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

مهدی دانشور*[۱]، علیرضا ستایش مهر[۲]

*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[۱] توسط نرم افزار Matlab R13 به بررسی نحوه‌ی 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 می-دهد 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

ترانسفورماتورهای قدرت نقش کلیدی در سیستم های قدرت بازی می‌کنند. از اینرو با خارج شدن ترانسفورماتور قدرت از شبکه برق بدلیل زمان بر بودن تعمییرات 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 رطوبت در کاغذ دغدغه‌ی مهم بهره برداران جهت مدیریت طول عمر یک ترانسفورماتور می‌باشد . در آغاز بهره برداری ازیک ترانسفورماتور معمولا رطوبت کمتر از ۰/۵ درصد است ، اما در شرایط بهره برداری نامناسب ممکن است به ۸-۴ ٪ افزایش یابد .معمولا در ترانسفورماتورها عمده حجم رطوبت در عایق سلولزی ترانسفورماتور قرار دارد. برای مثال در یک ترانس ۱۵۰مگا ولت آمپر، ۴۰۰ کیلو ولت ، ۸۰۰۰۰ لیتر روغن، ۷ تن کاغذ و رطوبت ۲۰ppm[۲] 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 مقداررطوبت به روش آزمایش کارل فیشر می‌باشد که در عمل بکارگیری این روش برای ترانسفورماتورها امکان پذیر نسیت.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-26 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.6.4 ]

روش دیگر اندازه گیری مقدار رطوبت درون کاغذ با استفاده از تعیین مقدار رطوبت نمونه روغن می‌باشد که از نمودارهای حالت تعادل Oommen استفاده می‌شود . روش سوم استفاده از تست های دی الکتریک PDC[۳](روش جریان های پلاریزاسیون-دپلاریزاسیون) و FDS[۴] (روش طیف سنجی فرکانسی) می‌باشد که با اندازه‌گیری جریان‌های پلاریزاسیون و دپلاریزاسیون و تعیین شرایط عایقی مقادیر رطوبت در مقایسه با اندازه‌گیری‌های 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 آنلاین( 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 می‌گیرند، ضریب انتشار خارج شدن رطوبت از سطح عایق کاغذی که با D[۵] نمایش داده می‌شود و واحد آن ($m^2/S$ ) می‌باشد و همچنین میزان رطوبت درون عایق کاغذی که با نماد C[۶] نمایش داده می‌شود و بر حسب درصد رطوبت نسبت به وزن خشک کاغذ عایقی بیان می‌شود. تغییرات رطوبت درون عایق کاغذی به وسیله‌ی یک فرایند انتشار که می‌تواند 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 [۳-۱].

مدل‌های 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 می‌گیرد. 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 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 می‌باشد. 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 نحوه‌ی 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 می‌پردازیم.

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

به طور کلی، رطوبت تاثیر کمی بر روغن ترانسفورماتور دارد. نتایج نشان می‌دهد 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 مکانی‌گازها 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 می‌یابد [۱۳]. نرخ زوال حرارتی کاغذ متناسب با مقدار آب آن است [۱۴] . تخلیه های الکتریکی می‌تواند در قسمت ولتاژ بالا به علت اختلال تعادل رطوبتی به موجب یک ولتاژ تخلیه جزیی کم در شروع و تخلیه جزیی با شدت بالاتر اتفاق افتد [۱۵]. رطوبت تاثیر زیادی بروی افزایش هدایت الکتریکی کاغذ دارد.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-26 ]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.6.4 ]

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

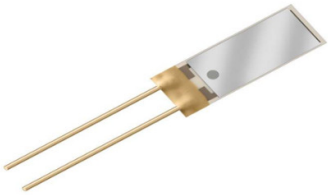
## ۳- ثابت زمانی رسیدن به حالت تعادل

تعادل بین مقدار آب درون عایق کاغذ و روغن ترانسفورماتور بصورت گسترده توسط بسیاری از نویسنده ها 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 می-دهد. 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 ساعت ها تا روزها بسته به میزان تغییرات حرارت متغییر 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.

$$\tau = \frac{4d^2}{\pi^2 D} \qquad (۱)$$

## ۴- سنسور رطوبت سنج

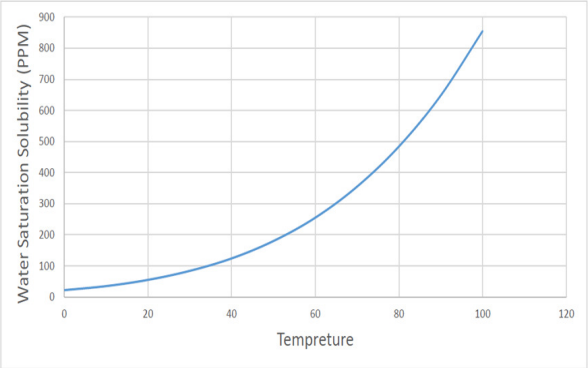
جهت اندازه‌گیری میزان رطوبت درون روغن عایقی از حسگر رطوبت سنج خازنی ساخت شرکت IST که با نام تجاری MK33 عرضه شده استفاده شده است. این حسگر در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل۱: 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 شکل۲ رسم می-کنیم.




شکل۲: 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 می‌آید. باید دقت شود مقدار اشباع لحظه‌ای مربوط به هر دما در محاسبات لحاظ شود.

$$W_c = RH\%/100 \times W_s \qquad (۲)$$

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

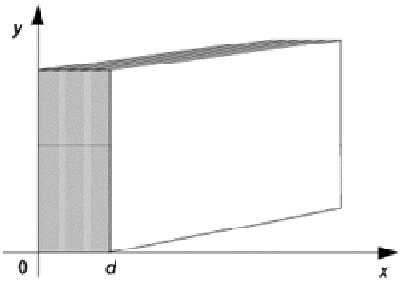
زمانی که ترانسفورماتور برای یک مدت زمان طولانی در یک دمای مشخص کار می‌کند، بخش عایق کاغذی و روغن آن در یک حالت تعادل رطوبتی با یکدیگر قرار دارند که دراین حالت با اندازه-گیری رطوبت درون روغن می‌توان با استفاده از نمودارهای حالت تعادل مانند نمودارهای ارائه شده توسط اومن به مقدار رطوبت درون کاغذ دست یافت. 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.

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-26 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.6.4 ]

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x}\right) \qquad (۳)$$

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




شکل۳: 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 می باشد[۲]:

$$D(C,T) = D_0 e^{kC+E_a(1/T_0-1/T)} \qquad (۴)$$

$D_0$ ضریب انتشار در دمای $T_0$ ، و زمانیکه میزان رطوبت نزدیک به صفر است.$k$ ثابت میزان رطوبت و $E_a$ ثابت دمایی است.

Giudi و Foss ضرایب انتشار برای کاغذ عایقی آغشته با روغن را بدست آوردند که در جدول ۱ قابل مشاهده است[۲،۳]:

جدول۱: ضرایب بدست آمده توسط Guidi و Foss برای عایق کاغذی آغشته به روغن [۲]و[۳]

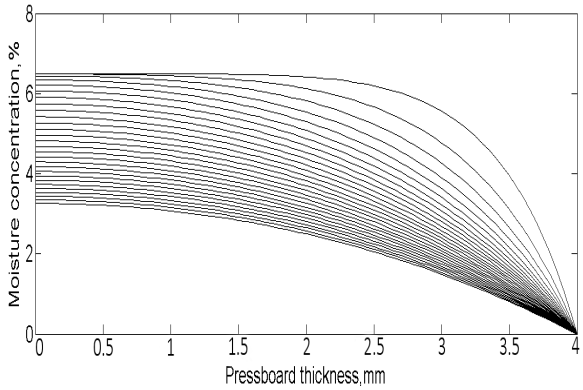
| نویسنده | k | | |
|---|---|---|---|
| Giudi | 0.5 | 6 | 7700 |
| Foss | 0.5 | 1 | 8074 |

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

## 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.

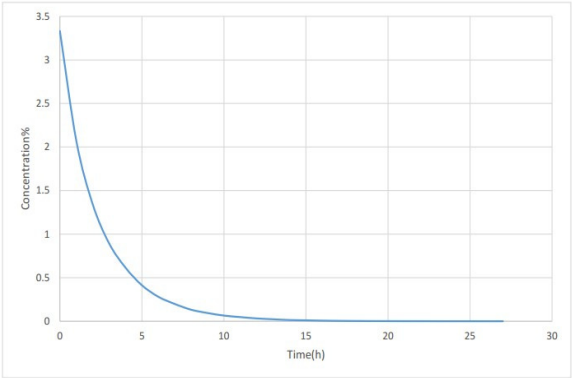
با توجه به معادله های (۳) و (۴) بدلیل اینکه در فرایند خروج رطوبت از کاغذ عایقی ضریب انتشار ثابت نمی‌باشد و خود به مقدار دما و میزان رطوبت کاغذ بستگی دارد، ازینرو حل تحلیلی این معادلات امکان پذیر نیست. در این مقاله با توجه به وجود روش های مختلف عددی برای حل معادلات، از روش تفاضل محدود استفاده شده است. 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 افزارMatlab R13 انجام شده است. شکل۴ مشخصه مکان-زمان توزیع رطوبت در یک عایق کاغذی با ضخامت ۴ میلی متر و در مدت زمان ۲۸ ساعت را نشان می‌دهند.




شکل۴: مشخصه مکان-زمانی توزیع رطوبت در عایق کاغذی با ضخامت ۴میلی‌متر

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=۰) در یک زمان مشخص در مقایسه با ضخامت درون آن (x=۴) 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. شکل۵ مشخصه C(t) که مدت زمان خشک شدن کاغذ از مقدار اولیه ۳/۵درصد به مقدار ۰ درصد را برای مدت زمان ۲۸ ساعت نشان می‌دهد.

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-26 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.6.4 ]

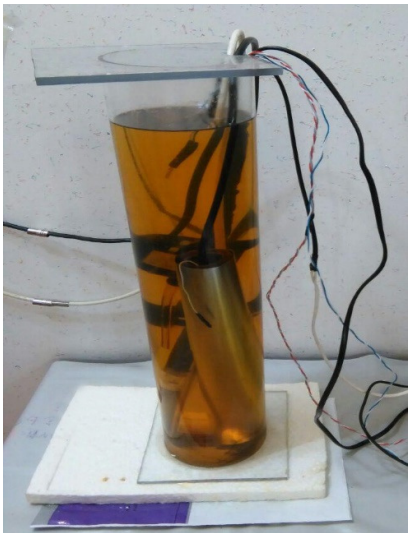



شکل۵: مشخصه خشک شدن کاغذ عایقی بر حسب زمان C(t)

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

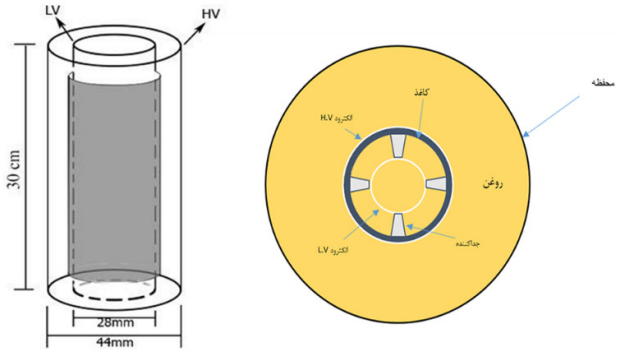
در این بخش در ابتدا به تشریح مدل ترانسفورماتور ارائه شـده در این مقاله پرداخته سپس به نحوه انجام آزمایش و ویژگی‌های آن اشاره خواهد شد.

جهت انجام آزمایش استفاده از یک مدل دقیق جهت شبیه‌سـازی ترانسفورماتور و شرایط محیطی آن امری ضروری می‌باشد. جهت انجام این امر با توجه به ساختار ترانسفورماتور، الکتـرودهـای H.V[۷]، L.V[۸]، کاغذ و روغن اجزای اصلی این سیستم می‌باشند. از این رو با توجه بـه تغییرات دمایی زیاد در سیستم نیاز به یـک محفظـه مقـاوم در برابـر افزایش دما داریم که جهت تحقق این امر از یک محفظه اسـتوانه‌ای بـا جنس پلکسی گلاس استفاده شده است. در ادامه از یک لوله استوانه‌ای با جنس مس به عنوان الکترود L.V و یک لوله آلومینیومی بـه عنـوان الکترود H.V بکار گرفته شده است. شـکل۶ نمـای کلـی از محفظـه و تجهیزات قرار گرفته درون آن را نشان می‌دهـد. کاغـذ عـایقی بـین دو الکترود و توسط جداکننده نگه داشته شده و از هیتر و دماسنج جهـت کنترل دما و پمپ سیرکوله جهت گردش روغن استفاده شده است.



شکل۶: مدل ترانسفورماتور طراحی شده در این تحقیق

شکل۷ چگونگی قرارگیری کاغذ بین الکترودها را از نمـای بـالا و روبرو نشان می‌دهد.




شکل۷: قرارگیری کاغذ بین دو الکترودها

### ۵-۳-۱- نحوه انجام آزمایش

مخزن به اندازه ۳ لیتر از روغـن پُـر شـده اسـت. لازم اسـت کـه 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 کاغـذ در محیط گرم به مدت چند ساعت و با خشک شدن کاغذ، وزن کاغـذ خشک را بدست می‌آوریم. در ادامه با قرارگیری هیتر و دماسـنج درون محفظه روغن کنترل دما به صورت یک سیکل بسته انجـام مـی‌گیـرد. باتوجه به اینکه روغن در محل هیتر بصـورت نقطـه‌ای گـرم مـی‌شـود، جهت رفع این مشکل با قراردادن پمپ سیرکوله، روغن در تمـام نقـاط گردش کرده و توزیع رطوبت به صـورت یکنواخـت صـورت مـی‌گیـرد. همچنین مخزن توسط درپوش های بالا و پایین محصور شـده اسـت و کابلهای خروجی از بالای محفظه خارج می‌شـوند. جهـت عـدم تبـادل حرارتی سیستم با محیط از عایق حرارتی استفاده شده است.

به طور کلی با افزایش دما در چند مرحله بـین ۲۰ تـا ۸۰ درجـه سانتی گراد به سیستم، میزان جابجایی رطوبت از کاغذ به روغن انـدازه گیری می‌شود. روند آزمـایش بـه گونـه ای اسـت کـه در چنـد دمـای مختلف میزان رطوبت درون کاغذ در حالت تعـادل بدسـت آورده مـی-شود. اندازه گیری رطوبت در سیستم فقط از طریق تغییرات رطوبت در عایق روغن صورت می‌گیرد، از این رو با انـدازه گیـری رطوبـت توسـط 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 قبـل و بعد از تعادل و با در نظر گرفتن این نکته که با افزایش حـرارت میـزان رطوبت موجود در کاغذ کاهش یافته است و معادل آن وارد روغن مـی شود، مقدار رطوبت درون کاغذ در این نقاط تخمین زده می‌شود.

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-26 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.6.4 ]

## ۶- مقایسه نتایج خروج و جذب رطوبت از کاغذ عایقی بصورت نرم‌افزرای 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.

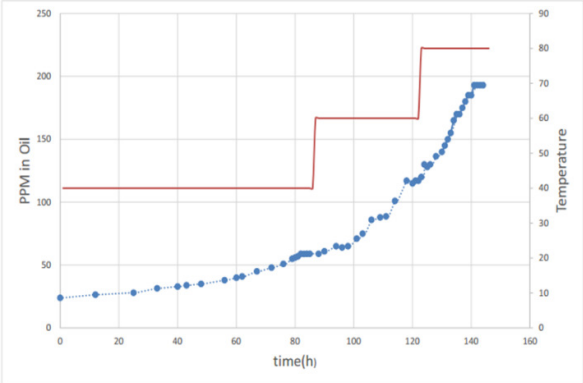
در ابتدا، ثابت زمانی رسیدن به حالت تعادل و ضریب انتشار برای سه دمای مذکور محاسبه شده است و در جدول۲ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول۲: ثابت زمانی رسیدن به حالت تعادل برای انتشار یکطرفه

| دما°C | T=۴۰ | T=۶۰ | T=۸۰ |
|---|---|---|---|
| ثابت زمانی τ | ۸۰ ساعت | ۲۷ ساعت | ۱۱ ساعت |
| ضریب انتشار D | | | |

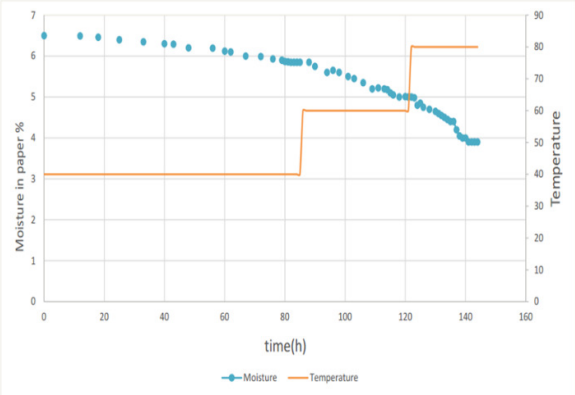
با مشاهده جدول۲ می‌توان دریافت که در دماهای پایین انتشار رطوبت از سطح عایق در مقایسه با دماهای بالاتر کمتر می‌باشد، از این رو با افزایش دما زمان رسیدن به حالت تعادل کاهش می‌یابد، البته ثابت زمانی تعادل به صورت غیر مستقیم با میزان رطوبت درون کاغذ در ارتباط است.

تغییرات رطوبت در روغن توسط سنسور رطوبت سنج اندازه گیری 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.




شکل۸: تغییرات رطوبت در روغن برحسب 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 شکل۹ قابل مشاهده است.

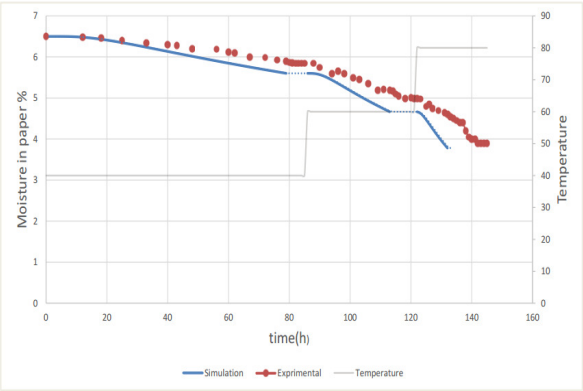



شکل۹: روند خروج رطوبت با افزایش دما

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 تقریبا 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- شبیه سازی 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 جدول۱ ارائه شد استفاده شده است. شکل۱۰روند خروج رطوبت از کاغذ عایقی را به صورت نرم‌افزاری و آزمایشگاهی نشان می‌دهد.




شکل۱۰: شبیه سازی خروج رطوبت از کاغذ عایقی

همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است نتایج بدست آمده برای شبیه سازی 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 شبیه سازی با وجود اختلاف روند خروج رطوبت را به خوبی نشان می‌دهد.

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-26 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.6.4 ]

## ۷- نتیجه‌گیری

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 بصرفه 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 می دهد بخوبی می‌توان روند خروج رطوبت را مدل سازی کرد.

## مراجع


[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. IEE 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 coeffient for oil-impregnated kraft-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 transfor,er solid insulation-part2:exprimental 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 measurments 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.Mitusi,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, Dielectic diagnostics of oil-paper insulated current transfoemers,School of Electrical and Computer Engineering,Chalamers 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,PaloAlto,CA.1987.

[13] F.M.Clark, Factors affecting the mechanical detrioration of cellulose insulation, Transactions of Electrical Engineering,Vol.61,pp.742-749.1942.

[14] J.Fabre and A.Pichon, Deterioration processes amd products of paper and oil Application to transformers,in Proceedings of the International Confrence on Large High Voltage Electric Systems(CIGRE),Paris,Paper No.137.1960.

[15] H.P.Moser,Transfomerboard.St.Johnsbury,Vermont:Special print of Scientia Electrica,tramslated by EHV-Weidmann Lim.1979.

[16] A.J.Morin,M.Zahn,and J.R.Melcher, Fluid electrification measurements of trnasformer 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 Coutette 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 Intenational Conference on Dielectric Liquids,Trondheim,pp.1-4.2011.


[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-26 ]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.6.4 ]

## زیرنویس‌ها

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

**مهـــدی دانشـــور** در ســـال ۱۳۶۹ در شهرستان دزفول متولد شده است. ایشـان تحصـیلات دانشـگاهی خـود را در مقطـع کارشناســـــی(۱۳۹۱) و کارشناســـــی ارشد(۱۳۹۵) برق- قـدرت از دانشـگاه آزاد اسـلامی واحـد دزفـول اخـذ کـرده اسـت. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌منـدی ایشـان در زمینـه مانیتورینـگ ترانسـفورماتورهای قـدرت و راه انـدازی نـرم موتورهای الکتریکی(Drive) می‌باشد.

**علیرضا ستایش مهر** در سال ۱۳۴۸ در شهرستان دزفول متولد شده است. ایشـان تحصـیلات دانشـگاهی خـود را در مقطـع کارشناســی مهندســی بــرق- قــدرت از دانشـــگاه فردوســـی مشـــهد (۱۳۷۳)، کارشناسی‌ارشد مهندسی بـرق- قـدرت از دانشگاه تربیت مـدرس (۱۳۷۵) و دکتـری مهندسـی بـرق- قـدرت از دانشگاه هانوفر آلمان(۱۳۹۱) اخذ کرده است. ایشان از سال ۱۳۹۲ بـه عنوان استادیار در دانشگاه صنعتی جندی شـاپور دزفـول مشـغول بـه فعالیت می‌باشند. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینـه سیستم های فشار قوی بخصوص مانیتورینگ ترانسفورماتورهای قدرت است.

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-26 ]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.6.4 ]

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-26 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.6.4 ]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015