دست خواهد آمد که شیب آن برابر $-E_a/R$ و عرض از مبدأ آن نیز $\ln(A)$ خواهد بود. تاکنون چندین آزمایش عملی برای محاسبه ضرایب E_a و A با استفاده از رابطه (۴) انجام شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به نتایج ارائه شده در [۱۰-۱۳] اشاره کرد. نتایج این آزمایش‌ها با تقریب قابل قبولی مشابه یکدیگر هستند. در این مقاله، نتایج مطرح شده در [۱۲، ۱۳] به دلیل دقیق‌تر بودن از منظر پایش منظم مقدار رطوبت در طول آزمایش و همچنین ارائه داده‌ها برای سه سطح اکسیژنی متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سه سطح اکسیژن برای روغن ترانسفورماتور عبارت‌اند از سطح اکسیژن کم (کمتر از ۶۰۰ ppm)، سطح اکسیژن متوسط (بین ۷۰۰ تا ۱۴۰۰ ppm) و سطح اکسیژن زیاد (بین ۱۶۵۰۰ تا ۲۵۰۰۰ ppm). در نتایج ارائه شده در [۱۲، ۱۳] برای ضریب A، مقدار E_a برابر ۱۱۱ kJ/mol است.

در شکل ۲ داده‌های مربوط به ضرایب A برای کاغذ کرافت و کاغذ کرافت تقویت شده حرارتی و در سه سطح اکسیژن نشان داده شده‌اند. برای استفاده از داده‌های موجود در شکل ۲، شش تابع درجه سه ایجاد شده‌اند تا بتوان ضریب A مربوطه را در هر تکرار از رابطه ۲ به دست آورد. این توابع در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

با توجه به جدول ۱، برای تعیین مقدار ضریب A، مقدار رطوبت و سطح اکسیژن می‌بایست معلوم باشند. یک روش دقیق برای به دست آوردن محتوای رطوبت عایق کاغذی، نصب حسگر خازنی در نزدیکی نقطه داغ ترانسفورماتور است. این حسگر میزان رطوبت نسبت به سطح اشباع عایق روغنی را در اختیار می‌گذارد [۱۵]. سپس با استفاده از منحنی‌های تعادل نشان داده شده در [۱۵]، میزان رطوبت عایق کاغذی به دست می‌آید. از آنجاکه اکثر ترانسفورماتورها به چنین

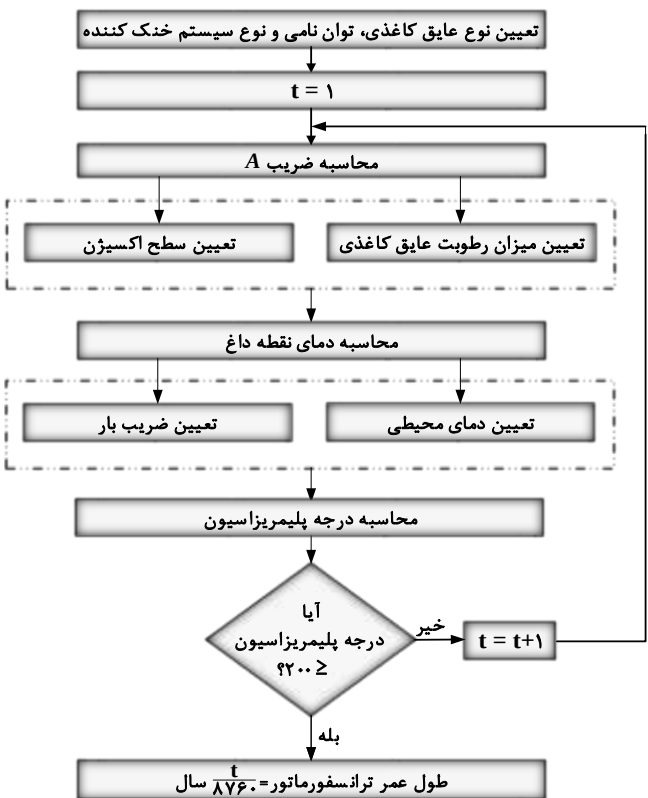
θ_o دمای روغن بالای تانک تحت بار موردنظر ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_{hr}$ اختلاف دمای نقطه داغ و روغن بالای تانک در بار نامی (K)
 y توان سیم‌پیچی
 $\Delta\theta_{or}$ افزایش دمای روغن بالای تانک در شرایط پایدار (K)
 R نسبت تلفات بار به تلفات بی‌باری در جریان نامی
 x توان سیم‌پیچی
 k_{21}, k_{22} و k_{11} ثابت‌های مدل حرارتی
 τ_o ثابت زمانی متوسط روغن (min)
 τ_w ثابت زمانی سیم‌پیچی (min)
 $\Delta\theta_h$ اختلاف دمای نقطه داغ و روغن بالای تانک تحت بار موردنظر (K)
 $\Delta\theta_o$ افزایش دمای روغن بالای تانک تحت بار موردنظر (K)
 θ_h دمای نقطه داغ ($^{\circ}\text{C}$)
 در شکل ۳ مراحل تخمین طول عمر ترانسفورماتور با استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله به‌صورت فلوچارت نشان داده‌شده‌اند.

۳- مقایسه اثرات دما، رطوبت و اکسیژن

تخمین عمر تحت شرایط ثابت، یک دید کلی از اثرات پارامترهای مختلف بر روی طول عمر ترانسفورماتور در اختیار می‌گذارد. منظور از شرایط ثابت، ثابت بودن پارامترهای دمای نقطه داغ، میزان رطوبت و سطح اکسیژن در طول عمر ترانسفورماتور است. همچنین با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده، می‌توان اثر مخرب این سه پارامتر را با یکدیگر مقایسه نمود. لازم به‌ذکر است که محاسبات و شبیه‌سازی‌های ارائه‌شده در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده‌اند.

در شکل‌های ۴ و ۵ طول عمر ترانسفورماتور تحت شرایط ثابت مختلف به‌ترتیب برای کاغذ کرافت و کاغذ کرافت تقویت‌شده نشان داده‌شده است. هر نقطه روی این منحنی‌ها بیانگر طول عمر تحت یک‌میزان دمای نقطه داغ، سطح رطوبت مشخص و میزان اکسیژن مشخص است که با استفاده از رابطه (۲) به‌دست‌آمده است. برای در نظر گرفتن سطوح اکسیژن (کم، متوسط و زیاد)، در هرکدام از شکل‌های ۴ و ۵، یک منحنی برای هر سطح اکسیژن اختصاص داده‌شده است و منحنی‌ها بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. انتخاب بازه دمایی 50°C تا 140°C و بازه رطوبتی 0.5% تا 5% به این دلیل بوده است که نقطه کار اکثر ترانسفورماتورها در این محدوده‌ها قرار دارد [۱۳-۱۰].

اولین نکته‌ای که با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ به چشم می‌آید، طول عمر زیاد در شرایط با سطح اکسیژن کم نسبت به سایر سطوح اکسیژنی است. در نتیجه همان‌طور که در مرحله ساخت ترانسفورماتور سعی می‌شود تا رطوبت عایق کاغذی قبل از استفاده کاهش یابد، برای کاهش اکسیژن موجود در روغن ترانسفورماتور و فضای تانک آن نیز می‌بایست اقدام نمود. به‌عبارت‌دیگر اگر تانک ترانسفورماتور از نوع محفظه بسته باشد، طول عمر آن به میزان زیادی افزایش خواهد یافت. همچنین مشاهده می‌شود که تفاوت طول عمر بین سطوح اکسیژن



شکل ۳: فلوچارت مراحل تخمین طول عمر ترانسفورماتور

انجام محاسبات دمای نقطه داغ برابر ۱ دقیقه در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که داده‌های دمای محیطی و ضریب بار به‌صورت ساعتی در دسترس هستند، برای تمام ۶۰ دقیقه از طول ۱ ساعت، همان داده مربوط به ساعت متناظر در نظر گرفته شده است.

پارامترهای ورودی معادلات تفاضلی شامل دمای محیطی ترانسفورماتور، ضریب بار، توان نامی و نوع سیستم خنک‌کننده ترانسفورماتور هستند. مقادیر موردنیاز برای ثابت‌های موجود در مدل نیز در [۱۷] موجود هستند. معادلات تفاضلی به‌صورت زیر هستند:

$$D\theta_o = \frac{Dt}{k_{11}\tau_o} \left(\left(\frac{1+K^2R}{1+R} \right)^x (\Delta\theta_{or}) - (\theta_o - \theta_a) \right) \quad (5)$$

$$\theta_{o(n)} = \theta_{o(n-1)} + D\theta_{o(n)} \quad (6)$$

$$D\Delta\theta_{h1} = \frac{Dt}{k_{21}\tau_w} (k_{21} \times \Delta\theta_{hr} K^y - \Delta\theta_{h1}) \quad (7)$$

$$D\Delta\theta_{h2} = \frac{Dt}{(1/k_{22})\tau_w} ((k_{22}-1) \times \Delta\theta_{hr} K^y - \Delta\theta_{h2}) \quad (8)$$

$$\Delta\theta_{h(n)} = \Delta\theta_{h1(n)} - \Delta\theta_{h2(n)} \quad (9)$$

$$\theta_{h(n)} = \theta_{o(n)} + \Delta\theta_{h(n)} \quad (10)$$

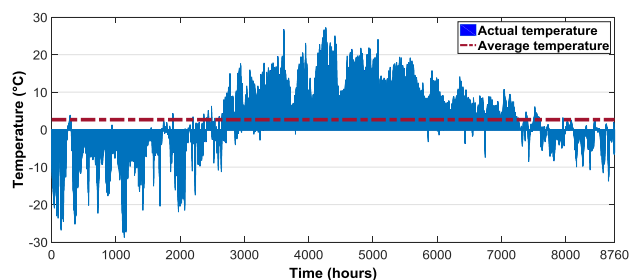
که در این روابط، پارامترها به‌شرح زیر هستند:

D اپراتور تفاضل

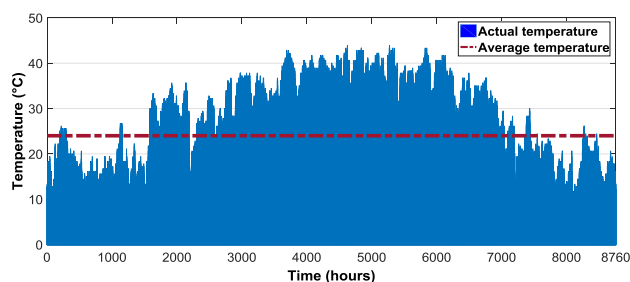
t زمان (min)

K ضریب بار (جریان نامی/جریان بار)

θ_a دمای محیطی ($^{\circ}\text{C}$)



شکل ۶: دمای ساعتی شهر هلسینکی در سال ۲۰۰۸ [۱۴]



شکل ۷: دمای ساعتی شهر فینکس در سال ۲۰۱۴ [۱۸]

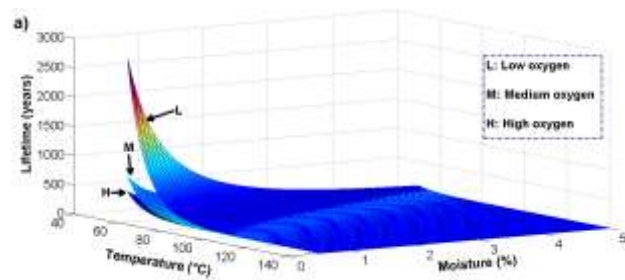
۲۱°C از میانگین دمای شهر هلسینکی بیشتر است، انتظار می‌رود که طول عمر تخمینی ترانسفورماتور نصب‌شده در شهر فینکس به میزان فراوانی کمتر از طول عمر تخمینی ترانسفورماتور نصب‌شده در شهر هلسینکی باشد.

۴-۴ ضریب بار

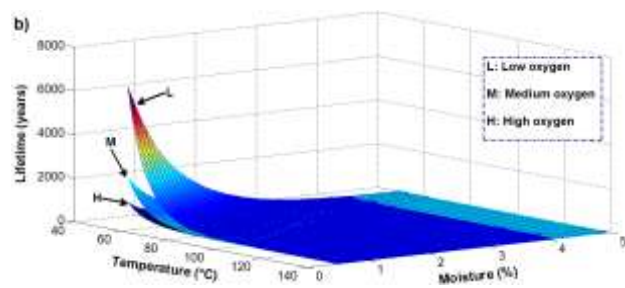
میزان بار هر ترانسفورماتور از تجمیع داده‌های واقعی مربوط به انواع مختلف مصرف مانند روشنایی، تجهیزات سرمایشی و گرمایشی به‌دست‌آمده است. این داده‌های اندازه‌گیری‌شده به‌صورت ساعتی در طول یک سال برای شهر هلسینکی در دسترس بودند. داده‌های ساعتی مربوط به میزان بارهای مختلف برای شهر فینکس در طول یک سال نیز از [۱۹] استخراج‌شده‌اند.

پس از تجمیع داده‌های ساعتی مربوط به بارهای مختلف، برای به‌دست آوردن ضریب بار ترانسفورماتور، در ابتدا بیشترین میزان بار در طول بازه زمانی یک‌ساله در بین داده‌ها جستجو شد. سپس آن مقدار در عددی ضرب شد تا حاصل برابر ۵۰٪ ظرفیت نامی ترانسفورماتور مدنظر شود. میزان بارهای دیگر در طول سال نیز در همان عدد ضرب شدند. در انتها تمامی بارها بر توان نامی ترانسفورماتور تقسیم شدند تا ضریب بار برای هر ساعت به‌دست آید. مطابق همین الگو، دو دسته بار مسکونی و تجاری برای شهر هلسینکی و یک دسته بار مسکونی برای شهر فینکس ایجادشده‌اند. این ضریب بارهای به‌دست‌آمده به‌عنوان ضریب بار ساعتی ترانسفورماتور، برای سال اول از طول عمر آن در نظر گرفته می‌شوند. ضریب بارهای ساعتی ایجادشده برای سه مورد ترانسفورماتور ذکرشده در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده‌شده‌اند.

ضریب بار در طول عمر ترانسفورماتورهای توزیع از یک الگوی ثابت پیروی نمی‌کند و هر ساله ضریب بار آن‌ها افزایش می‌یابد. در پژوهش



شکل ۴: طول عمر کاغذ کرافت تحت شرایط ثابت متنوع



شکل ۵: طول عمر کاغذ کرافت تقویت‌شده تحت شرایط ثابت متنوع

متوسط و زیاد، بسیار کمتر از تفاوت طول عمر بین سطوح اکسیژن کم و متوسط است. این موضوع برای هر دو نوع کاغذ کرافت و کرافت تقویت‌شده صادق است. در انتها مشاهده می‌شود که طول عمر کاغذ کرافت تقویت‌شده بیش از دو برابر طول عمر کاغذ کرافت است. این نتیجه با آزمایش‌های انجام‌شده در [۱۱] مطابقت دارد.

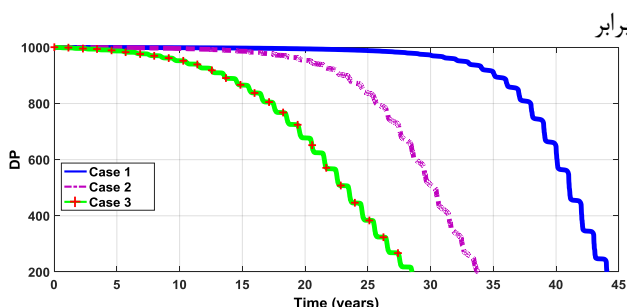
۴-تخمین عمر تحت شرایط متغیر

سه ترانسفورماتور نمونه که هرکدام تحت شرایط متفاوتی بهره‌برداری شده‌اند، برای انجام تخمین عمر با استفاده از روش ارائه‌شده در بخش ۲ در نظر گرفته‌شده‌اند. موردهای اول و دوم شامل یک ترانسفورماتور توزیع نصب‌شده در شهر هلسینکی هستند که به ترتیب تحت بار مسکونی و تجاری هستند. مورد سوم نیز یک ترانسفورماتور توزیع نصب‌شده در شهر فینکس است که تحت بار مسکونی قرار دارد. در ادامه دما و ضریب بار مربوط به هر مورد ارائه می‌شود.

۴-۴ دمای محیطی

برای شهر هلسینکی در فنلاند که نماینده یک شهر با دمای محیطی پایین است، داده‌های مربوط به دمای محیطی آن به‌صورت ساعتی برای سال ۲۰۰۸ در دسترس است و این داده‌ها در شکل ۶ نشان داده‌شده‌اند. داده‌های مربوط به دمای محیطی شهر فینکس در آمریکا که نماینده یک مکان با دمای محیطی بالا است، برای ۸۷۶۰ ساعت سال ۲۰۱۴ از [۱۸] استخراج‌شده‌اند و در شکل ۷ نمایش داده‌شده‌اند. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده برای تعیین مقدار درجه پلیمریزاسیون، فرض شده است که دمای دیگر سال‌های مشمول طول عمر ترانسفورماتور از الگوی همین یک سال مشخص‌شده پیروی می‌کنند. از آنجاکه با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ میانگین دمای شهر فینکس حدود

استفاده شده است. به این علت مقدار درجه پلیمریزاسیون اولیه



شکل ۱۱: پروفیل درجه پلیمریزاسیون در سطح اکسیژن کم برای مورد ۱ (هلسنیکی-بار مسکونی)، مورد ۲ (هلسنیکی-بار تجاری) و مورد ۳ (فینکس-بار مسکونی)

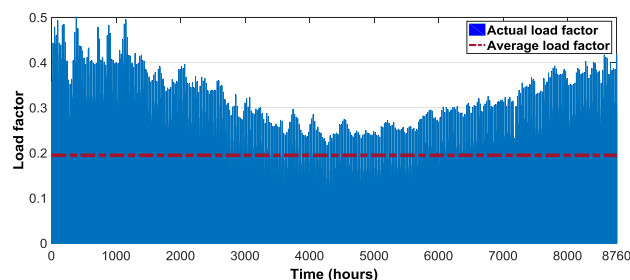
مقدار ۱۰۰۰ و مقدار رطوبت اولیه عایق کاغذی برابر ۰/۵٪ در نظر گرفته شده است [۲، ۱۶].

نتایج یک تحقیق انجام شده بر روی ترانسفورماتورهای نصب شده در شهر هلسنیکی نشان دادند که میزان رشد رطوبت سالانه عایق کاغذی تقریباً برابر ۰/۱٪ است [۱۴]. همین مقدار نیز برای رشد رطوبت سالانه ترانسفورماتور نصب شده در شهر فینکس در نظر گرفته شده است.

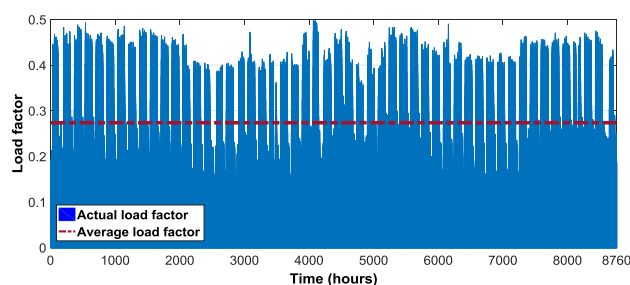
۴-۴ نتایج تخمین طول عمر در شرایط متغیر

پروفیل درجه پلیمریزاسیون برای سه مورد ترانسفورماتور بررسی شده در سطح اکسیژن کم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می شود که طول عمر تخمین زده شده برای ترانسفورماتورهای موارد ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۴۴/۱، ۳۳/۸ و ۲۸/۵ سال است. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، این طول عمرهای تخمین زده شده با طول عمر واقعی ترانسفورماتور تطابق دارند. درواقع این دقت حاصله در تخمین ناشی از در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای رابطه (۲) است. درنتیجه با در نظر گرفتن این تغییرات، نواقص تخمین طول عمر در شرایط ثابت، مشابه آنچه در شکل های ۴ و ۵ و [۱۳-۱۰] نشان داده شده اند، برطرف می گردد.

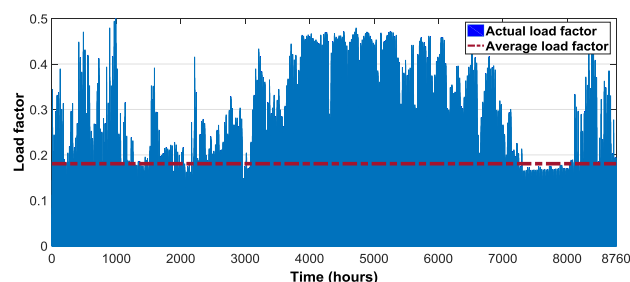
نکته دیگری که در شکل ۱۱ حائز اهمیت است، متمایز بودن پروفیل درجه پلیمریزاسیون در شرایط واقعی در مقایسه با شرایط ثابت (ثابت بودن دمای نقطه داغ و میزان رطوبت) است. در شکل ۱۱ پروفیل درجه پلیمریزاسیون بیشترین کاهش را در نواحی انتهایی نمودار از خود نشان می دهد درحالی که این کاهش شدید در پروفیل های به دست آمده تحت شرایط ثابت [۲۱] در نواحی ابتدایی نمودار رخ می دهد. همچنین پروفیل های نشان داده شده در شکل ۱۱ شامل ریبل هایی هستند که نمایانگر تغییرات در دمای نقطه داغ ترانسفورماتور هستند. به عنوان نمونه، کاهش شدید مقدار درجه پلیمریزاسیون برای ترانسفورماتور مورد ۱، در ابتدای هرسال از طول عمر آن رخ می دهد. علت این کاهش شدید درجه پلیمریزاسیون در ابتدای هرسال، ضریب بار زیاد در ابتدای هرسال است که در شکل ۸ نشان داده شده است. درنتیجه ریبل های موجود در پروفیل درجه



شکل ۸: ضریب بار برای منطقه مسکونی در هلسنیکی در سال اول از عمر ترانسفورماتور [۱۴]



شکل ۹: ضریب بار برای منطقه تجاری در هلسنیکی در سال اول از عمر ترانسفورماتور [۱۴]



شکل ۱۰: ضریب بار برای منطقه مسکونی در فینکس در سال اول از عمر ترانسفورماتور [۱۹]

انجام شده در [۲۰] فرض شده است که افزایش ضریب بار سالیانه برای ترانسفورماتورهای توزیع نصب شده در شهر هلسنیکی ۲/۶٪ باشد. در این مقاله فرض شده است که مقدار ضریب بار برای سه مورد ترانسفورماتور مورد بررسی، سالیانه به میزان ۳٪ افزایش می یابد.

۴-۴ فرضیات مقدماتی

مقدار درجه پلیمریزاسیون اولیه (DP_0)، رشد رطوبت سالانه و مقدار رطوبت اولیه عایق کاغذی سه پارامتری هستند که برای تخمین عمر با استفاده از رابطه (۲) می بایست در دسترس باشند. این سه پارامتر برای ترانسفورماتورهای مختلف می توانند متفاوت باشند.

در صورتی که سازندگان ترانسفورماتور مقدار اولیه درجه پلیمریزاسیون و رطوبت عایق کاغذی را ارائه دهند، تخمین طول عمر از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود. به هر حال در این مقاله از مقادیر متداول که حاصل آزمایش های عملی هستند برای این پارامترها

لازم به ذکر است که مقادیر A مورد نیاز برای کاغذ کرافت تقویت شده از جدول ۱ استخراج شده‌اند.

جدول ۲: طول عمر کاغذ کرافت و کرافت تقویت شده برای ترانسفورماتورهای موارد ۱، ۲ و ۳.

شماره مورد	سطح اکسیژن	طول عمر کاغذ کرافت (سال)	طول عمر کاغذ کرافت تقویت شده (سال)
۱	کم	۴۴/۱	۴۳/۲
۱	متوسط	۴۳/۱	۴۳/۱
۱	زیاد	۴۳/۰	۴۲/۱
۲	کم	۳۳/۸	۳۴/۲
۲	متوسط	۳۲/۵	۳۳/۳
۲	زیاد	۳۱/۵	۳۱/۵
۳	کم	۲۸/۵	۲۹/۵
۳	متوسط	۲۵/۶	۲۷/۵
۳	زیاد	۲۴/۵	۲۴/۶

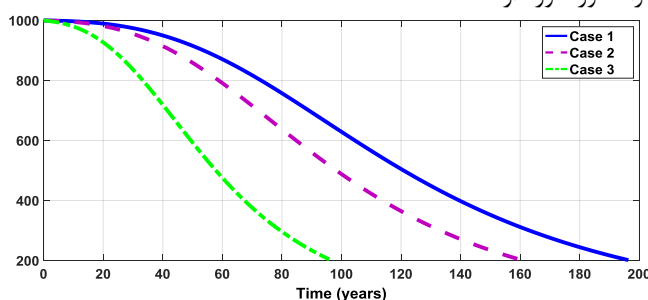
طول عمر کاغذهای کرافت و کرافت تقویت شده برای سه مورد ترانسفورماتور فوق‌الذکر تحت سه سطح اکسیژن متفاوت در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این جدول مشخص است، اثر مخرب یک سطح اکسیژن زیاد برای موردی با طول عمر کمتر چشم‌گیرتر است. همچنین با مقایسه طول عمر کاغذهای کرافت و کرافت تقویت شده تحت یک شرایط محیطی و عملکردی یکسان، می‌توان نتیجه گرفت که طول عمر کاغذ کرافت تقویت شده لزوماً بیشتر از طول عمر کاغذ کرافت نیست. این نتیجه‌گیری با منحنی‌های تخمین طول عمر به دست آمده در شرایط ثابت در [۱۲، ۱۳] همخوانی دارد. از آنجایی که تنها عامل تفاوت بین این دو نوع کاغذ، مقدار A مربوطه است، می‌بایست این پارامتر مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که بعد از یک سطح رطوبت مشخص، مقدار A برای کاغذ کرافت تقویت شده بیشتر از مقدار A برای کاغذ کرافت است. این ویژگی مابین هر سه سطح اکسیژن مشترک است. به عنوان یک دلیل موجه برای این امر می‌توان به آنچه در [۱۱] پس از آزمایش‌های عملی به دست آمده است، اشاره کرد که طبق آن، میزان اسید تولیدی ناشی از کاغذ کرافت تقویت شده بیش از کاغذ کرافت است. در نتیجه غلظت بالای اسید باعث تسريع فرایند آبکافت می‌شود و در نهایت باعث زوال زودتر عایق کاغذی می‌شود.

۵- تعیین زمان بهینه برای انجام کاهش رطوبت در ترانسفورماتور

با توجه به وجود یک پروفیل درجه پلیمریزاسیون دقیق، زمان بهینه برای استخراج رطوبت موجود در عایق کاغذی به نحوی که به بیشترین افزایش در طول عمر آن منجر شود می‌تواند ارزیابی شود. روش‌های مختلفی برای کاهش رطوبت عایق کاغذی موجود هستند که در [۲۲] در مورد آنان بحث شده است. در این مقاله، هدف تعیین زمان بهینه برای انجام کاهش رطوبت عایق کاغذی است به نحوی که به بیشترین افزایش در طول عمر آن منجر شود. در این بخش سه سناریو مختلف

پلیمریزاسیون دلالت بر تأثیر محسوس تغییرات دمای نقطه داغ ترانسفورماتور دارند.



شکل ۱۲: پروفیل درجه پلیمریزاسیون برای ترانسفورماتورهای موارد ۱، ۲ و ۳ تحت یک دمای نقطه داغ ثابت.

برای بررسی اثرات تغییرات ضریب بار و دمای محیطی بر طول عمر سه مورد ترانسفورماتور ذکر شده، سه شبیه‌سازی با توجه به یک دمای نقطه داغ ثابت انجام شده است. دمای نقطه داغ ثابت در نظر گرفته شده برای هر مورد، برابر میانگین دماهای نقطه داغ محاسبه شده در طی طول عمر تخمین زده شده ترانسفورماتور مربوطه است. برای مثال، با توجه به شکل ۱۱ که در آن طول عمر ترانسفورماتور مورد ۱ برابر ۴۴/۱ سال تخمین زده شده است، میانگین دمای نقطه داغ در طی این طول عمر تخمین زده شده برابر دمای نقطه داغ ثابت ترانسفورماتور مورد ۱ در نظر گرفته شده است. دمای نقطه داغ میانگین برای ترانسفورماتورهای موارد ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر $31/2^{\circ}\text{C}$ ، $35/3^{\circ}\text{C}$ و $45/8^{\circ}\text{C}$ است. پروفیل درجه پلیمریزاسیون مربوط به هر کدام از ترانسفورماتورهای موارد ۱، ۲ و ۳ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که رشد رطوبت سالانه $0/1\%$ در این شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. با مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که طول عمر تخمین زده شده تحت یک دمای نقطه داغ ثابت بسیار بیشتر از طول عمر تخمینی تحت شرایط دمای نقطه داغ متغیر است. این امر به این علت است که طبق رابطه (۲)، یک رابطه نمایی بین دمای نقطه داغ و درجه پلیمریزاسیون وجود دارد. در نتیجه در نظر گرفتن تغییرات موجود در دمای محیطی و ضریب بار باعث می‌شود که یک تخمین عمر واقعی و بسیار دقیق در مقایسه با تخمین عمر تحت شرایط ثابت از نظر دمای نقطه داغ به دست آید.

۴-۵ مقایسه طول عمر کاغذ کرافت و کاغذ کرافت تقویت شده

هدف این بخش این است که طول عمر کاغذ کرافت با طول عمر کاغذ کرافت تقویت شده تحت شرایط متغیر مقایسه شود. همان روشی که برای تخمین طول عمر کاغذ کرافت استفاده شده بود، برای تخمین عمر کاغذ کرافت تقویت شده نیز استفاده می‌شود. از این رو، مقادیر پارامترهایی از قبیل ضریب بار، دمای محیطی، رشد سالانه رطوبت و ضریب بار برای کاغذهای کرافت و کرافت تقویت شده یکسان هستند.

شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. در این شکل کاهش رطوبت در سال چهارم از طول عمر ترانسفورماتور رخ می‌دهد و مقدار آن برابر ۴٪ است. از آنجایی که کاهش رطوبت منجر به کاهش ضریب A می‌شود، با توجه

برای بررسی اثر زمان انجام کاهش رطوبت در طول عمر عایق کاغذی تعریف می‌شوند. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی‌های این بخش تحت شرایط با سطح اکسیژن کم انجام شده‌اند.

۵ سناریوی اول: کاهش رطوبت بدون محدودیت

در سناریوی اول فرض شده است که در هر زمانی از طول عمر ترانسفورماتور، امکان این که میزان رطوبت عایق کاغذی به مقدار اولیه آن یعنی ۰/۵٪ برسد وجود دارد. درواقع این سناریو بیشترین مقدار ممکن برای انجام کاهش رطوبت را در نظر می‌گیرد. در نتیجه انتظار است که پیاده‌سازی این سناریو به بیشترین افزایش در طول عمر ترانسفورماتور منجر شود.

طبق رابطه (۲)، طول عمر تخمینی ترانسفورماتور با توجه به انجام یک کاهش در میزان رطوبت عایق کاغذی می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$L(t_m) = \sum_{n=1}^{k(t_m)} (t_n - t_{(n-1)}) \quad (11)$$

که در این رابطه L برابر طول عمر ترانسفورماتور، k تعداد تکرارهای رابطه (۲) و t_m زمان انجام کاهش رطوبت است. حال، مسئله بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\begin{aligned} \min_{t_m} \{ & -L(t_m) \} \\ \text{s.t. } \{ & 1 \leq t_m \leq T, \quad mr = t_m \times 0.1 \} \end{aligned} \quad (12)$$

که T برابر طول عمر تخمین زده شده ترانسفورماتور بدون انجام کاهش رطوبت و mr مقدار کاهش در رطوبت عایق کاغذی برحسب درصد است. مقدار ثابت ۰/۱ موجود در این رابطه، مربوط به همان مقدار در نظر گرفته شده برای رشد رطوبت سالانه است.

یک محدودیت مشترک برای هر سه سناریوی تعریف شده در این بخش تعریف شده است. این محدودیت بدین صورت است که میزان رطوبت باقی مانده در عایق کاغذی پس از انجام کاهش رطوبت، نباید کمتر از مقدار اولیه رطوبت عایق کاغذی یعنی ۰/۵٪ شود.

برای تعیین زمان بهینه مربوط به انجام کاهش رطوبت عایق کاغذی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. جزئیات مربوط به این الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در [۲۳] موجود است.

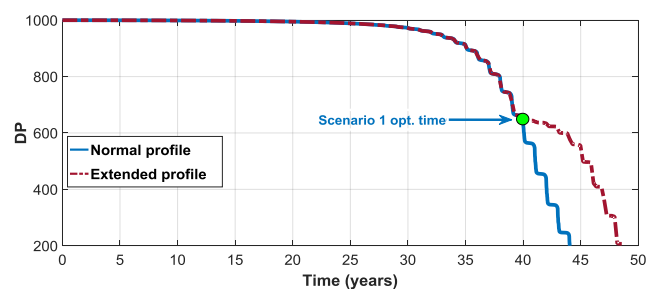
نتایج حاصل از پیاده‌سازی این سناریو برای ترانسفورماتور مورد ۱ در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که حداکثر طول عمر ترانسفورماتور برابر ۴۹ سال است. همچنین زمان بهینه برای انجام کاهش رطوبت و طول عمر افزایش یافته ترانسفورماتورهای موارد ۱، ۲ و ۳ که ناشی از پیاده‌سازی سناریوی اول است، در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که طول عمرهای افزایش یافته نشان داده شده در جدول ۴ برابر حداکثر طول ترانسفورماتور هستند که می‌تواند با انجام تنها یکبار کاهش رطوبت به دست آید. همچنین پروفیل درجه پلیمریزاسیون گسترش یافته به همراه پروفیل طبیعی که در آن کاهش رطوبتی رخ نداده است، برای ترانسفورماتور مورد ۱ در

جدول ۳: طول عمرهای افزایش یافته برای ترانسفورماتور مورد ۱ (اکسیژن کم-کاغذ کرافت) ناشی از پیاده سازی سناریوی اول

زمان کاهش رطوبت (سال)	میزان کاهش در رطوبت (%)	طول عمر افزایش یافته (سال)	طول عمر طبیعی (سال)
۵	۰/۵	۴۴/۲	۴۴/۱
۱۰	۱/۰	۴۵/۰	۴۴/۱
۱۵	۱/۵	۴۵/۱	۴۴/۱
۲۰	۲/۰	۴۶/۰	۴۴/۱
۲۵	۲/۵	۴۶/۹	۴۴/۱
۳۰	۳/۰	۴۷/۱	۴۴/۱
۳۵	۳/۵	۴۸/۰	۴۴/۱
۴۰	۴/۰	۴۹/۰	۴۴/۱
۴۱	۴/۱	۴۹/۰	۴۴/۱
۴۲	۴/۲	۴۹/۰	۴۴/۱
۴۳	۴/۳	۴۸/۱	۴۴/۱

جدول ۴: حداکثر طول عمرهای افزایش یافته برای ترانسفورماتورهای موارد ۱، ۲ و ۳ (اکسیژن کم-کاغذ کرافت) ناشی از پیاده سازی سناریوی اول

شماره مورد	زمان انجام کاهش رطوبت (سال)	میزان کاهش در رطوبت (%)	طول عمر افزایش یافته (سال)	طول عمر طبیعی (سال)
۱	۴۰	۴/۰	۴۹/۰	۴۴/۱
۲	۳۰	۳/۰	۳۸/۶	۳۳/۸
۳	۲۵	۲/۵	۳۳/۵	۲۸/۵



شکل ۱۳: پروفیل درجه پلیمریزاسیون طبیعی و گسترش یافته ناشی از پیاده سازی سناریوی اول برای ترانسفورماتور مورد ۱.

به شکل ۲ با کاهش ۴ درصدی میزان رطوبت، ضریب A نیز به مقدار زیادی کاهش خواهد یافت. در نتیجه همان طور که در شکل ۱۳ نمایان است، کاهش سرعت پیری عایق کاغذی و افزایش فراوان طول عمر آن رخ می دهد.

جدول ۵: مقایسه بین طول عمرهای طبیعی و افزایش یافته ناشی از کاهش رطوبت مربوط به سناریوی دوم

شماره مورد	زمان انجام کاهش رطوبت (سال)	میزان کاهش در رطوبت (%)	طول عمر افزایش یافته (سال)	طول عمر طبیعی (سال)
۱	۵	۰/۵	۴۴/۲	۴۴/۱
۲	۵	۰/۵	۳۴/۶	۳۳/۸
۳	۵	۰/۵	۲۹/۵	۲۸/۵
۱	۱۰	۱/۰	۴۵/۰	۴۴/۱
۲	۱۰	۱/۰	۳۵/۵	۳۳/۸
۳	۱۰	۱/۰	۳۰/۶	۲۸/۵

۴ ۵- سناریوی دوم: در نظر گرفتن یک مقدار مشخص برای انجام کاهش رطوبت

در سناریوی اول به این دلیل که میزان کاهش در رطوبت عایق کاغذی نسبتاً زیاد است، سه مشکل عمده به وجود می آید. اول این که استخراج مقدار زیادی رطوبت از عایق کاغذی باعث شل شدن سیم پیچی ها می گردد [۲۱]. دوم این که استاندارد IEEE [۲۴] یک سطح مشخص برای میزان رطوبت تعیین کرده است. اگر میزان رطوبت موجود در عایق ترانسفورماتور فراتر از آن حد رود، می بایست برای کاهش سطح رطوبت اقدام شود و نمی توان اجازه داد تا ترانسفورماتور به کار خود ادامه دهد و محتوای رطوبت آن افزایش یابد. مورد سوم این است که فرایندهای معمول برای تصفیه روغن نمی توانند قسمت اعظم رطوبت موجود در عایق کاغذی را از آن استخراج کنند. با توجه به این موارد سناریوی دوم با این فرض مطرح می شود که میزان رطوبت موجود در عایق کاغذی به اندازه یک مقدار مشخص می تواند کاسته شود. در نتیجه با در نظر گرفتن رشد رطوبت سالانه ۰/۱٪، مسئله بهینه سازی به شکل زیر خواهد بود:

$$\min_{t_m} \{-L(t_m)\} \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \left\{ \frac{mr}{0.1} \leq t_m \leq T, 0 < mr \leq T \times 0.1 \right\}$$

برخلاف سناریوی اول که مقدار mr می تواند متغیر در نظر گرفته شود، در سناریوی دوم یک مقدار ثابت برای mr در نظر گرفته می شود. همان طور که در رابطه (۱۳) مشاهده می شود، محدودیت های تعریف شده برای مقدار mr به گونه ای هستند که مقدار رطوبت باقی مانده پس از انجام کاهش رطوبت، کمتر از مقدار رطوبت اولیه موجود در عایق کاغذی نگردد.

برای پیاده سازی سناریوی دوم، دو مقدار ۰/۵ و ۱٪ برای انجام کاهش رطوبت در نظر گرفته شده اند. زمان های بهینه برای انجام کاهش رطوبت مربوطه با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست آمده اند. نتایج حاصله در جدول ۵ نشان داده شده اند. در این جدول طول عمر طبیعی ترانسفورماتور با طول عمر افزایش یافته ترانسفورماتور ناشی از انجام کاهش رطوبت مقایسه شده است. نکته قابل توجه که در جدول ۵ نهفته است این است که یک میزان کاهش یکسان در رطوبت عایق کاغذی برای ترانسفورماتورهای تحت شرایط محیطی و عملکردی

زمان انجام کاهش رطوبت (سال)	میزان کاهش در رطوبت (%)	طول عمر افزایش یافته (سال)	طول عمر طبیعی (سال)
۱۰	۰/۵	۴۴/۲	۴۴/۱
۲۰	۰/۵	۴۴/۲	۴۴/۱
۳۰	۰/۵	۴۴/۲	۴۴/۱
۴۰	۰/۵	۴۴/۱	۴۴/۱
۲۰	۱/۰	۴۵/۰	۴۴/۱
۳۰	۱/۰	۴۵/۰	۴۴/۱
۴۰	۱/۰	۴۵/۰	۴۴/۱

کاهش رطوبت‌ها و مقدار کاهش در رطوبت می‌تواند تعریف شود. اثرات این سه پارامتر در این بخش مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

چندین شبیه‌سازی تحت شرایط مختلف برای این سناریو انجام شدند. نتایج برخی از کاهش رطوبت‌های چندگانه برای ترانسفورماتور مورد ۱ در جدول ۷ ذکر شده‌اند. نخستین نتیجه‌ای که از نتایج این جدول برمی‌آید این است که زمان انجام کاهش رطوبت، مشابه آنچه در سناریوی دوم مشاهده گردید، تأثیر ناچیزی در افزایش طول عمر ترانسفورماتور دارد.

یک مقایسه بین ردیف‌های ۱ تا ۵ جدول ۷ نشان می‌دهد که میزان افزایش در طول عمر به‌ازای هر مرتبه کاهش نیم درصدی رطوبت، یکسان نیست. به‌عنوان نمونه، انجام دو و یا سه مرتبه کاهش نیم درصدی رطوبت تقریباً منجر به افزایش طول عمر به یک‌میزان می‌شود. درحالی‌که طول عمر افزایش‌یافته ناشی از انجام چهار مرتبه کاهش نیم درصدی رطوبت در مقایسه با انجام دو و یا سه مرتبه کاهش نیم درصدی رطوبت، چشمگیر است. درنتیجه، افزایش تعداد کاهش رطوبت لزوماً تحت هر شرایطی منجر به یک افزایش فراوان در طول عمر ترانسفورماتور نخواهد شد.

جدول ۷: اثر کاهش رطوبت چندگانه بر روی طول عمر ترانسفورماتور مورد ۱ (اکسیژن کم-کاغذ کرافت)

میزان هر کاهش رطوبت (%)	تعداد کاهش رطوبت‌ها	طول عمر افزایش یافته (سال)	طول عمر طبیعی (سال)
۰/۵	۲	۴۵/۰	۴۴/۱
۰/۵	۳	۴۵/۱	۴۴/۱
۰/۵	۴	۴۶/۰	۴۴/۱
۰/۵	۵	۴۶/۹	۴۴/۱
۰/۵	۶	۴۸/۰	۴۴/۱
۱/۰	۲	۴۶/۰	۴۴/۱
۱/۰	۳	۴۷/۱	۴۴/۱

مجموع رطوبت خارج‌شده از عایق کاغذی ناشی از ۶ مرتبه کاهش نیم درصدی رطوبت با مجموع رطوبت خارج‌شده ناشی از ۳ مرتبه کاهش یک‌درصدی رطوبت برابر است. بااین‌حال، با توجه به ردیف‌های ۵ و ۷ جدول ۷، طول عمر افزایش‌یافته ناشی از انجام این دو مدل

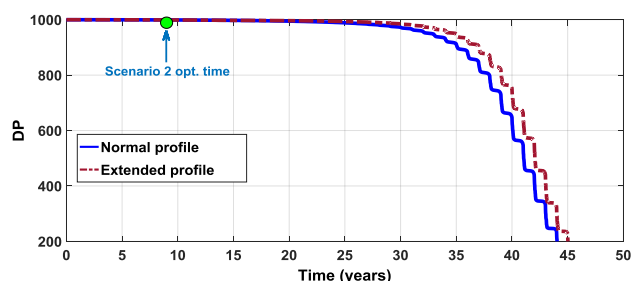
مختلف، طول عمر ترانسفورماتورها را به یک‌میزان افزایش نمی‌دهد؛ بلکه این افزایش در طول عمر برای ترانسفورماتورهای با طول عمر تخمینی کمتر، بیشتر است. پروفیل درجه پلیمریزاسیون گسترش‌یافته برای ترانسفورماتور مورد ۱ همراه با پروفیل طبیعی بدون کاهش رطوبت آن در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند. در این شکل، میزان کاهش رطوبت برای سناریوی دوم برابر ۱٪ است.

زمان بهینه برای انجام کاهش رطوبت مربوط به سناریوی دوم هنگامی خواهد بود که میزان رطوبت اضافه‌شده به عایق کاغذی ناشی از رشد رطوبت سالانه برابر با میزان قابلیت کاهش در رطوبت عایق کاغذی شود. به‌عنوان مثال، اگر رشد رطوبت سالانه برابر ۰/۱٪ در نظر گرفته شود و مقدار رطوبت قابل‌استخراج از عایق کاغذی توسط تکنیک در دسترس برابر ۲٪ باشد، آنگاه پس از ۲۰ سال که میزان رطوبت اضافه‌شده به عایق کاغذی برابر ۲٪ می‌شود، زمان بهینه برای انجام کاهش رطوبت عایق کاغذی فرامی‌رسد.

تأثیر یک تأخیر در انجام کاهش رطوبت بر مبنای سناریوی دوم برای ترانسفورماتور مورد ۱ در جدول ۶ نشان داده شده است. با مقایسه طول عمرهای افزایش‌یافته نشان داده‌شده در جدول‌های ۵ و ۶ می‌توان دریافت که تأثیر یک تأخیر هرچند طولانی در اجرای کاهش رطوبت مربوط به سناریوی دوم قابل‌چشم‌پوشی است. این رفتار برای مقادیر مختلف کاهش در سطح رطوبت عایق کاغذی و برای ترانسفورماتورهای هر سه مورد یکسان است.

۴ ۵- سناریوی سوم: کاهش رطوبت چندگانه

در عمل کاهش رطوبت عایق ترانسفورماتورها به‌صورت چندباره انجام می‌شود. ازاین‌رو، این بخش به بررسی اثرات کاهش رطوبت چندگانه اختصاص دارد. درواقع این سناریو حالت تکرارشونده سناریوی دوم است. با توجه به خصوصیات این سناریو، چندین حالت مختلف برای کاهش رطوبت چندگانه از منظر زمان انجام کاهش رطوبت‌ها، تعداد



شکل ۱۴: پروفیل درجه پلیمریزاسیون برای ترانسفورماتور مورد ۱ تحت شرایط طبیعی و بهینه‌شده با ۱٪ کاهش رطوبت.

جدول ۶: طول عمرهای افزایش‌یافته ناشی از تأخیر در انجام کاهش رطوبت مربوط به سناریوی دوم برای ترانسفورماتور مورد ۱ (اکسیژن کم-کاغذ کرافت)

استخراج شود، کاهش رطوبت‌ها به میزان کم و در بازه‌های زیاد تکرار شوند.

مراجع

- [1] W. J. McNutt, "Insulation thermal life considerations for transformer loading guides," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 7, no. 1, pp. 392-401, Jan. 1992.
- [2] CIGRE Task Force D1.01.10, "Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers", *CIGRE Brochure No.* 323, 2007.
- [3] Y. Bertrand, C. Tran-duy, V. Murin, A. Schaut, S. Autru, and S. Eeckhoudt, "MV/LV Distribution transformer: research on paper ageing markers", *CIGRE D1-103*, France, 2012.
- [4] A. Schaut, S. Autru, and S. Eeckhoudt, "Applicability of methanol as a new marker for paper degradation in power transformers," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 2, pp. 533-540, Apr. 2011.
- [5] T. Oommen and T. Prevost, "Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part II maintaining insulation integrity and life", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 22, no. 2, pp. 5-14, 2006.
- [۶] بهروز وحیدی، قادر رسولی هاشم‌آباد، «تحلیل بارداری استاتیکی روغن ترانسفورماتورها با استفاده از سیستم مدار بسته»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۳۹، شماره ۱، صفحه ۵۷-۶۶، ۱۳۸۸.
- [۷] امید قادری، محمدرضا فیضی، «روش جدید برای تخمین عمر باقی‌مانده ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از آنالیز گازهای محلول در روغن»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۳۹، شماره ۱، صفحه ۲۵-۳۶، ۱۳۸۸.
- [8] A. Teymouri, and B. Vahidi, "CO2/CO concentration ratio: A complementary method for determining the degree of polymerization of power transformer paper insulation", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 33, no. 1, pp. 24-30, 2017.
- [9] O. Arroyo-Fernandez, I. Fofana, J. Jalbert, E. Rodriguez, L. Rodriguez, and M. Ryadi, "Assessing changes in thermally upgraded papers with different nitrogen contents under accelerated aging", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 3, pp. 1829-1839, 2017.
- [10] A. Emsley and G. Stevens, "Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers," *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 141, no. 5, pp. 324-334, Sep. 1994.
- [11] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, and T. J. Painter, "Aging of oil-impregnated paper in power transformers," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 1, pp. 230-239, Jan. 2004.
- [12] N. Lelekakis, D. Martin, and J. Wijaya, "Ageing rate of paper insulation used in power transformers part 1: oil/paper system with low oxygen concentration," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 6, pp. 1999-2008, Dec. 2012.
- [13] N. Lelekakis, D. Martin, and J. Wijaya, "Ageing rate of paper insulation used in power transformers part 2: oil/paper system with medium and high oxygen concentration," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 6, pp. 2009-2018, Dec. 2012.

کاهش رطوبت یکسان نیست. دلیل این امر نیز وجود یک رابطه غیرخطی بین مقدار A و میزان رطوبت است که در شکل ۲ نمایان است. با توجه به این نتایج و همچنین مشکلات ذکرشده برای سناریوی اول، انجام کاهش رطوبت در بازه‌های زمانی کوتاه مطلوب‌تر است.

۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل برای تعیین وضعیت عایق کاغذی ترانسفورماتور بر مبنای درجه پلیمریزاسیون ارائه شد. در مدل پویای ارائه‌شده برای تخمین طول عمر ترانسفورماتور، دمای محیطی، ضریب بار، سطح اکسیژن و مقدار رطوبت با توجه به رشد سالانه به‌صورت ساعتی به‌عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفته می‌شوند. مشاهده شد که اگر از این مدل در شرایط ثابت از منظر دمای نقطه داغ و رطوبت استفاده شود، تخمین دقیقی از طول عمر ترانسفورماتور حاصل نخواهد شد اما اگر دمای محیطی ترانسفورماتور، ضریب بار و رطوبت آن به‌صورت دینامیک در نظر گرفته شوند، پروفیل درجه پلیمریزاسیون به‌دست‌آمده از دقت بالایی برخوردار خواهد بود و در نهایت یک تخمین عمر دقیق از طول عمر ترانسفورماتور به‌دست خواهد آمد. از آنجایی که پارامترهای مورد استفاده برای تخمین عمر ترانسفورماتور توسط روش ارائه‌شده در این مقاله با تصفیه و یا تعویض روغن ترانسفورماتور تغییری نمی‌کنند، این روش تخمین طول عمر بسیار دقیق‌تر از دیگر روش‌های تخمین عمر بر مبنای غلظت ۲-فورفورال، متانول و گازهای محلول در روغن خواهد بود. همچنین این روش تخمین طول عمر در صورت در دسترس بودن پارامترهای مورد نیاز برای تمامی ترانسفورماتورهای روغنی قابل پیاده‌سازی است.

در این مقاله نشان داده شد که بسته به شرایط عملکردی و محیطی ترانسفورماتور، طول عمر کاغذ کرافت تقویت‌شده نسبت به کاغذ کرافت می‌تواند بیشتر، برابر و یا کمتر باشد. درواقع غیرخطی بودن رابطه مابین مقدار A و میزان رطوبت باعث می‌شود که نتوان با قطعیت بیان کرد که کدام عایق کاغذی مناسب‌تر است. در نتیجه از منظر اقتصادی بهتر است که نوع عایق کاغذی یک ترانسفورماتور متناسب با شرایط عملکردی و محیطی آن تعیین گردد.

بر مبنای پروفیل درجه پلیمریزاسیون به‌دست‌آمده، زمان بهینه برای انجام کاهش رطوبت عایق کاغذی قابل تعیین است. زمان بهینه برای انجام این کاهش رطوبت با این فرض که بتوان یک مقدار ثابت از میزان رطوبت موجود در عایق کاغذی کاست، هنگامی است که آن مقدار ثابت، برابر با مقدار رطوبت افزوده‌شده به عایق کاغذی ناشی از افزایش رطوبت سالانه باشد. همچنین مشخص شد که اگر زمان این کاهش رطوبت حتی در حدود چند سال به تعویق انداخته شود، تأثیر منفی این تأخیر ناچیز خواهد بود. همچنین نشان داده شد که اگر کاهش رطوبت به‌صورت چندگانه صورت پذیرد، بهتر است به‌جای این که مقدار زیادی رطوبت در تعداد دفعات کم از عایق کاغذی

- [19] "Commercial and residential hourly load profiles for all TMY3 locations in the united states - OpenEI Datasets", *En.openei.org*, 2016. [Online]. Available: <http://en.openei.org/datasets/>. [Accessed: 15- Nov- 2015].
- [20] M. Humayun, B. Sousa, A. Safdarian, M. Ali, M. Degefa, M. Lehtonen, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal capacity management of substation transformers over long-run", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 632-641, 2016.
- [21] L. Lundgaard, W. Hansen, and S. Ingebrigtsen, "Ageing of mineral oil impregnated cellulose by acid catalysis", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 2, pp. 540-546, 2008.
- [22] CIGRE Working Group A2.18, "Guide for life management techniques for power transformers," *CIGRE Brochure* No. 227, Jan. 2003.
- [23] M. Arian Nik, K. Fayazbakhsh, D. Pasini, and L. Lessard, "Surrogate-based multi-objective optimization of a composite laminate with curvilinear fibers", *Composite Structures*, vol. 94, no. 8, pp. 2306-2313, 2012.
- [24] Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment, *IEEE Std. C57.106-2002*.
- [۱۴] محمدرضا آراین نیک، تخمین عمر باقی مانده ترانسفورماتورهای روغنی بر مبنای ارزیابی درجه پلیمریزاسیون، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۵.
- [15] M. Koch, "Improved determination of moisture in oil-paper-insulations by specialised moisture equilibrium charts," *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, p. 508, Beijing, China, 2005.
- [16] CIGRE Working Group A2.30, "Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems," *CIGRE Brochure* No. 349, Jun. 2009.
- [17] *Power Transformers Part 7: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers*, International standard IEC 60076-7, 2005.
- [18] "Weather History & Data Archive | Weather Underground", *Wunderground.com*, 2016. [Online]. Available: <https://www.wunderground.com/history/>. [Accessed: 04- Jul- 2015].