

## تخمین مقدار رطوبت کاغذ ترانسفورماتور در حال کار بر اساس میزان رطوبت و درجه حرارت روغن

مهدی دانشور<sup>۱\*</sup>، علیرضا ستایش مهر<sup>۲</sup>

\* ۱- کارشناسی ارشد، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول،

mehdi.daneshvar69@yahoo.com

۲- استادیار، گروه برق، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول،

setayeshmehr@jsu.ac.ir

**چکیده:** رطوبت نقش مهمی در کاهش عمر عایق سلولزی ترانسفورماتورهای قدرت دارد. عمر عایقی کاغذ ترانسفورماتور متناسب با مقدار رطوبت موجود در آن است به طوری که اگر مقدار رطوبت کاغذ یک درصد اضافه شود عمر آن به نصف کاهش می‌یابد. افزایش رطوبت علاوه بر کاهش استحکام مکانیکی، موجب کاهش آستانه شروع تخلیه جزئی و در نهایت باعث وارد شدن خسارات جدی به ترانسفورماتور می‌گردد. از اینرو جهت جلوگیری از خارج شدن ترانسفورماتور از شبکه ناشی از ضعف عایقی، مانیتورینگ رطوبت در عایق روغن-کاغذ ترانسفورماتور در حال کار از جایگاه بالایی برخوردار است. در این تحقیق مانیتورینگ روند خروج رطوبت از کاغذ به روغن عایقی به دو صورت شبیه سازی نرم‌افزاری و آزمایشگاهی انجام شده است. در ابتدا با استفاده از معادله دینامیکی قانون دوم فیک برای انتشار رطوبت و حل آن به روش تفاضل محدود<sup>۱</sup> توسط نرم افزار Matlab R13 به بررسی نحوه انتشار و جذب رطوبت در نمونه روغن-کاغذ پرداخته شده است، علاوه بر آن این روند را در نمونه آزمایشگاهی ترانسفورماتور با سیستم عایقی روغن-کاغذ و نصب یک سنسور رطوبت سنج درون روغن مورد بررسی قرار گرفته است، در ادامه نتایج نشان می‌دهد که با این روش نحوه تغییرات رطوبت در کاغذ و روغن قابل مدل سازی است.

**واژه‌های کلیدی:** ترانسفورماتور، انتشار رطوبت، تفاضل محدود، عایق کاغذ-روغن

### ۱- مقدمه

رطوبت در کاغذ دغدغه‌ی مهم بهره برداران جهت مدیریت طول عمر یک ترانسفورماتور می‌باشد. در آغاز بهره برداری از یک ترانسفورماتور معمولاً رطوبت کمتر از ۰/۵ درصد است، اما در شرایط بهره برداری نامناسب ممکن است به ۴-۸٪ افزایش یابد. معمولاً در ترانسفورماتورها عمده حجم رطوبت در عایق سلولزی ترانسفورماتور قرار دارد. برای مثال در یک ترانس ۱۵۰ مگا ولت آمپر، ۴۰۰ کیلو ولت، ۸۰۰۰۰ لیتر روغن، ۷ تن کاغذ و رطوبت<sup>۲</sup> ۲۰ppm مقدار ۲ کیلوگرم آب در روغن و ۲۲۳ کیلوگرم آب در کاغذ وجود دارد. تعیین مقدار رطوبت کاغذ به سه روش امکان پذیر است، روش اول به صورت نمونه گیری از کاغذ عایقی و تعیین مقدار رطوبت به روش آزمایش کارل فیشر می‌باشد که در عمل بکارگیری این روش برای ترانسفورماتورها امکان پذیر نیست.

ترانسفورماتورهای قدرت نقش کلیدی در سیستم های قدرت بازی می‌کنند. از اینرو با خارج شدن ترانسفورماتور قدرت از شبکه برق بدلیل زمان بر بودن تعمیرات و جایگزینی ترانسفورماتور جدید که ناشی از روند تامین بودجه و زمان ساخت و هزینه بالای آن می باشد مدیریت طول عمر ترانسفورماتور اهمیت می یابد. جهت افزایش طول عمر یک ترانسفورماتور بررسی شرایط عایقی آن مهم می باشد. عمر یک ترانسفورماتور معادل با عمر کاغذ عایقی آن است که عواملی مانند رطوبت و حرارت باعث کاهش طول عمر آن می‌شود. حرارت ایجاد شده در عایق متناظر با بار ترانسفورماتور می‌باشد. ازینرو تعیین مقدار

معادله قانون دوم فیک به روش المان محدود و توسط نرم افزار Comsol مشخصه کاهشی میزان رطوبت درون عایق (خشک کردن کاغذ) در طول زمان را برای عایق های با ضخامت های مختلف بدست آورد. سپس با مقایسه نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایشی بدست آمده جهت کاهش اختلاف بین نتایج از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه سازی ضرایب استفاده کرد و ضرایب جدیدی را بدست آورد. در ادامه با استفاده از ضرایب بدست آمده یک معادله جدید برای ضریب انتشار ارائه داد که وابسته به ضخامت، دما و مقدار رطوبت موجود درون عایق می باشد. معادله جدید را برای دماها و ضخامت های مختلف بررسی کرد و نتایج شبیه سازی قابل قبولی را ارائه داد.

با توجه به اینکه تغییرات رطوبت بین عایق کاغذی و روغن ترانسفورماتور در حال کار یک فرآیند دینامیکی می باشد در همین راستا در این مقاله جهت شبیه سازی تغییرات مقدار رطوبت در عایق کاغذی ترانسفورماتور در ابتدا با استفاده از معادله دینامیکی قانون دوم فیک برای انتشار رطوبت و حل آن به روش تفاضل محدود توسط نرم افزار Matlab R13 به بررسی نحوه انتشار و جذب رطوبت در نمونه روغن-کاغذ پرداخته شده است، سپس این روند را در نمونه آزمایشگاهی ترانسفورماتور با سیستم عایقی روغن-کاغذ و نصب یک سنسور رطوبت سنج درون روغن مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- تاثیر رطوبت بر عایق های ترانسفورماتور

در این بخش به بررسی تاثیر رطوبت بروی عایق روغن و کاغذ ترانسفورماتور به صورت مجزا می پردازیم.

### ۱-۲- تاثیر رطوبت بر روغن ترانسفورماتور

به طور کلی، رطوبت تاثیر کمی بر روغن ترانسفورماتور دارد. نتایج نشان می دهد که هدایت روغن در ابتدا بسته به مقدار رطوبت دارد [۹،۱۰]. تاثیرهای رطوبت بوسیله اثرهای مقادیر نمک، اسیدها، قلیایی ها، الکل ها یا هر ماده ای که در محلول آب یونیزه شود افزایش می یابد [۱۱]. آب در روغن معدنی ترانسفورماتور ها خطر تشکیل حباب را افزایش میدهد و زمانی که آب از سلولز دفع میشود غلظت مکانی گازها در روغن افزایش میابد [۱۲].

### ۲-۲- تاثیر رطوبت بر کاغذ

به طور کلی، عمر مکانیکی عایق پرسبورد با دوبرابر شدن مقدار آب به نصف کاهش می یابد [۱۳]. نرخ زوال حرارتی کاغذ متناسب با مقدار آب آن است [۱۴]. تخلیه های الکتریکی می تواند در قسمت ولتاژ بالا به علت اختلال تعادل رطوبتی به موجب یک ولتاژ تخلیه جزئی کم در شروع و تخلیه جزئی با شدت بالاتر اتفاق افتد [۱۵]. رطوبت تاثیر زیادی بروی افزایش هدایت الکتریکی کاغذ دارد.

روش دیگر اندازه گیری مقدار رطوبت درون کاغذ با استفاده از تعیین مقدار رطوبت نمونه روغن می باشد که از نمودارهای حالت تعادل Oommen استفاده می شود. روش سوم استفاده از تست های دی الکتریک PDC<sup>۳</sup> (روش جریان های پلاریزاسیون-دپلاریزاسیون) و FDS<sup>۴</sup> (روش طیف سنجی فرکانسی) می باشد که با اندازه گیری جریان های پلاریزاسیون و دپلاریزاسیون و تعیین شرایط عایقی مقادیر رطوبت در مقایسه با اندازه گیری های قبلی تعیین میگردد که این تست به صورت آفلاین و با خارج شدن ترانسفورماتور از شبکه امکان پذیر است. با توجه به اینکه رفتار رطوبت بین کاغذ و روغن عایقی فرایند دینامیکی است بررسی این تغییرات به صورت آفلاین (در ترانس در حال کار) در مقایسه با روش های آفلاین مانند تست های PDC و غیره به علت هزینه کمتر و بدون خارج کردن ترانسفورماتور از شبکه از جایگاه بالاتری برخوردار است.

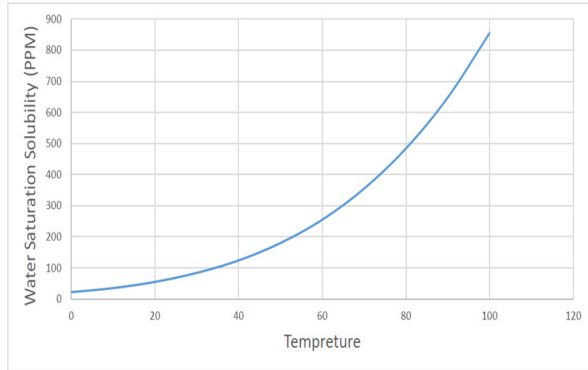
بیشترین اصطلاحاتی که در فرآیند شبیه سازی خروج رطوبت از سطح کاغذ مورد استفاده قرار می گیرند، ضریب انتشار خارج شدن رطوبت از سطح عایق کاغذی که با  $D^5$  نمایش داده می شود و واحد آن  $(m^2/S)$  می باشد و همچنین میزان رطوبت درون عایق کاغذی که با نماد  $C^6$  نمایش داده می شود و بر حسب درصد رطوبت نسبت به وزن خشک کاغذ عایقی بیان می شود. تغییرات رطوبت درون عایق کاغذی به وسیله ی یک فرایند انتشار که می تواند توسط قانون دوم فیک مدل شود و کنترل گردد، و پارامتر اصلی آن ضریب انتشار می باشد. ضریب انتشار عایق کاغذی بسته به دما و میزان رطوبت درون کاغذ دارد [۱-۳].

مدل های شبیه سازی برای مشخص کردن مناسب ترین شرایط خشک کردن، زمان مورد نیاز برای تکمیل فرایند خشک کردن، و مقادیر مورد انتظار رطوبت در پایان فرایند مورد استفاده قرار می گیرد. مقادیر دقیق ضریب انتشار برای اجرای مدل ها مورد نیاز است، همچنین دقت مدل بسیار وابسته به مقادیر مناسب ضریب انتشار می باشد [۲،۴].

در زمینه ارائه معادلات دینامیکی برای ضریب انتشار Asem، How، و Foss معادلاتی برای کاغذ عایقی ترانسفورماتور بدون حضور روغن ارائه داده اند [۳،۴].

ضریب انتشار برای کاغذ آغشته شده با روغن توسط Guidi، Fullerton و Foss بدست آمده است [۲،۳].

در مقاله های [۷-۵] گارسیا با بررسی فرآیند خروج رطوبت از عایق های آغشته به روغن تحت حرارت های مختلف و بدست آوردن نمودار تجربی از طریق فرایند نمونه گیری کارل فیشر (میزان رطوبت درون کاغذ با گذشت زمان) و مقایسه نتایج بدست آمده با مدل شبیه سازی شده ضرایب جدیدی برای عایق های مختلف بدست آورده است. جهت انجام این آزمایش گارسیا در [۸] از یک سیستم خشک کن جهت رطوبت زدایی کاغذ و روغن استفاده کرده است. گارسیا با حل



شکل ۲: میزان حلالیت آب در دماهای مختلف با توجه به داده های Shell در حالت اشباع

با توجه به اطلاعات فوق و مشخص بودن رطوبت نسبی و دما مقدار ppm رطوبت درون روغن بصورت زیر بدست می آید. باید دقت شود مقدار اشباع لحظه‌ای مربوط به هر دما در محاسبات لحاظ شود.

$$W_c = RH\%/100 \times W_s \quad (2)$$

که  $W_c$  میزان آب در واحد PPM در دمای T، RH% رطوبت نسبی روغن و  $W_s$  مقدار اشباع آب در روغن در دمای لحظه‌ای می باشد.

## ۵- شبیه سازی دینامیکی انتشار رطوبت از سطح کاغذ عایقی بصورت نرم‌افزاری و آزمایشگاهی

در این بخش ابتدا چگونگی روند خروج رطوبت از سطح کاغذ به روغن عایقی به صورت نرم‌افزاری توسط قانون دوم فیک انجام شده است، سپس همین روند در آزمایشگاه توسط نمونه آزمایشی انجام و نتایج بدست آمده با هم مقایسه شده‌اند.

### ۵-۱- رفتار دینامیکی رطوبت بین کاغذ و روغن

زمانی که ترانسفورماتور برای یک مدت زمان طولانی در یک دمای مشخص کار می‌کند، بخش عایق کاغذی و روغن آن در یک حالت تعادل رطوبتی با یکدیگر قرار دارند که در این حالت با اندازه‌گیری رطوبت درون روغن می‌توان با استفاده از نمودارهای حالت تعادل مانند نمودارهای ارائه شده توسط اومن به مقدار رطوبت درون کاغذ دست یافت. حال زمانی که ثبات حرارتی درون عایق بندی ترانسفورماتور بر اثر تغییرات بار وجود نداشته باشد تعادل رطوبتی بین روغن و کاغذ شکل نمی‌گیرد و نمودارهای تعادل رطوبت کاربردی نخواهند داشت. در این حالت با بررسی دینامیکی تغییر رطوبت درون عایق کاغذی و اعمال تغییر حرارت در مدل شبیه سازی شده می‌توان روند خروج رطوبت از سطح کاغذ را مورد بررسی قرار داد.

همچنین جابجایی مقدار کم رطوبت با جریان الکتریکی در سطوح کاغذ-روغن مرتبط است [۱۶،۱۷].

### ۳- ثابت زمانی رسیدن به حالت تعادل

تعادل بین مقدار آب درون عایق کاغذ و روغن ترانسفورماتور بصورت گسترده توسط بسیاری از نویسندگان مورد مطالعه قرار گرفته است، نمودارهای حالت تعادل بدست آمده توسط آنها رابطه بین مقدار آب در کاغذ و مقدار آب در روغن را برای دماهای متفاوت نشان می‌دهد. بنابراین با مشخص بودن مقدار یکی از آنها بدست آوردن مقدار دیگری امکان پذیر می‌باشد. رسیدن به شرایط تعادل فرآیندی طولانی می‌باشد. این زمان بین ساعت‌ها تا روزها بسته به میزان تغییرات حرارت متغیر است. همچنین زمان تعادل به جهت انتشار رطوبت هم بستگی دارد. زمان مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل در عایق کاغذ-روغن به صورت تقریبی توسط معادله (۱) تخمین زده شده است.

$$\tau = \frac{4d^2}{\pi^2 D} \quad (1)$$

### ۴- سنسور رطوبت سنج

جهت اندازه‌گیری میزان رطوبت درون روغن عایقی از حسگر رطوبت سنج خازنی ساخت شرکت IST که با نام تجاری MK33 عرضه شده استفاده شده است. این حسگر در شکل ۱ نشان داده شده است.



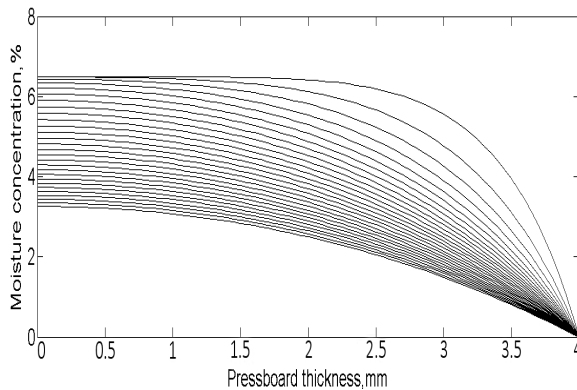
شکل ۱: سنسور رطوبت سنج روغن MK33

با توجه به قرار گیری سنسور و مانیتورینگ رطوبت در روغن تغییرات به صورت لحظه‌ای در هر دقیقه قابل ثبت می‌باشد. از این رو خروجی سنسور بر اساس رطوبت نسبی در حالت اشباع روغن می‌باشد. جهت بدست آوردن میزان رطوبت روغن برحسب ppm، نخست با تعیین نوع روغن منحنی اشباع آن بدست می‌آید. روغن استفاده شده در آزمایش از نوع Shell می‌باشد بنابراین منحنی اشباع رطوبت داده های Shell را به صورت شکل ۲ رسم می‌کنیم.

## ۵-۲- مدل سازی دینامیکی خروج رطوبت از کاغذ بصورت نرم‌افزاری

برای این منظور یک مدل تک بعدی جهت شبیه سازی فرآیند خروج رطوبت از سطح کاغذ عایقی ترانسفورماتور در نظر گرفته شده است. مدل شبیه سازی شده تخمین میزان رطوبت خارج شده از کاغذ عایقی را به صورت تابعی از زمان نشان می‌دهد.

با توجه به معادله های (۳) و (۴) بدلیل اینکه در فرآیند خروج رطوبت از کاغذ عایقی ضریب انتشار ثابت نمی‌باشد و خود به مقدار دما و میزان رطوبت کاغذ بستگی دارد، ازینرو حل تحلیلی این معادلات امکان پذیر نیست. در این مقاله با توجه به وجود روش های مختلف عددی برای حل معادلات، از روش تفاضل محدود استفاده شده است. با توجه به کدنویسی انجام شده در نرم افزار Matlab، با تعیین داده های ورودی معادله (۴) ضریب انتشار به صورت تابعی از میزان رطوبت و دما بدست می‌آید که با قرار دادن در معادله (۳) و حل معادله به صورت عددی مشخصه مکان-زمانی توزیع رطوبت  $C(x, t)$  برای یک ضخامت خاص عایق کاغذی و در طول مدت زمان مشخص بدست می‌آید. حل معادلات در نرم افزار Matlab R13 انجام شده است. شکل ۴ مشخصه مکان-زمان توزیع رطوبت در یک عایق کاغذی با ضخامت ۴ میلی متر و در مدت زمان ۲۸ ساعت را نشان می‌دهند.



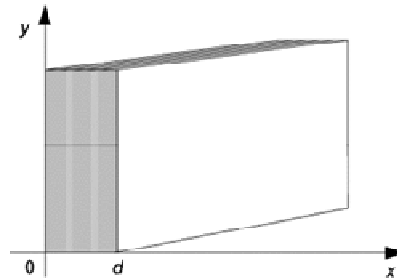
شکل ۴: مشخصه مکان-زمانی توزیع رطوبت در عایق کاغذی با ضخامت ۴ میلی‌متر

مشخصه  $C(x, t)$  بدست آمده بیانگر این نکته است که توزیع رطوبت در سطح عایق کاغذی نسبت به لایه های درونی آن بیشتر است، به عبارت دیگر در عایقی به ضخامت ۴ میلی متر میزان رطوبت در سطح عایق ( $x=0$ ) در یک زمان مشخص در مقایسه با ضخامت درون آن ( $x=4$ ) از سطح بالاتری برخوردار است. هر خط از منحنی بدست آمده در شکل بیانگر یک بازه‌ی زمانی یک ساعته می‌باشد که با بدست آوردن میانگین هریک از منحنی ها میزان رطوبت درون عایق کاغذی در آن ساعت مشخص می‌شود. شکل ۵ مشخصه  $C(t)$  که مدت زمان خشک شدن کاغذ از مقدار اولیه ۳/۵ درصد به مقدار ۰ درصد را برای مدت زمان ۲۸ ساعت نشان می‌دهد.

هدف در این تحقیق پیدا کردن مشخصه مکان-زمانی رطوبت در طول فرآیند انتشار رطوبت می‌باشد. با فرض یک دستگاه مختصات  $x, y, z$  در شکل ۳ که متناظر با ضخامت، عرض و طول نمونه می‌باشد و انتشار رطوبت در امتداد ضخامت نمونه می‌تواند توسط قانون دوم فیک در یک بعد به صورت زیر بیان شود [۱۸]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3)$$

که  $C$  میزان رطوبت در عایق کاغذی برحسب درصد در امتداد محل ضخامت نمونه  $x(m)$  در زمان  $t(s)$  می‌باشد.  $D$  ضریب انتشار رطوبت ( $m^2/s$ ) می‌باشد.



شکل ۳: مختصات عایق کاغذی برای انتشار رطوبت [۱۸]

Guidi یک معادله جامع برای ضریب انتشار بدست آورد. این ضریب به صورت گسترده در مقالات فنی برای توصیف دینامیکی رطوبت در عایق ترانسفورماتور استفاده شده است که این ضریب انتشار وابسته به میزان رطوبت  $C$  و دمای  $T$  به صورت زیر می‌باشد [۲]:

$$D(C, T) = D_0 e^{kC + E_a(1/T_0 - 1/T)} \quad (4)$$

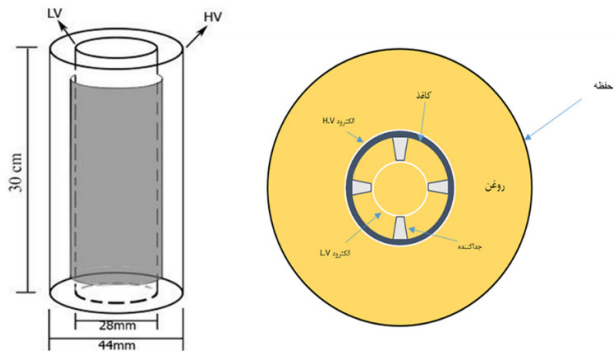
$D_0$  ضریب انتشار در دمای  $T_0$ ، و زمانیکه میزان رطوبت نزدیک به صفر است.  $k$  ثابت میزان رطوبت و  $E_a$  ثابت دمایی است. Foss و Giudi ضرایب انتشار برای کاغذ عایقی آغشته با روغن را بدست آوردند که در جدول ۱ قابل مشاهده است [۲، ۳]:

جدول ۱: ضرایب بدست آمده توسط Giudi و Foss برای عایق کاغذی آغشته به روغن [۲] و [۳]

نویسنده	k		
Giudi	0.5	6	7700
Foss	0.5	1	8074

برای بدست آوردن مشخصه مکان-زمانی رطوبت در عایق کاغذی از روش‌های عددی مانند تفاضل محدود و المان محدود میتوان استفاده کرد.

شکل ۷ چگونگی قرارگیری کاغذ بین الکترودها را از نمای بالا و روبرو نشان می‌دهد.

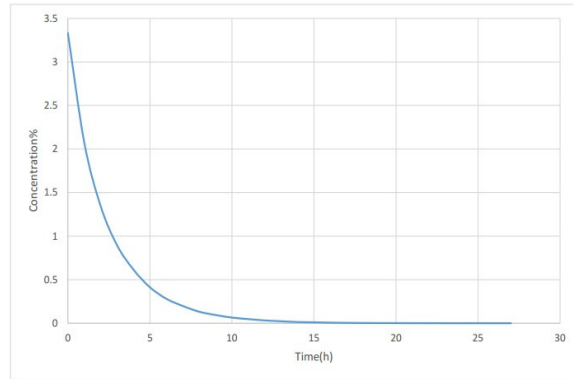


شکل ۷: قرارگیری کاغذ بین دو الکترودها

### ۵-۳-۱- نحوه انجام آزمایش

مخزن به اندازه ۳ لیتر از روغن پُر شده است. لازم است که مقداری فضای خالی جهت تغییرات حجمی روغن بر اثر گرم کردن آن در نظر گرفته شود. میزان رطوبت درون عایق کاغذ را برحسب درصدی از وزن خشک آن محاسبه می‌کنند. به همین منظور با قراردادن کاغذ در محیط گرم به مدت چند ساعت و با خشک شدن کاغذ، وزن کاغذ خشک را بدست می‌آوریم. در ادامه با قرارگیری هیتر و دماسنج درون محفظه روغن کنترل دما به صورت یک سیکل بسته انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه روغن در محل هیتر بصورت نقطه‌ای گرم می‌شود، جهت رفع این مشکل با قراردادن پمپ سیرکوله، روغن در تمام نقاط گردش کرده و توزیع رطوبت به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد. همچنین مخزن توسط درپوش های بالا و پایین محصور شده است و کابل‌های خروجی از بالای محفظه خارج می‌شوند. جهت عدم تبادل حرارتی سیستم با محیط از عایق حرارتی استفاده شده است.

به طور کلی با افزایش دما در چند مرحله بین ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد به سیستم، میزان جابجایی رطوبت از کاغذ به روغن اندازه گیری می‌شود. روند آزمایش به گونه ای است که در چند دمای مختلف میزان رطوبت درون کاغذ در حالت تعادل بدست آورده می‌شود. اندازه گیری رطوبت در سیستم فقط از طریق تغییرات رطوبت در عایق روغن صورت می‌گیرد، از این رو با اندازه گیری رطوبت توسط سنسور رطوبت سنج، میزان رطوبت کاغذ در حالت تعادل، قبل و بعد از تعادل اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به روند افزایشی حرارت در سیستم و متناسب با آن افزایش میزان رطوبت در عایق روغن در حالت قبل و بعد از تعادل و با در نظر گرفتن این نکته که با افزایش حرارت میزان رطوبت موجود در کاغذ کاهش یافته است و معادل آن وارد روغن می‌شود، مقدار رطوبت درون کاغذ در این نقاط تخمین زده می‌شود.

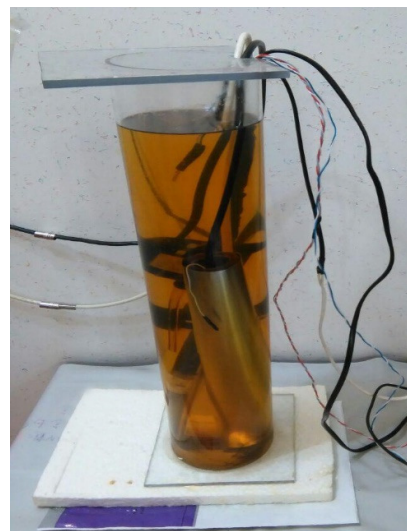


شکل ۵: مشخصه خشک شدن کاغذ عایقی بر حسب زمان  $C(t)$

### ۵-۳-۲- بررسی تغییرات رطوبت در نمونه آزمایشگاهی

در این بخش در ابتدا به تشریح مدل ترانسفورماتور ارائه شده در این مقاله پرداخته سپس به نحوه انجام آزمایش و ویژگی‌های آن اشاره خواهد شد.

جهت انجام آزمایش استفاده از یک مدل دقیق جهت شبیه‌سازی ترانسفورماتور و شرایط محیطی آن امری ضروری می‌باشد. جهت انجام این امر با توجه به ساختار ترانسفورماتور، الکترودهای  $L.V$ ،  $H.V$ ، کاغذ و روغن اجزای اصلی این سیستم می‌باشند. از این رو با توجه به تغییرات دمایی زیاد در سیستم نیاز به یک محفظه مقاوم در برابر افزایش دما داریم که جهت تحقق این امر از یک محفظه استوانه‌ای با جنس پلکسی گلاس استفاده شده است. در ادامه از یک لوله استوانه‌ای با جنس مس به عنوان الکتروده  $L.V$  و یک لوله آلومینیومی به عنوان الکتروده  $H.V$  بکار گرفته شده است. شکل ۶ نمای کلی از محفظه و تجهیزات قرار گرفته درون آن را نشان می‌دهد. کاغذ عایقی بین دو الکتروده و توسط جداکننده نگه داشته شده و از هیتر و دماسنج جهت کنترل دما و پمپ سیرکوله جهت گردش روغن استفاده شده است.



شکل ۶: مدل ترانسفورماتور طراحی شده در این تحقیق

## ۶- مقایسه نتایج خروج و جذب رطوبت از کاغذ عایقی بصورت نرم‌افزاری و آزمایشگاهی

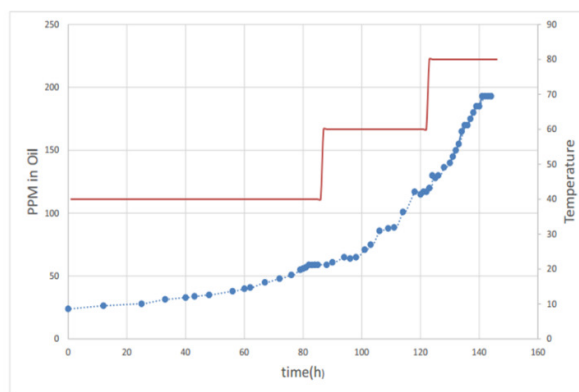
نمودار حرارتی اعمال شده به سیستم به ترتیب در سه دمای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه واقع می‌شود، که خروج رطوبت از عایق کاغذی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، ثابت زمانی رسیدن به حالت تعادل و ضریب انتشار برای سه دمای مذکور محاسبه شده است و در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲: ثابت زمانی رسیدن به حالت تعادل برای انتشار یکطرفه

دمای T°C	T=۴۰	T=۶۰	T=۸۰
ثابت زمانی $\tau$	۸۰ ساعت	۲۷ ساعت	۱۱ ساعت
ضریب انتشار D			

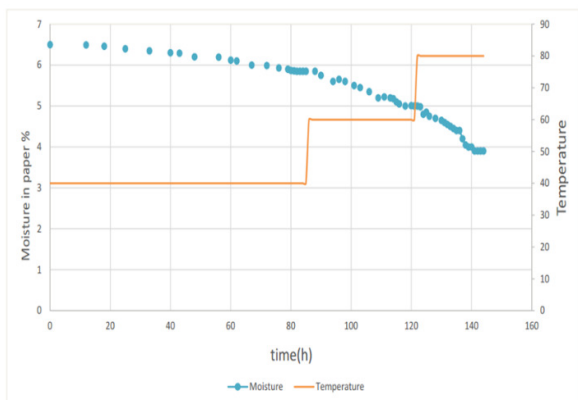
با مشاهده جدول ۲ می‌توان دریافت که در دماهای پایین انتشار رطوبت از سطح عایق در مقایسه با دماهای بالاتر کمتر می‌باشد، از این رو با افزایش دما زمان رسیدن به حالت تعادل کاهش می‌یابد، البته ثابت زمانی تعادل به صورت غیر مستقیم با میزان رطوبت درون کاغذ در ارتباط است.

تغییرات رطوبت در روغن توسط سنسور رطوبت سنج اندازه‌گیری شده است، با توجه به افزایش حرارت، رطوبت درون روغن افزایش یافته است که امری بدیهی است. شکل ۸ نمودار تغییرات رطوبت را در روغن بر حسب ppm و در بازه زمانی مشخص شده نشان می‌دهد.



شکل ۸: تغییرات رطوبت در روغن بر حسب PPM با افزایش دما

باتوجه به بخش اول نمودار حرارتی که به صورت افزایش دما می‌باشد روند خروج رطوبت از سطح عایق کاغذی در نقاط تعادل، قبل و بعد از آن اندازه‌گیری و بدست آمده است که در شکل ۹ قابل مشاهده است.

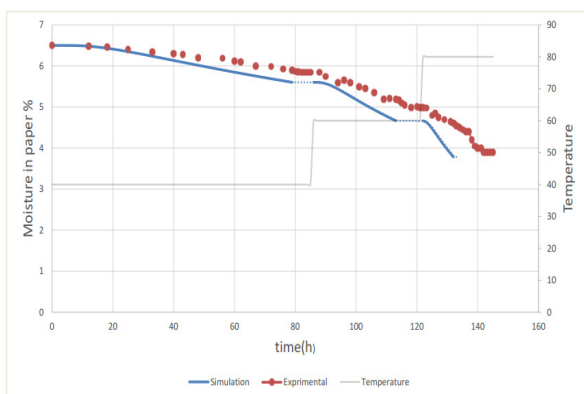


شکل ۹: روند خروج رطوبت با افزایش دما

در شکل ۹ در ابتدا با مشخص بودن میزان رطوبت درون کاغذ در حالت تعادل که در این آزمایش ۶/۵٪ می‌باشد، ثابت زمانی رسیدن به تعادل در دمای ۴۰ درجه بدست می‌آید که ۸۰ ساعت است، سپس دمای ۴۰ درجه به میزان ۸۵ ساعت به سیستم اعمال شده، همانطور که مشخص است تقریباً در ۱۰ ساعت پایانی سیستم به تعادل رسیده است. همین روند برای دو دمای ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد هم انجام شده است.

### ۶-۱- شبیه‌سازی روند خروج رطوبت از عایق کاغذ

در این بخش شرایط دمایی ایجاد شده در آزمایش و همچنین میزان رطوبت در شبیه‌سازی اعمال شده است. ضرایب معادله دینامیکی از ضرایبی که در جدول ۱ ارائه شد استفاده شده است. شکل ۱۰ روند خروج رطوبت از کاغذ عایقی را به صورت نرم‌افزاری و آزمایشگاهی نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: شبیه‌سازی روند خروج رطوبت از کاغذ عایقی

همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است نتایج بدست آمده برای شبیه‌سازی رطوبت در سه دما انجام شده است که در مقایسه با نتایج عملی از سطح پایین‌تری برخوردار است. این اختلاف بوجود آمده بدلیل ضرایبی است که در معادله استفاده شده است. بطور کلی نتایج شبیه‌سازی با وجود اختلاف روند خروج رطوبت را به خوبی نشان می‌دهد.

## ۷- نتیجه گیری

یکی از دلایلی که می‌تواند موجب خسارت به ترانسفورماتور شود وجود رطوبت بیش از حد در عایق های آن می‌باشد. رطوبت موجود در سیستم عایقی در دو بخش روغن و کاغذ قرار دارد. اکثر رطوبت در عایق کاغذی ترانسفورماتور می‌باشد. با افزایش حرارت رطوبت داخل کاغذ به سمت روغن انتشار می‌یابد. با داشتن ضریب انتشار و دمای کاری ترانسفورماتور میزان رطوبت جابجا شده از کاغذ به روغن قابل محاسبه است. همچنین با در دست بودن ضریب انتشار و محاسبه کل رطوبت جابجا شده میزان رطوبت موجود در کاغذ بصورت لحظه‌ای قابل محاسبه است.

جهت بررسی وضعیت عایقی استفاده از مانیتورینگ آنلاین امکان ارزیابی لحظه‌ای شرایط عایقی را فراهم می‌کند و از نظر هزینه و زمان صرفه است.

در این تحقیق روند آزمایش به دو بخش شبیه‌سازی کامپیوتری و آزمایشگاهی تقسیم شد. مدل‌سازی تغییرات رطوبت در سیستم عایقی کاغذ-روغن با استفاده از معادلات ریاضی ارائه شده توسط فیک و حل آن به روش تفاضل محدود امکان پذیر شد.

با اعمال یک سیکل حرارتی بروی نمونه آزمایشی به صورت افزایشی از ۴۰ به ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد تغییرات رطوبت در روغن و کاغذ بدست آمد. در آخر با شبیه‌سازی کامپیوتری سیکل حرارتی افزایشی از ۴۰ به ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد نتایج خروج رطوبت از کاغذ بدست آمد و با نتایج حاصل شده از آزمایش عملی مقایسه گردید. نتایج شبیه سازی تئوری دارای اختلاف کمی با نتایج حاصل از آزمایشگاه می‌باشد و همانطور که گفته شد این اختلاف به دلیل ضرایب و بهینه سازی آن است، اما به طور کلی نتایج بدست آمده قابل قبول هستند و نشان می‌دهد بخوبی می‌توان روند خروج رطوبت را مدل سازی کرد.

## مراجع

- paper insulation, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.53, pp.279-286, 2013.
- [6] D.F.Garcia, R. Villaroel, B.Garcia, J.C.Burgos, a Review of moisture diffusion coefficients in transformer solid insulation-part2: experimental validation of the coefficients, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol.29, No.2, 40-49, 2013.
- [7] R. Villaroel, D.F.Garcia, B.Garcia, J.C.Burgos, Diffusion coefficient in transformer pressboard insulation part2: mineral oil impregnated, Vol.21, No.1, pp.394-402, 2013.
- [8] R. Villaroel, D.F.Garcia, B.Garcia, J.C.Burgos, Diffusion coefficient in transformer pressboard insulation part 1: non impregnated pressboard, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.21, No.1, pp.360-368, 2013.
- [9] A.Washabaugh, A.V.Mamishev, Y.Du, M.Zahn, Dielectric measurements of semi-insulating liquids and solids, in International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, (Rome, Italy), pp.381-384, 1996.
- [10] S.Itahashi, H.Mitani, T.Sato, and M.Sone, State of water in hydrocarbon liquids and its effect on conductivity, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.2, pp.1117-1122, 1995.
- [11] R.Neimanis, Dielectric diagnostics of oil-paper insulated current transformers, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, Master's thesis, 1997.
- [12] W.A.Fessler, W.J.McNutt, T.O.Rouse, Bubble formation in transformers, Tech.Rep.EL5384, EPRI, Palo Alto, CA, 1987.
- [13] F.M.Clark, Factors affecting the mechanical deterioration of cellulose insulation, *Transactions of Electrical Engineering*, Vol.61, pp.742-749, 1942.
- [14] J.Fabre and A.Pichon, Deterioration processes and products of paper and oil Application to transformers, in Proceedings of the International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE), Paris, Paper No.137, 1960.
- [15] H.P.Moser, Transformerboard. St.Johnsbury, Vermont: Special print of Scientia Electrica, translated by EHV-Weidmann Lim, 1979.
- [16] A.J.Morin, M.Zahn, and J.R.Melcher, Fluid electrification measurements of transformer pressboard/oil insulation in a Couette charger, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.26, pp.870-901, 1991.
- [17] A.P.Washabaugh, P.A.vonGuggenberg, M.Zahn, J.R.Melcher, Temperature and moisture transient flow electrification measurements of transformer pressboard/oil insulation using a Couette facility, in Proceeding of The 3rd International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, Vol.2, pp.867-870, 1991.
- [18] Z.Zhang, J.Li, R.Liao, S.Grzybowski, Moisture diffusion in vegetable oil-paper insulation, *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, Trondheim, pp.1-4, 2011.
- [1] Y. Du, M. Zahn, B.C. Lesieutre, A.V. Mamishev, S.R. Lindgren, Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems, *IEEE Electric Insulation Magazine*, Vol.15, No.1, pp.11-20, 1999.
- [2] W.W. Guidi, H.P. Fullerton, Mathematical methods for prediction of moisture take-up and removal in large power transformers, in: Presented at Proceedings of IEEE Winter Power Meeting, 1974.
- [3] S.D.Foss, Power Transformer Drying Model, Report prepared for General Electric Company, Large Transformer Operation, Pittsfield, MA, and Consolidated Edison Corp., New York, Ny, by Dynamic Systems, Pittsfield, MA, 1987.
- [4] S.A. Asem, F.A. Howe, Drying of power-transformer insulation. *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol.129, No.5, pp.228-232, 1982.
- [5] D.F.Garcia, B.Garcia, J.C.Burgos, Determination of moisture diffusion coefficient for oil-impregnated kraft-

## زیر نویس ها

- 1 finite difference method
- 2 Parts per million
- 3 Polarisation and Depolarisation Currents
- 4 Frequency domain spectroscopy
- 5 Diffusion
- 6 Concentration
- 7 High voltage
- 8 Low voltage

## رزومه



**مهدی دانشگور** در سال ۱۳۶۹ در شهرستان دزفول متولد شده است. ایشان تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی (۱۳۹۱) و کارشناسی ارشد (۱۳۹۵) برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول اخذ کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان

در زمینه مانی‌تورینگ ترانسفورماتورهای قدرت و راه اندازی نرم موتورهای الکتریکی (Drive) می‌باشد.



**علیرضا ستایش مهر** در سال ۱۳۴۸ در شهرستان دزفول متولد شده است. ایشان تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت از دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۷۳)، کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت از

دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۷۵) و دکتری مهندسی برق - قدرت از دانشگاه هانوفر آلمان (۱۳۹۱) اخذ کرده است. ایشان از سال ۱۳۹۲ به عنوان استادیار در دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول مشغول به فعالیت می‌باشند. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه سیستم‌های فشار قوی بخصوص مانی‌تورینگ ترانسفورماتورهای قدرت است.

