



شبیه سازی الکترومغناطیسی - مکانیکی - حرارتی ترانسفورماتور هسته آمورف و مقایسه با ترانسفورماتورهای معمولی با استفاده از روش اجزاء محدود

علی حیدری¹، محمد علی تقی خانی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق قدرت، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

2- استادیار، مهندسی برق قدرت، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین

*قزوین، صندوق پستی 34148-96818، taghikhani@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 آبان 1396

پذیرش: 22 دی 1396

ارائه در سایت: 02 اسفند 1396

کلید واژگان:

ترانسفورماتور هسته آمورف

ترانسفورماتور هسته سیلیکونی

تلفات بی باری و باردار

تحلیل الکترومغناطیسی - مکانیکی - حرارتی

روش اجزاء محدود

چکیده

از آنجایی که یکی از مهم ترین و پرمصرف ترین تجهیزات شبکه برق ترانسفورماتورهای می باشند، بررسی عوامل مؤثر بر کاهش تلفات این تجهیزات از اهمیت ویژه ای برخوردار است. امروزه ترانسفورماتورهای هسته آمورف دارای جایگاه مهمی در بازار برق هستند چون در مقایسه با ترانسفورماتورهای با هسته ای از جنس استیل کریستالی سیلیکون حدود 60 تا 70 درصد تلفات بی باری را کاهش می دهند. به منظور بهبود در طراحی و همچنین صرفه جویی در وقت و هزینه برای تولید ترانسفورماتورهای هسته آمورف تحلیل عددی حالت بی باری همانند حالت باردار یکی از مهم ترین فاکتورها بوده که باید مورد توجه قرار گیرد. از طرفی دما نیز یکی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در عمر ترانسفورماتور است، چون افزایش دمای ترانسفورماتور باعث کاهش عمر ترانسفورماتور می شود. در این مقاله یک نمونه ترانسفورماتور 100kVA به وسیله کوپل نرم افزارهای انسیس ماکسول و انسیس فلونت شبیه سازی شده، تلفات بی باری و باردار مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج نشان می دهند که ترانسفورماتور هسته آمورف تلفات بی باری را در حدود 65 درصد در مقایسه با ترانسفورماتور هسته استیل کریستالی سیلیکون کاهش می دهد. همچنین تحلیل حرارتی انجام شده نشان می دهد که ترانسفورماتور هسته آمورف در مقایسه با ترانسفورماتور هسته سیلیکون در شرایط بی باری دمای پایین تری دارد.

Electromagnetic-Mechanical-Thermal Amorphous Core Transformer Simulation Compare to Conventional Transformers using FEM

Ali Heidary, Mohammad Ali Taghikhani*

Department of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

*P.O.B. 34148-96818 Qazvin, Iran, taghikhani@eng.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 November 2017
Accepted 12 January 2018
Available Online 21 February 2018

Keywords:

Amorphous Core Transformer
Silicon Core Transformer
No-load and Load losses
Electromagnetic-Mechanical-Thermal Analysis
Finite Element Method(FEM)

ABSTRACT

Since transformers are one of the most important and most used equipment in power network, investigating the factors which affect the loss of these equipments is of particular importance. Nowadays Amorphous metal core transformers have a significant place in today power market, since they exhibit 60-70% lower no-load losses compared to the Silicon crystalline steel core transformers. In order to enhance the design and cost and also to shorten the time to produce Amorphous metal core transformers, numerical analysis of the no-load as well as load conditions are of paramount importance and hence should be considered. On the other hand, temperature is one of the important and effective factors in transformer life, because increasing the transformer temperature leads to reduction of its rated life. In this paper, a 100 kVA unit transformer has been simulated by coupling ANSYS Maxwell and ANSYS FLUENT softwares and no-load and load losses are investigated. The results show that amorphous core transformer compared to Silicon Crystalline Steel core transformer reduce no-load losses about 65 percent. Furthermore, thermal analysis shows amorphous core transformer has lower temperature compared to the Silicon core transformer in no-load conditions.

1- مقدمه

بی باری در حدود 2 تا 3 درصد تولید است. بنابراین امری مشهود است که کاهش این تلفات یکی از فاکتورهای مهم در ترانسفورماتورهای توزیع می باشد. ترانسفورماتورهای توزیع با توجه به طراحی، نحوه ساخت، کیفیت مواد اولیه مورد استفاده و نوع بهره برداری دارای تلفات متفاوتی هستند [2]. امروزه با پیشرفت تکنولوژی ساخت و تأمین مواد اولیه مناسب می توان بیش از 70 درصد تلفات بی باری را کاهش داد. به کارگیری و استفاده بهینه از

رشد و پیشرفت در زمینه صنعت برق نیاز به استفاده مفید از انرژی و تمامی زمینه های فنی آن دارد [1]. در یک سیستم قدرت متعارف تلفات به دو بخش تلفات انتقال و تلفات توزیع تقسیم می شود، که حدود 2 تا 3 درصد مربوط به تلفات خط و 5 تا 6 درصد مربوط به تلفات ترانسفورماتور است. تلفات ترانسفورماتور به دو مؤلفه تلفات بی باری و باردار تقسیم شده که تلفات

Please cite this article using:

A. Heidary, M. A. Taghikhani, Electromagnetic-Mechanical-Thermal Amorphous Core Transformer Simulation Compare to Conventional Transformers using FEM, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 03, pp. 95-106, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بعدی ساده شده (فرض شده)، از طرف دیگر جزئیات دقیق ترانسفورماتور مدل سازی نشده است. در مرجع [15] مدل سازی حرارتی - جریان سیال دوبعدی سیم پیچ های فشارقوی یک ترانسفورماتور روغنی دیسکی در محیط نرم افزار کامسول صورت گرفته است. در این شبیه سازی نیز تحلیل الکترومغناطیسی ترانسفورماتور صورت نگرفته بلکه چگالی تلفات حجمی به صورت ثابت روی سیم پیچ ها فرض در نظر گرفته شده است. همچنین از تحلیل حرارتی هسته صحتی نشده، از شار پراکندگی و اثر جریان گردابی صرف نظر شده است. مدل سازی ترمودینامیکی - مغناطیسی یک ترانسفورماتور روغنی 80MVA بصورت عددی در محیط نرم افزار ای اف کد و انسیس جهت تخمین درجه حرارت در [16] انجام شده است. در این مرجع جهت تحلیل مغناطیسی از یک مدل ساده شده دوبعدی استفاده گردیده، از نتایج آن جهت استخراج مقدار تلفات بصورت ثابت (مانند مرجع [15]) استفاده شده است. در قسمت تحلیل حرارتی نیز فقط سیم پیچ های ترانسفورماتور به صورت دوبعدی مدل سازی گردیده، از تحلیل حرارتی روغن داخل تانک و همچنین از تحلیل کوپل الکترومغناطیسی - مکانیکی - حرارتی خبری نیست.

اگرچه مقالات زیادی تحلیل الکترومغناطیسی - حرارتی ترانسفورماتورها را انجام داده اند، اما همان طور که در بخش قبلی ذکر شد خیلی از این مقالات و مراجع یا ترانسفورماتورهای خشک با هسته سیلیکونی را بررسی کرده اند و یا ترانسفورماتورهای روغنی را با جزئیات کامل مورد بررسی قرار نداده، تنها مدل ساده ای از ترانسفورماتور را در نظر می گیرند بدون اینکه صحتی راجع به اثر درجه حرارت بر هسته داشته یا تأثیر جریان گردابی را بررسی نمایند. بنابراین در این مقاله به بررسی یک نمونه ترانسفورماتور توزیع روغنی با هسته ای از دو جنس مختلف سیلیکون و آمورف، بالحاظ کردن ساختار کلی و جزئیات ترانسفورماتور که شامل رادیاتورها، هسته، سیم پیچ ها، تانک روغن و ... می باشد، پرداخته شده است. همچنین در این مقاله پس از شبیه سازی الکترومغناطیسی ترانسفورماتور، به منظور تحلیل حرارتی ترانسفورماتور یک تحلیل عددی که شامل کوپل بین بخش حرارت، جریان سیال و بخش الکترومغناطیسی است، اعمال شده است. در این روش ساختار ترانسفورماتور که بخش ساکن (جامد) مسأله می باشد بطور همزمان با قسمت سیال (روغن) مسأله مورد تحلیل حرارتی قرار می گیرد. این موضوع در قسمت های بعدی مقاله تشریح خواهد گردید.

2- بررسی ویژگی های فلز آمورف در مقایسه با استیل کریستالی

سیلیکون

در دهه 1970 گرایش به ترانسفورماتورهای هسته آمورف افزایش پیدا کرد. در آن زمان بازده انرژی در سیستم های توزیع برق به صورت قابل قبولی در حال افزایش بود [17]. در اواسط دهه 90 میلادی این گرایش به دلیل کاهش هزینه انرژی افت پیدا کرد چون هزینه های داخلی ترانسفورماتور هسته آمورف بیشتر از ترانسفورماتور هسته استیل کریستالی سیلیکون است (فلز آمورف خیلی گران تر از استیل کریستالی سیلیکون است و از طرفی حد اشباع چگالی شار مغناطیسی فلز آمورف کمتر از استیل کریستالی سیلیکون می باشد که این موضوع باعث افزایش حجم ترانسفورماتور هسته آمورف شده در نتیجه افزایش هزینه را در پی خواهد داشت). به هر حال این هزینه ها در طول عملکرد ترانسفورماتور و با توجه به افزایش بازدهی قابل جبران خواهند بود. این روزها ترانسفورماتورهای هسته آمورف به شدت مورد توجه قرار گرفته اند و از نظر هزینه نیز با دیگر ترانسفورماتورها در حال رقابت هستند [4,5,18]. فلز آمورف به وسیله انجمادسازی سریع فاز مایع آلیاژ

ترانسفورماتورهای کم تلفات در شبکه های توزیع به جای احداث و توسعه نیروگاه، صرفه جویی قابل توجهی در سرمایه گذاری اولیه جهت احداث نیروگاه ها و توسعه شبکه های انتقال و توزیع و سوخت مصرفی ایجاد می کند. آزمایش ها نشان می دهند که کاهش تلفات بی باری در ترانسفورماتور باعث کاهش هزینه در ساخت و نگهداری ترانسفورماتور می شود. یکی از بهترین راه حل ها برای کاهش تلفات بی باری استفاده از ترانسفورماتورهای هسته آمورف است [3-5]. در فرآیند طراحی ترانسفورماتورها یکی از موضوع های مهم پیش بینی دقیق مکان نقطه داغ در ترانسفورماتور و به ویژه در هسته و سیم پیچ ها است. میزان دما در این تجهیزات به طور مستقیم بر روی عمر ترانسفورماتور تأثیرگذار است [6]. مکان نقطه داغ در ترانسفورماتورهای مختلف، متفاوت بوده، اندازه گیری دمای داخل ترانسفورماتور و نزدیک به سیم پیچ ها به راحتی قابل انجام نیست و برای انجام این کار از تجهیزات مخصوصی مانند میله های فیبر نوری استفاده می کنند [7].

در مرجع [8]، به بررسی ویژگی ها و مشخصات آلیاژهای آمورف پرداخته شده، بطوریکه سه نوع مختلف از آلیاژهای پر کاربرد آمورف انتخاب شده، ویژگی ها، رفتارهای مکانیکی، مغناطیسی و استقامت حرارتی این ترکیبات بررسی شده و مقایسه ای بین آن ها انجام می شود. طراحان ترانسفورماتورها با موضوع های مهمی مثل ارزیابی تلفات، قابلیت اطمینان بالا، هزینه و وزن کم روبه رو می باشند. بنابراین مهندسان طراح به منظور طراحی بهینه و بهبود عملکرد ترانسفورماتورها نیاز به روش ها و ابزارهای پیشرفته دارند. در [9] محاسبات مربوط به تلفات و شارهای مغناطیسی یک نمونه ترانسفورماتور توزیع سه فاز که هسته آن از جنس فلز آمورف می باشد، مورد مطالعه قرار گرفته با استفاده از روش اجزاء محدود به صورت دوبعدی شبیه سازی شده، مشخصات مغناطیسی آن مورد تحلیل قرار گرفته است. مرجع [10]، یک نمونه ترانسفورماتور توزیع نوع خشک را که ظرفیت توان آن 1MVA می باشد مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله ترانسفورماتور مذکور با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه سازی شده، مشخصات و ویژگی های مغناطیسی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله پارامترهای مهمی از جمله توزیع چگالی شار مغناطیسی، توزیع شار مغناطیسی، توزیع تلفات بی باری و بارداری هم به صورت گرافیکی نشان داده شده و هم به صورت عددی محاسبه شده است. مدل سازی حرارتی سیم پیچ های یک ترانسفورماتور 32MVA روغنی با استفاده از معادله هدایت گرمائی و روابط ساده شده ترمودینامیک در [11] ارائه شده است. در این مقاله تغییرات درجه حرارت نقطه داغ ترانسفورماتور نسبت به تغییرات بار در حالت خنک سازی اجباری مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [12] شبیه سازی دوبعدی الکترومغناطیسی - حرارتی یک ترانسفورماتور 50kVA روغنی با خنک سازی طبیعی در محیط نرم افزار انسیس ارائه شده است. در تحلیل حرارتی، معادله هدایت - همرفت حرارتی به همراه شرایط مرزی ساده شده برای سیم پیچ های ترانسفورماتور و روغن به صورت گذرا حل شده است. در این مرجع فقط درجه حرارت سیم پیچ های ترانسفورماتور بدست آورده شده، تغییرات درجه حرارت نقطه داغ نسبت به تغییرات بار، مورد بررسی قرار گرفته است. در [13] هم، تحلیل های الکترومغناطیسی و حرارتی یک نمونه ترانسفورماتور خشک 630 kVA بررسی شده است. مدل سازی الکترومغناطیسی - حرارتی ساده شده دوبعدی یک ترانسفورماتور خشک 4.92MVA در [14] انجام شده است. در این مقاله خواص حرارتی سیال، هسته و سیم پیچ ها، ثابت در نظر گرفته شده، شرایط مرزی به صورت دو

4- مدل ریاضی

همانگونه که اشاره شد تلفات هسته در ترانسفورماتور به دو بخش تلفات هیستریزس و تلفات جریان گردابی تقسیم می شود. تلفات هیستریزس تلفاتی است که در صورت برقرار شدن ترانسفورماتور (با یک ولتاژ و جریان متناوب در فرکانس شبکه قدرت) بدلیل مغناطیسی شدن و یا مغناطیس زدا شدن هسته (با توجه به نوع جنس هسته) ایجاد میگردد. اندازه این تلفات متناسب با مساحت حلقه ای بنام حلقه هیستریزس در نمودار B-H می باشد. تلفات جریان گردابی بخاطر وجود مقاومت الکتریکی هسته در اثر القاء (قانون فارادی) بوسیله شار مغناطیسی متغیر با زمان در هسته ایجاد می شود. البته تلفات جریان گردابی در سیم پیچها علی الخصوص سیم پیچ فشار ضعیف (به غیر از تلفات اهمی) نیز وجود دارد. توزیع این تلفات (با جریان) چه روی هسته و چه روی سیم پیچها یکنواخت نیست. بعنوان مثال چگالی جریان گردابی روی سطح سیم پیچها نسبت به عمق (داخل سیم پیچها) بیشتر است. برای اینکه بتوان توزیع درجه حرارت در ترانسفورماتور را بدست آورد، باید علت اصلی پدید آمدن گرما را که همانا چگالی جریان الکتریکی می باشد در نقاط مختلف آن در دست داشت. برای داشتن چگالی جریان الکتریکی، بایستی شدت میدان الکتریکی را با استفاده از تحلیل الکترومغناطیسی معادلات ماکسول (قوانین آمپر و فارادی) در نقاط مختلف ترانسفورماتور بدست آورد. با دانستن مقدار ولتاژ و مقدار مقاومت سیم پیچها در ترانسفورماتور و با حل معادلات ماکسول، شدت میدان الکتریکی بدست آمده، از روی آن چگالی جریان الکتریکی محاسبه شده به عنوان منبع گرمایی در معادله انرژی (مربوط به قسمت ساکن یعنی ترانسفورماتور) از آن استفاده می شود. قسمت اصلی تلفات بی باری ترانسفورماتور به هسته و کیفیت آن بستگی مستقیم دارد. بنابراین به منظور محاسبه تلفات هسته، مقدار چگالی شار در هر المان از هسته از تحلیل میدان مغناطیسی بدست آورده می شود. از روی مدل سازی سیم پیچها تلفات بارداری که شامل تلفات مسی و تلفات جریان گردابی است بدست می آید. تلفات جریان گردابی نیز به مقدار شار ناشی وابسته است. قوانین آمپر و فارادی حاکم بر ترانسفورماتور بر حسب پتانسیل برداری مغناطیسی در سه بعد که در واقع همان اثر القائی جریان الکتریکی را مطرح می کنند عبارتند از:

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (1)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s = \sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} V \right) + \vec{J}_s \quad (2)$$

که در آن A پتانسیل برداری مغناطیسی (Tm)، V پتانسیل اسکالر الکتریکی (V)، E شدت میدان الکتریکی (Vm^{-1})، J چگالی جریان الکتریکی (Am^{-2})، σ ضریب هدایت الکتریکی ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$) و μ قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی (TmA^{-1}) می باشند. با در نظر گیری شرط کولمب برای واگرایی و فرض شرایط خطی خواهیم داشت:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right) = \vec{J}_s \quad (3)$$

با حل معادله (3) برای A مقدار E با استفاده از رابطه (2) در هر نقطه از ترانسفورماتور قابل محاسبه خواهد بود. برای تحلیل حرارتی ترانسفورماتور بایستی مقدار تلفات بدست آمده (بر حسب E) از تحلیل الکترومغناطیسی در معادله حرارتی ترانسفورماتور قرار داده شود:

$$k_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \sigma |\vec{E}|^2 = 0 \quad (4)$$

آهن-سیلیسیم-بور تهیه می شود که برخلاف استیل کریستالی سیلیکون داری ساختار اتمی نامنظم است [8,17,19]. نبود این نظم در ساختار اتمی فلز آمورف باعث کاهش تلفات هسته برخلاف استیل سیلیکون شده، همینطور حلقه هیستریزس فلز آمورف در مقایسه با استیل کریستالی سیلیکون کوچک تر می باشد (همان طور که میدانیم تلفات هسته ترانسفورماتور به دو بخش تلفات هیستریزس و تلفات جریان گردابی تقسیم شده، اندازه تلفات هیستریزس توسط ناحیه ای که حلقه هیستریزس در نمودار B-H در برمی گیرد تعیین می گردد). تلفات جریان گردابی در هسته با افزایش مقاومت الکتریکی آلیاژ فلز آمورف کاهش پیدا می کند. با توجه به ساختار اتمی نامنظم فلز آمورف و مواد حل شده زیاد در این فلز مسیر حرکت الکترون ها محدود است (این در مورد استیل سیلیکون صادق نیست) که این موضوع موجب افزایش مقاومت الکتریکی می شود. از طرفی ضخامت خیلی کم ورقه های آلیاژ فلز آمورف در مقایسه با ورقه های استیل سیلیکون نیز منجر به افزایش مقاومت الکتریکی می شود. در نتیجه، بالا بودن مقاومت الکتریکی باعث کمینه شدن تلفات جریان گردابی در هسته می گردد. علاوه با توجه به ساختار اتمی فلز آمورف از آنجایی که حد اشباع چگالی شار مغناطیسی فلز آمورف پایین است این موضوع باعث می شود برای تنظیم چگالی شار مغناطیسی در هسته، لایه های هسته را افزایش دهند که منجر به افزایش حجم ترانسفورماتور شده در نتیجه هزینه داخلی ساخت هر واحد ترانسفورماتور افزایش پیدا می کند.

3- تلفات بی باری و بارداری در ترانسفورماتور

موضوعی که در روند طراحی ترانسفورماتورها به شدت مورد توجه قرار می گیرد، کمینه کردن تلفات است که این تلفات به دو بخش تلفات بی باری و بارداری تقسیم می شود. تلفات بی باری که به تلفات هسته یا تلفات آهنی نیز معروف است، مقدار توان فعالی است که در طی فرآیند مغناطیس شوندگی (برق دار کردن) هسته ترانسفورماتور هدر می رود [20]. چون اکثر ترانسفورماتورهای توزیع، همیشه در حال مغناطیس شدن هستند، تلفات بی باری در تمام زمان ها وجود دارد، چه زمانی که بار به ترانسفورماتور متصل است و چه زمانی که بار به ترانسفورماتور متصل نیست. هنگامی که بخشی از بار به ترانسفورماتور متصل است، زمانی است که تلفات بی باری بیشترین نسبت تلفات را شامل می شود. در مقالات متعددی تلفات بی باری ترانسفورماتورهای توزیع هسته آمورف در مقایسه با تلفات بی باری ترانسفورماتورهای استیل سیلیکونی مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد [5,17,20,21]. بطور معمول وقتی ترانسفورماتورهای توزیع در گستره 30 تا 40 درصد بیشینه مقدار بار عمل می کنند تلفات بی باری بر تلفات بارداری چیره است اما از این گستره به بالا تلفات بارداری به شدت افزایش پیدا می کند. در این مقاله برای مدل سازی حالت بی باری، به سیم پیچ های فشارقوی (سیم پیچ های اولیه) ولتاژ نامی اعمال می شود، در حالی که سیم پیچ های فشار ضعیف (ثانویه) باز هستند. در این حالت جریان منتهجه در سیم پیچ های اولیه فقط درصدی از جریان نامی است. بنابراین هیچ تلفات دیگری (در سیم پیچ ها یا دیگر بخش ها) بر روی تلفات بی باری تأثیرگذار نیست. تلفات بارداری مربوط به توانی است که ترانسفورماتور هنگامی که سیم پیچ های ثانویه اتصال کوتاه شده اند از منبع می کشد که در این حالت باید ولتاژی که بر روی اولیه قرار دارد کاهش پیدا کرده جریان ها به مقدار نامی خود برسند.

همچنین شرایط بی باری ترانسفورماتور انجام می شود. در جدول 2 مقادیر مهم چگالی شار مغناطیسی آورده شده است.

در شکل های 2 تا 5 چگونگی توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته نشان داده شده است. بیشینه مقدار چگالی شار مغناطیسی را که از این شبیه سازی به دست آمده می توان در گوشه های داخلی هسته مشاهده کرد (محل اتصال ستون به یوغ). توزیع چگالی شار بطور واضح اثرات غیرخطی در نظر گرفتن ماده را نشان می دهد (شار مسیر کوتاه تر را انتخاب می کند)، در نتیجه تراکم شدیدی در گوشه های پنجره هسته مشاهده شده، که هسته را به سمت اشباع هدایت می کند. این موضوع با دقت در شکل های 3 و 5 که گوشه سمت چپ قسمت پایین هسته را نشان می دهد قابل توجه است. با مقایسه شکل های 6 و 7 مشاهده می گردد که با به کارگیری فلز آمورف در هسته ترانسفورماتور، تلفات بی باری حدود 65 درصد کاهش می یابد. در جدول 3 مقادیر مربوط به تلفات بی باری آورده شده است.

5-2- بار کامل (اتصال کوتاه)

شبیه سازی بعدی، محاسبه تلفات اهمی و گردابی مربوط به سیم پیچ ها در ترانسفورماتور می باشد. شکل های 8 و 9 توزیع چگالی شار در هسته در شرایط بار کامل برای دو حالت هسته آمورف و هسته استیل کریستالی

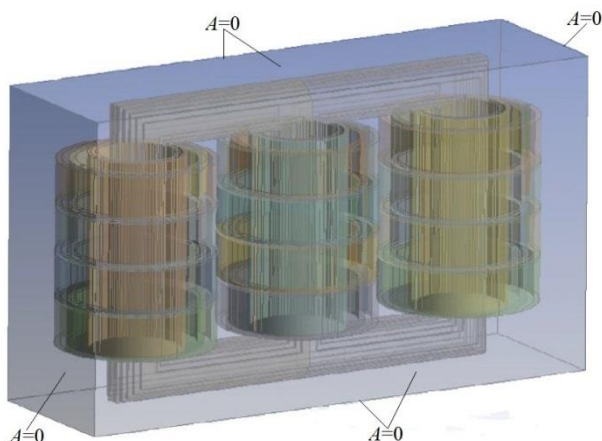


Fig. 1 Transformer electromagnetic boundary conditions

شکل 1 شرایط مرزی الکترومغناطیسی ترانسفورماتور

جدول 1 اطلاعات مربوط به طراحی ترانسفورماتور 100kVA

Table 1 100kVA Transformer design information

100(kVA)	توان نامی
60(Hz)	فرکانس
11(kV)	ولتاژ نامی سیم پیچ اولیه
400(V)	ولتاژ نامی سیم پیچ ثانویه
3.03(A)	جریان نامی سیم پیچ اولیه
34.133(A)	جریان نامی سیم پیچ ثانویه
Dyn11	نوع اتصال

جدول 2 مقادیر مهم چگالی شار مغناطیسی در شرایط بی باری

Table 2 Important values of magnetic flux density in no-load condition

فلز آمورف	استیل سیلیکون	
1.56	1.81	چگالی شار بیشینه
1.1	1.4	چگالی شار در ستون ها

این معادله بایستی به همراه دسته معادلات ناویه-استوکس¹ و انرژی (مربوط به سیال داخل ترانسفورماتور یعنی روغن) بصورت عددی با استفاده از روش اجزاء محدود یا روش حجم محدود حل گردند. این نوع روش تحلیل به نام تحلیل انتقال حرارت مزدوج² معروف می باشد. معادلات ناویه-استوکس شامل دسته معادلات اندازه حرکت و معادله پیوستگی سیال می باشند. شکل این دسته معادلات به همراه معادله گرما برای یک سیال تراکم ناپذیر یا بطور تقریبی تراکم ناپذیر (مثل روغن ترانسفورماتور) بدین گونه مطرح می شوند:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$\eta \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) - \rho \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\eta \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) - \rho \left(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\eta \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) - \rho \left(V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

$$k_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho C_p \left(V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (9)$$

که در آنها:

V_x : سرعت سیال در جهت x (ms^{-1})

V_y : سرعت سیال در جهت y (ms^{-1})

V_z : سرعت سیال در جهت z (ms^{-1})

P : فشار داخل سیال ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)

T : درجه حرارت (K)

η : لزجت سیال ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

ρ : چگالی سیال (kgm^{-3})

C_p : ظرفیت گرمایی ویژه سیال ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

k_f : هدایت گرمایی سیال ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

k_s : هدایت گرمایی قسمت های ساکن ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

5- شبیه سازی و تحلیل الکترومغناطیسی ترانسفورماتور 100kVA

اطلاعات طراحی برای ترانسفورماتور مورد نظر در جدول 1 آورده شده است. شبیه سازی آزمایش های بی باری و بار داری در این مقاله با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی و با حل کننده گذر³ در محیط نرم افزار انسیس- ماکسول⁴ انجام شده است. در مورد استیل مغناطیسی در فرکانس های صنعتی عمق نفوذ پذیری 2 میلی متر مقدار متعارفی است. از این رو با استفاده از افزایش حجم مش بندی می توان به جواب مطلوب رسید. برای تعیین شرایط مرزی تحلیل الکترومغناطیسی، پتانسیل برداری مغناطیسی A در فاصله ای از هر طرف از ترانسفورماتور برابر با صفر در نظر گرفته میشود (شکل 1 "1").

5-1- بی باری (مدار باز)

این آزمایش با در نظر گرفتن منحنی های غیر خطی B-H و منحنی های غیر خطی P-B (تلفات بر حسب چگالی شار) که توسط تولید کننده تهیه شده،

¹Navier-Stokes Equations

²Conjugate Heat Transfer

³Transient

⁴ANSYS Maxwell

از طرفی شکل های "10" و "11" تلفات هسته در شرایط بار کامل را نشان می دهند. با دقت در این شکل ها مشاهده می شود که در این شرایط ترانسفورماتور هسته آمورف نه تنها بیشینه تلفات هسته را کاهش نمی دهد،

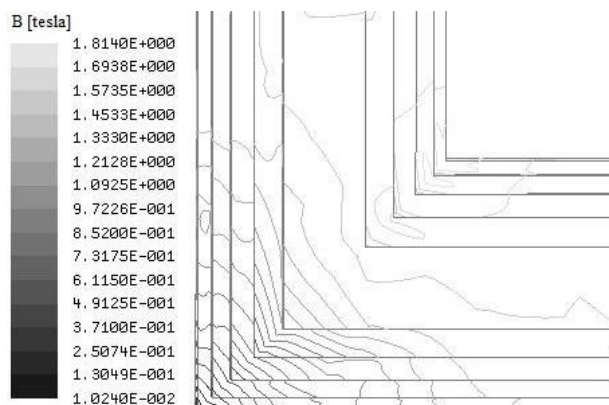


Fig. 5 Distribution of magnetic flux density in the lower left corner of the bottom of silicon core in no-load conditions

شکل 5 توزیع چگالی شار مغناطیسی در گوشه سمت چپ قسمت پایین هسته سیلیکونی در شرایط بی باری

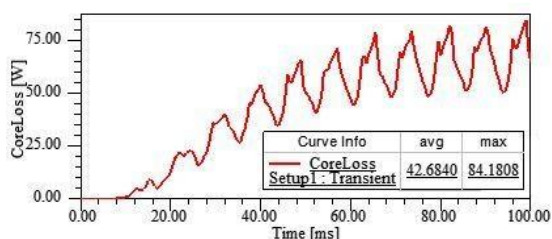


Fig. 6 Core loss versus time for amorphous core in no-load conditions

شکل 6 منحنی تلفات هسته برحسب زمان برای هسته آمورف در شرایط بی باری

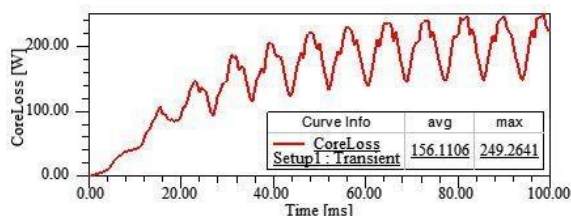


Fig. 7 Core loss versus time for silicon core in no-load conditions

شکل 7 منحنی تلفات هسته برحسب زمان برای هسته سیلیکونی در شرایط بی باری

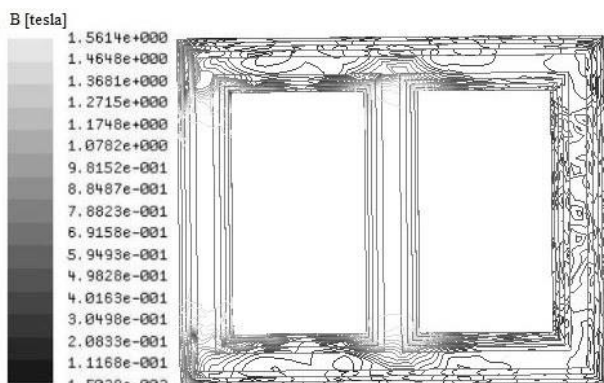


Fig. 8 Distribution of magnetic flux density at the amorphous core in full load conditions

شکل 8 توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته آمورف در شرایط بار کامل

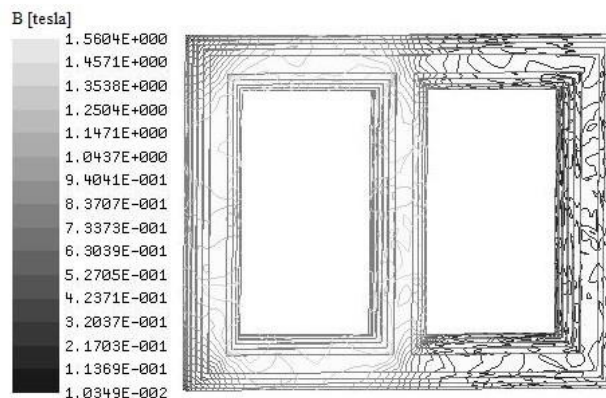


Fig. 2 Distribution of magnetic flux density at the amorphous core in no-load conditions

شکل 2 توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته آمورف در شرایط بی باری

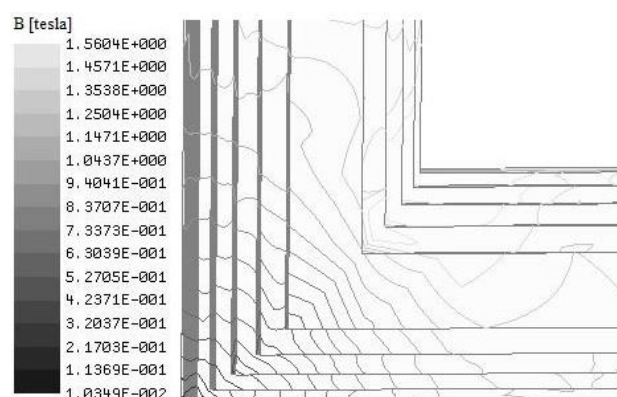


Fig. 3 Distribution of magnetic flux density in the lower left corner of the bottom of amorphous core in no-load conditions

شکل 3 توزیع چگالی شار مغناطیسی در گوشه سمت چپ قسمت پایین هسته آمورف در شرایط بی باری

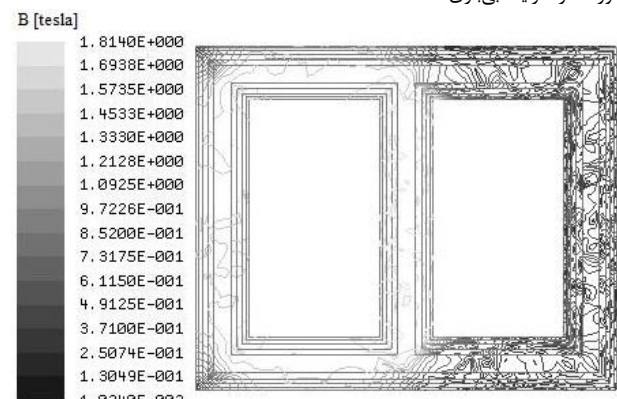


Fig. 4 Distribution of magnetic flux density at the silicon core in no-load conditions

شکل 4 توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته سیلیکونی در شرایط بی باری

جدول 3 تلفات هسته در شرایط بی باری

Table 3 Core losses in no-load conditions

تلفات هسته	درصد کاهش	بیشینه مقدار تلفات هسته (W)
66.23		249.26
		84.18
ترانسفورماتور هسته سیلیکونی		
ترانسفورماتور هسته آمورف		

سیلیکون را نشان می دهند.

الکترومغناطیسی از نرم افزار ماکسول به نرم افزار انسیس بایستی کویل بین دو نرم افزار برقرار گردد.

6-1- هندسه و مش بندی ترانسفورماتور

برای تحلیل فرآیندهای حرارتی و جریان سیال که در داخل ترانسفورماتور رخ می دهد نه تنها به مدل کردن هندسه ترانسفورماتور نیاز است بلکه باید تانک روغن و رادیاتورها نیز مدل سازی شوند. از آنجا که مدل سازی هندسه ترانسفورماتور و تجهیزات آن مانند هسته، سیم پیچ ها و تانک روغن پیچیده است و نیاز به زمان زیادی دارد، این کار توسط نرم افزار ماکسول انجام می شود و با برقراری کویل بین دو نرم افزار هندسه ترانسفورماتور و تجهیزات دیگر به نرم افزار انسیس منتقل می شود. به طور کلی یک ترانسفورماتور 100kVA ابعادی به بزرگی 0.905 متر، 0.335 متر و 0.835 متر دارد، که در شکل های "12" و "13" مشاهده می شود. رادیاتورها و تانک روغن ترانسفورماتور بصورت طبیعی توسط هوای اطراف خنک می شوند.

مش بندی مناسب ترانسفورماتور که دارای یک هندسه پیچیده است باید دارای تعداد زیادی جزء و گره باشد. در تحلیل مورد نظر برای انجام محاسبه دقیق و دستیابی به جواب معقول و دقیق تعداد اجزاء (المان ها) 3073784 و تعداد گره ها 663164 در نظر گرفته شده که در شکل "14" نشان داده شده است.

6-2- خواص مواد به کار گرفته شده و شرایط مرزی

یکی از مهم ترین مواردی که باید در شبیه سازی مورد توجه قرار گیرد، دقت

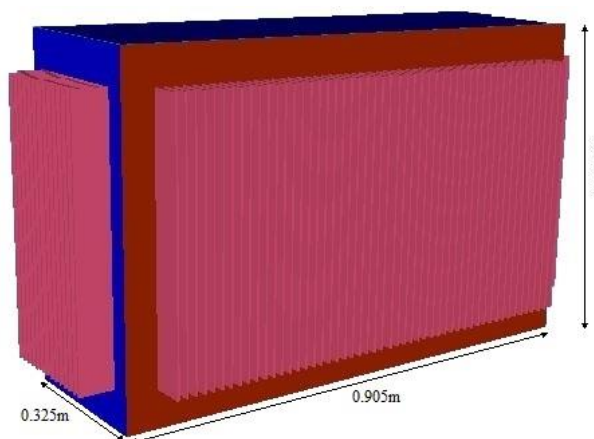


Fig. 12 Transformer oil tank

شکل 12 تانک روغن ترانسفورماتور

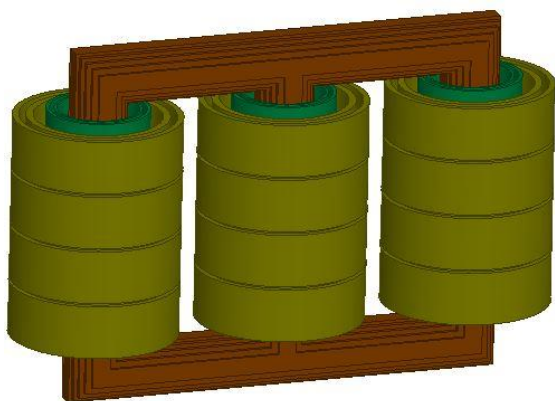


Fig. 13 100kVA Transformer

شکل 13 ترانسفورماتور 100kVA

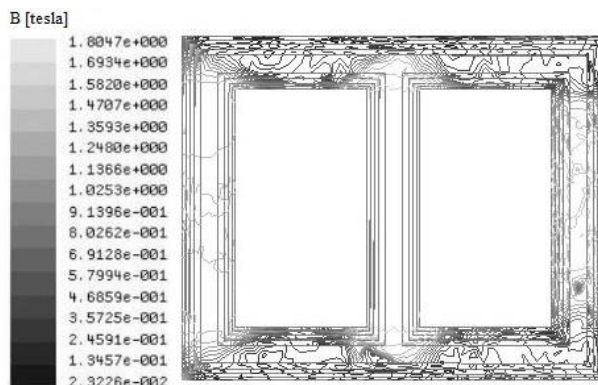


Fig. 9 Distribution of magnetic flux density at the silicon core in full load conditions

شکل 9 توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته سیلیکونی در شرایط بار کامل

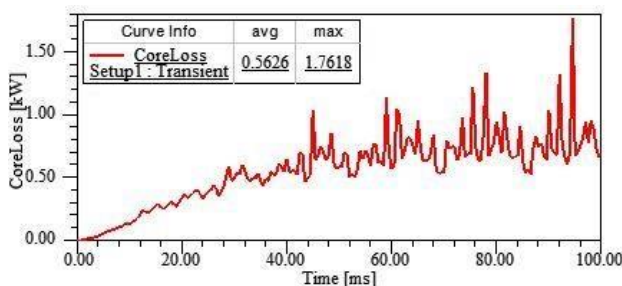


Fig. 10 Core loss versus time for amorphous core in full load conditions

شکل 10 منحنی تلفات هسته بر حسب زمان برای هسته آمورف در شرایط بار کامل

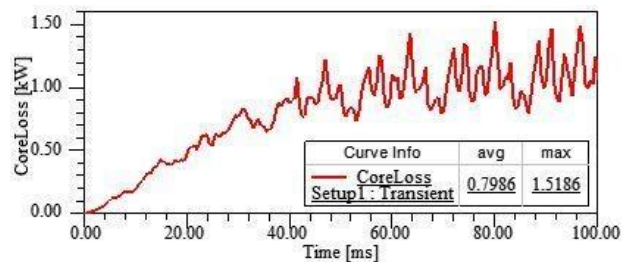


Fig. 11 Core loss versus time for silicon core in full load conditions

شکل 11 منحنی تلفات هسته بر حسب زمان برای هسته سیلیکونی در شرایط بار کامل

جدول 4 تلفات هسته در شرایط بار داری

Table 4 Core loss in full load conditions

بیشینه مقدار تلفات هسته (kW)	درصد افزایش تلفات هسته
1.5186	16.08
1.7618	

بلکه افزایش تلفات هسته را به دنبال دارد. اما در صورتیکه کاهش متوسط تلفات مد نظر باشد ترانسفورماتور هسته آمورف نسبت به ترانسفورماتور هسته سیلیکونی برتری دارد در جدول 4 مقادیر مربوط به تلفات بار کامل آورده شده است.

6- پیوند تحلیل الکترومغناطیسی- حرارتی-جریان سیال

برای انجام تحلیل حرارتی ترانسفورماتور از نرم افزار انسیس- فلوئنت¹ استفاده می شود. در این مرحله از شبیه سازی برای انتقال اطلاعات و نتایج

¹Fluent

میتوان همه خواص بغیر از لزجت را ثابت فرض نمود. جنس هسته ترانسفورماتور از دو فلز آمورف و استیل کریستالی سیلیکون، جنس سیم پیچ ها از فلز مس و جنس تانک ترانسفورماتور و رادیاتور آن از فلز آلومینیوم است. در چنین تحلیل هایی که فرآیند هدایت و همرفت حرارت وجود دارد باید شرایط مرزی مناسبی در نظر گرفته شود. بنابراین ضریب انتقال حرارت² دیواره های تانک روغن در شرایط بی باری (مدار باز) و بار کامل (اتصال کوتاه) باید اعمال شوند. در جدول 7 ضریب انتقال حرارت دیواره های تانک روغن در شرایط بی باری (مدار باز) و بار کامل (اتصال کوتاه) آورده شده است. در طی محاسبه ضریب انتقال حرارت دیواره های تانک میانگین دمای هوای اتاق در نظر گرفته شده است. شکل "15" شرائط مرزی روی تانک روغن ترانسفورماتور را نشان میدهد. روی دیواره های تانک بردار سرعت برابر صفر فرض میشود. از طرفی ضریب انتقال حرارت برای هر یک از دیواره های تانک روغن نیز مطابق جدول 7 اعمال میگردد.

3-6- نتایج شبیه سازی در شرایط بی باری (مدار باز) و بار کامل (اتصال کوتاه)

از آن جا که تلفات ترانسفورماتور بطور مستقیم روی درجه حرارت ترانسفورماتور تاثیر دارد، در شکل های "16" تا "19" مشاهده می شود که در شرایط بی باری (مدار باز) درجه حرارت ترانسفورماتور هسته استیل کریستالی سیلیکون از ترانسفورماتوری که هسته آن از جنس فلز آمورف است، بیشتر است، چون در تحلیل مغناطیسی نشان داده شد که در شرایط بی باری، ترانسفورماتور هسته آمورف تلفات را تا حدود 65 درصد کاهش می دهد. همان طور که در تحلیل مغناطیسی گفته شد در شرایط بار کامل در ترانسفورماتور هسته آمورف نه تنها تلفات کاهش پیدا نمی کند بلکه افزایش تلفات را به دنبال دارد که این افزایش تلفات در افزایش درجه حرارت نیز تاثیر خود را نشان می دهد. در شکل های "20" تا "23" توزیع دما مربوط به

جدول 7 ضریب انتقال حرارت ($W.m^{-2}.K^{-1}$) دیواره های تانک در شرایط بی باری و بار کامل [13]

شرایط اتصال کوتاه	شرایط مدار باز
دیواره بالایی تانک	5.5
دیواره پایینی تانک	4.8
دیواره های طرفین تانک	3.4
	3.8

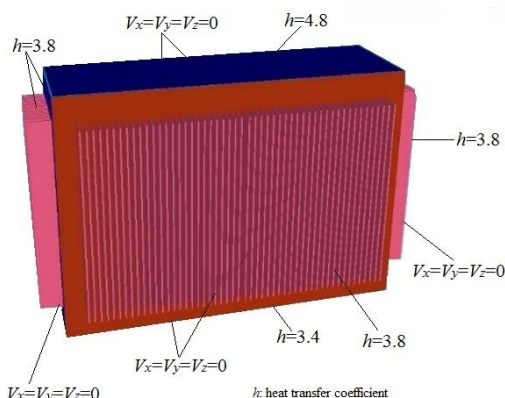


Fig. 15 Transformer no-load mechanical boundary conditions

شکل 15 شرائط مرزی مکانیکی ترانسفورماتور در بی باری



Fig. 14 Close view of transformer meshing

شکل 14 نمایی نزدیک از مش بندی ترانسفورماتور

در مدل سازی خواص مواد بکار گرفته شده است. در جدول 5 ویژگی های فلزات مورد استفاده در شبیه سازی آورده شده است. دمای محیط اطراف ترانسفورماتور 300 درجه کلوین یا 26.85 درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. در تحلیل حرارتی حاضر اثر تغییرات چگالی تلفات مسی بخاطر تغییرات دما نیز در نظر گرفته شده، $Q(W.m^{-3})$ چگالی تلفات و $\alpha_c(K^{-1})$ ضریب انبساط حرارتی¹ مس می باشند.

$$Q = Q_0(1 + \alpha_c \Delta T) \quad (10)$$

همان طور که قبلاً اشاره شد، برای خنک کردن ترانسفورماتور از روغن ترانسفورماتور استفاده می کنیم. چگالی (ρ)، ضریب هدایت گرمایی (k)، گرمای ویژه (C_p) و لزجت (η) روغن غیر خطی بوده و تابعی از درجه حرارت می باشند.

$$\eta = a_1 \exp\left(\frac{a_2}{T + 273}\right) \quad (11)$$

$$C_p = a_3 + a_4 T \quad (12)$$

$$\rho = a_5 + a_6 T \quad (13)$$

$$k = a_7 + a_8 T \quad (14)$$

$$\beta = a_9 \quad (15)$$

مقادیر ثابت در جدول 6 آمده است.

تقریباً در همه نوع روغن ترانسفورماتور، تغییرات لزجت با درجه حرارت خیلی بیشتر از تغییرات سایر خواص روغن با درجه حرارت میباشد. بنابراین

جدول 5 خواص فلزات مورد استفاده در ترانسفورماتور [8]

ظرفیت گرمایی ویژه	رسانایی گرمایی
مس	381
آلومینیوم	871
استیل کریستالی سیلیکون	711
آمورف	640

جدول 6 ثابت های روغن ترانسفورماتور [22]

ثابت	روغن ترانسفورماتور
a_1	0.000013537
a_2	2797.3
a_3	1960
a_4	4.005
a_5	887
a_6	-0.659
a_7	0.124
a_8	-0.0001525
a_9	0.00086

¹ Thermal Expansion Coefficient

² Heat Transfer Coefficient (HTC)

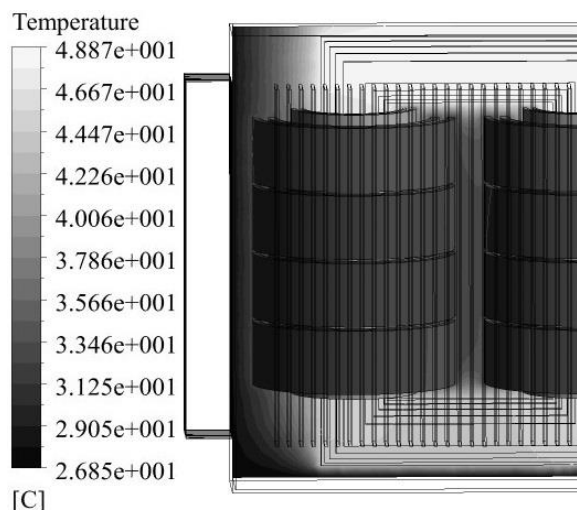


Fig. 19 Temperature distribution external view in amorphous core transformer in no-load conditions

شکل 19 نمای خارجی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته آمورف در حالت بی باری

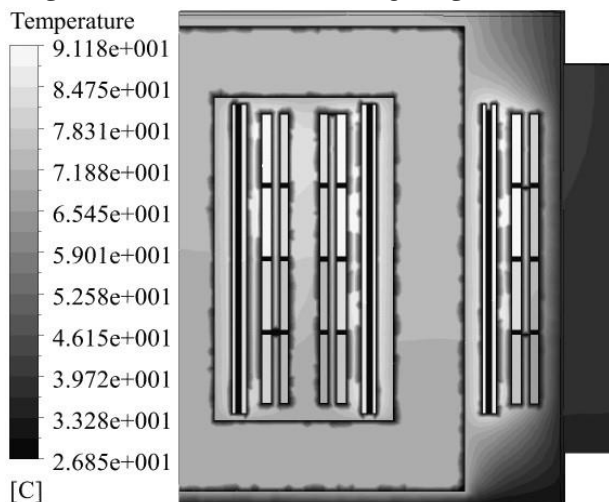


Fig. 20 Temperature distribution internal view in silicon core transformer in full load conditions

شکل 20 نمای داخلی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته سیلیکونی در حالت بار

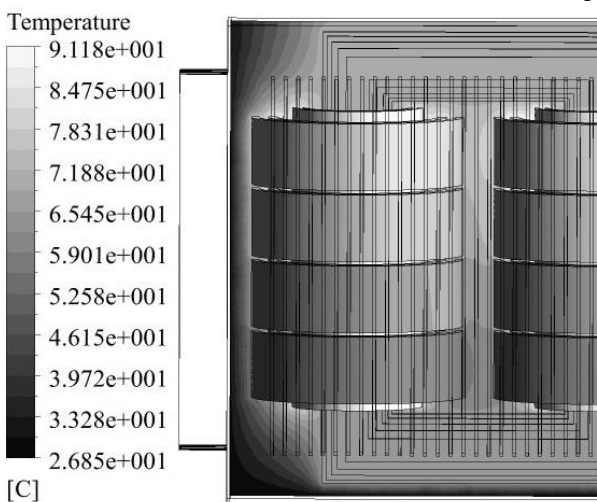


Fig. 21 Temperature distribution external view in silicon core transformer in full load conditions

شکل 21 نمای خارجی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته سیلیکونی در حالت بار

کامل

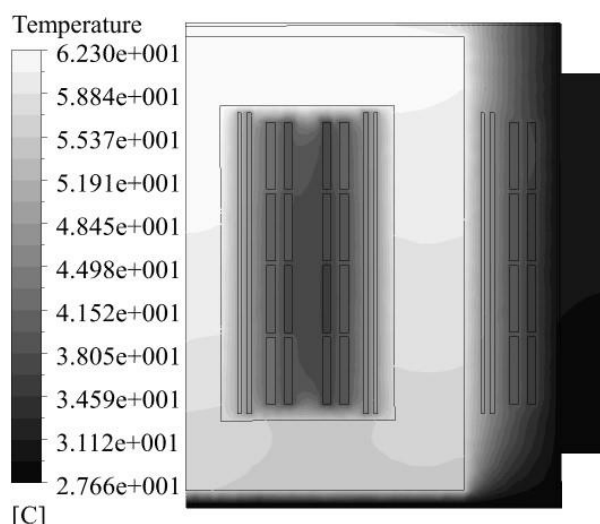


Fig. 16 Temperature distribution internal view in silicon core transformer in no-load conditions

شکل 16 نمای داخلی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته سیلیکونی در حالت بی باری

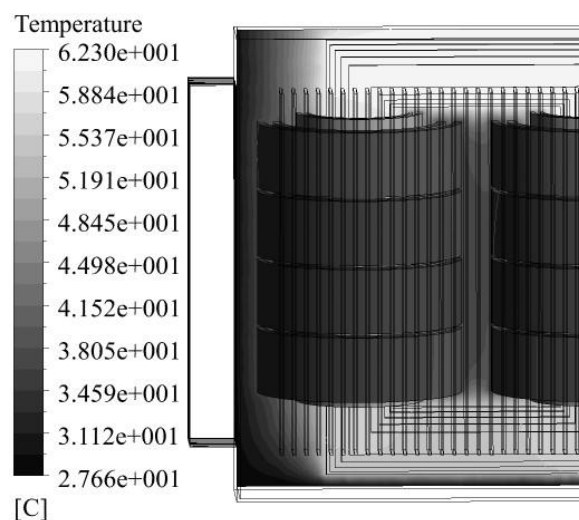


Fig. 17 Temperature distribution external view in silicon core transformer in no-load conditions

شکل 17 نمای خارجی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته سیلیکونی در حالت بی

باری

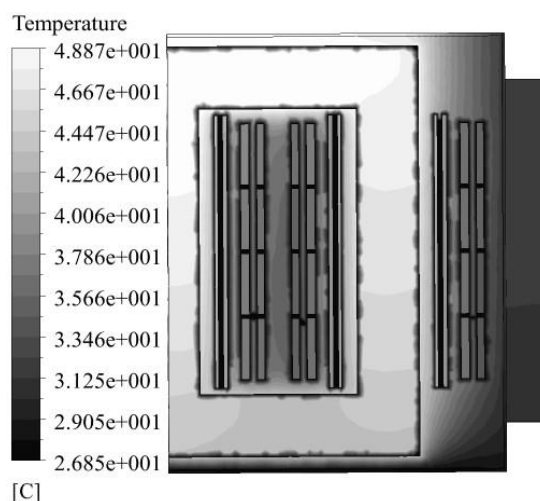


Fig. 18 Temperature distribution internal view in amorphous core transformer in no-load conditions

شکل 18 نمای داخلی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته آمورف در حالت بی باری

لذا عوامل مذکور می بایست در مطالعات پیری مدنظر قرار گیرند. اندازه گیری مستقیم دمای نقطه داغ هزینه های زیادی به همراه دارد و لذا برای پیش بینی آن از مدل های مختلفی استفاده می شود [24,25]. معادله افزایش دمای روغن در استاندارد [26] با در نظر گرفتن تغییر دمای محیط اصلاح شده است. از طرفی ایجاد شرایط کاری نرمال ترانسفورماتور در بار نامی، نیازمند مطالعه دقیق رفتار حرارتی ترانسفورماتور می باشد. تنوع بارگیری از ترانسفورماتور در حالت نرمال و اضطراری سبب افزایش دمای روغن ترانسفورماتور می شود [27]. در بحث بارگیری از ترانسفورماتور باید به این نکته اشاره کرد که عامل اصلی افزایش دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، گرمای تولید شده ناشی از تلفات بار است. در جدول 8 دمای نقطه داغ ترانسفورماتورهای هسته سیلیکونی و هسته آمورف مورد بحث، که در بارهای مختلف با استفاده از روش قسمت قبل به دست آمده، آورده شده است.

7- اعتبارسنجی و راستی آزمایی نتایج بدست آمده از شبیه سازی

در این قسمت به منظور راستی آزمایی نتایج الکترومغناطیسی و حرارتی حاصل از شبیه سازی، بصورت کیفی مقایسه ای با نتایج مرجع [13] انجام میشود. مرجع مذکور ترانسفورماتور خشکی با ظرفیت توان 630kVA را از نظر الکترومغناطیسی و حرارتی مورد مطالعه قرار داده است. با توجه به اینکه در این مقاله تمرکز بر روی شرایط بی باری ترانسفورماتور است، نتایج حاصل از شبیه سازی شرایط بی باری مورد مقایسه قرار می گیرد. در شکل های "24" تا "26" چگالی شار مغناطیسی در شرایط بی باری در ترانسفورماتورهای 100kVA و 630kVA نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می گردد مقدار چگالی شار بی باری بیشینه ترانسفورماتور روغنی هسته سیلیکونی 100kVA در شکل "24" با مقدار آن برای ترانسفورماتور خشک هسته سیلیکونی 630kVA در شکل "26" (از مرجع [13]) مطابقت دارد. همینطور از نظر کیفی توزیع چگالی شار (مخصوصا در گوشه های داخلی و خارجی هسته) در دو شکل "24" و "26" تقریبا به یک گونه می باشد.

به دلایل ذکر شده در بخشهای قبلی قاعدتا نبایستی توقع داشت تا توزیع چگالی شار بی باری همینطور مقدار بیشینه آن در ترانسفورماتور روغنی هسته آمورف 100kVA در شکل "25" همانند شکل "26" (ترانسفورماتور خشک هسته سیلیکونی 630kVA) گردد. در ادامه در شکل های "27" تا "29" توزیع دما در شرایط بی باری برای ترانسفورماتورهای 100kVA و 630kVA به تصویر کشیده شده است. همانگونه که مشاهده می گردد نحوه توزیع دما در ترانسفورماتور 100kVA با هسته های مختلف (شکل های "27" و

جدول 8 مقادیر دمای نقطه داغ ترانسفورماتورهای هسته آمورف و هسته سیلیکونی

در بارهای مختلف

Table 8 The hot spot temperature values of amorphous core and silicon core transformers in different loads

ترانسفورماتور هسته سیلیکونی		ترانسفورماتور هسته آمورف	
دما (سانتیگراد)	بار (در واحد)	دما (سانتیگراد)	بار (در واحد)
68	0.5	55.1	0.5
73.5	0.6	63.8	0.6
78.4	0.7	72.7	0.7
83.1	0.8	80.6	0.8
87.3	0.9	87.6	0.9
91.2	1.0	94.1	1.0
94.4	1.1	98.9	1.1
97.8	1.2	104	1.2
101	1.3	108	1.3
104	1.4	113	1.4
107	1.5	117	1.5

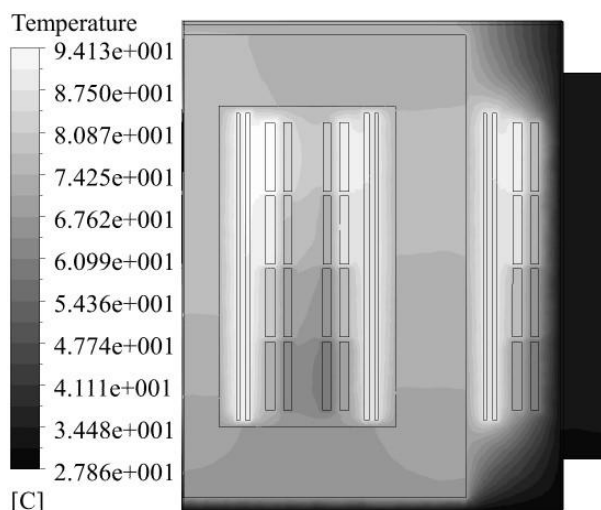


Fig. 22 Temperature distribution internal view in amorphous core transformer in full load conditions

شکل 22 نمای داخلی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته آمورف در حالت بار کامل

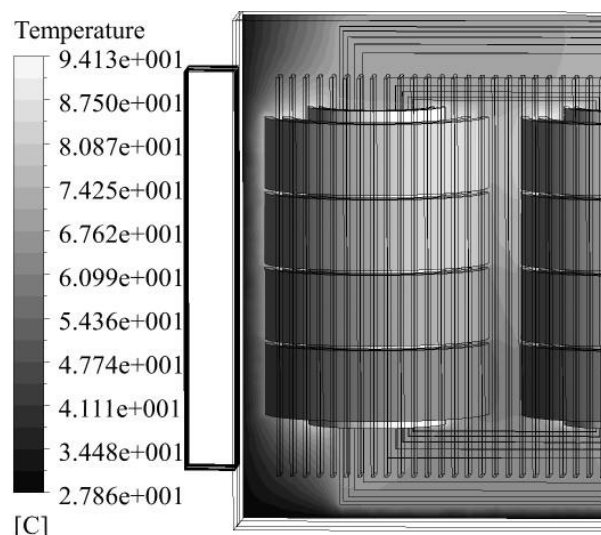


Fig. 23 Temperature distribution external view in amorphous core transformer in full load conditions

شکل 23 نمای خارجی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته آمورف در حالت بار کامل

ترانسفورماتورهای هسته آمورف و هسته استیل کریستالی سیلیکونی در شرائط بار کامل نشان داده شده است.

4-4- دمای نقطه داغ¹ ترانسفورماتور در بارهای مختلف

دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، یکی از پارامترهای مهم و کلیدی در تعیین عمر عایقی ترانسفورماتور می باشد. تاکنون مطالعات زیادی برای تخمین عمر ترانسفورماتورها انجام شده که تمرکز همه این مطالعه ها بر میزان عمر عایق این تجهیز بوده است. افزایش دمای بالای روغن و در نتیجه افزایش دمای نقطه داغ ترانسفورماتور سبب پیری زودرس عایق و در نتیجه کاهش عمر آن می شود [23]. یکی از عوامل مهم پیری ترانسفورماتور، تنش های حرارتی اعمالی به عایق های آن است. این تنش ها ناشی از تلفات آهنی و مسی، افزایش دما به سبب بارگیری، توزیع غیریکنواخت دما در سیم پیچ ترانسفورماتور و شرایط محیطی به ویژه دما و ارتفاع از سطح دریای آزاد است. همچنین سرعت باد و میزان تابش خورشید بر این ازدیاد دما مؤثر خواهد بود،

¹Hottest Spot Temperature (HST)

این موضوع باعث می گردد توزیع درجه حرارت روی هسته یا سیم پیچها چه از نظر مکان (مثل مکان نقطه داغ) چه از نظر مقدار بیشینه درجه حرارت (اندازه درجه حرارت نقطه داغ) با واقعیت مطابقت نداشته باشد. در نظر گیری تلفات جریان گردابی باعث افزایش درجه حرارت (میانگین و بیشینه) ترانسفورماتور شده، مکان نقطه داغ جابجا می گردد. بنابراین جهت حصول به یک نتیجه قابل قبول ابتدا با استفاده از نرم افزار ماکسول تحلیل الکترومغناطیسی هر دو ترانسفورماتور انجام گرفت. در این شبیه سازی تاکید بر روی بهبود تلفات بی باری ترانسفورماتور بود و نشان داده شد که در شرایط بی باری با بهره گیری از فلز آمورف در هسته ترانسفورماتور می توان تلفات را تا حدود 65 درصد کاهش داد. سپس با استفاده از نتایج تحلیل الکترومغناطیسی و ایجاد کوپل بین نرم افزارهای ماکسول و انسیس- فلوئنت

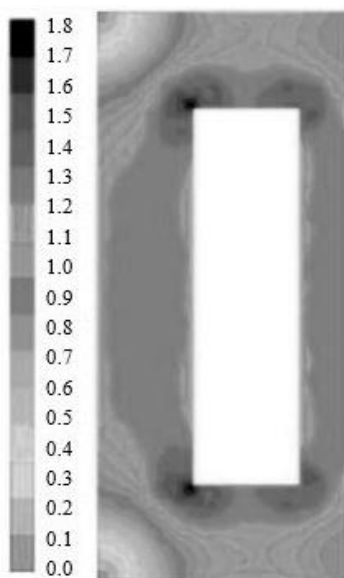


Fig. 26 Magnetic flux density in core of 630kVA dry-type silicon transformer in no-load conditions [13]

شکل 26 چگالی شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور خشک سیلیکونی با ظرفیت 630kVA در شرایط بی باری [13]

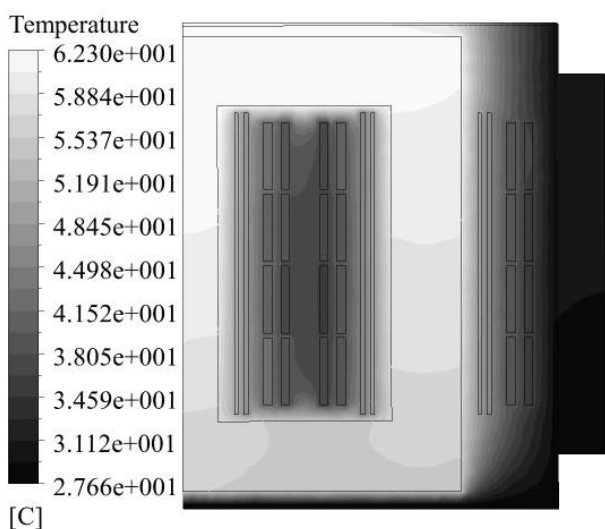


Fig. 27 Temperature distribution in 100kVA silicon core transformer in no-load conditions

شکل 27 توزیع دما در ترانسفورماتور هسته سیلیکونی با ظرفیت 100kVA در شرایط بی باری

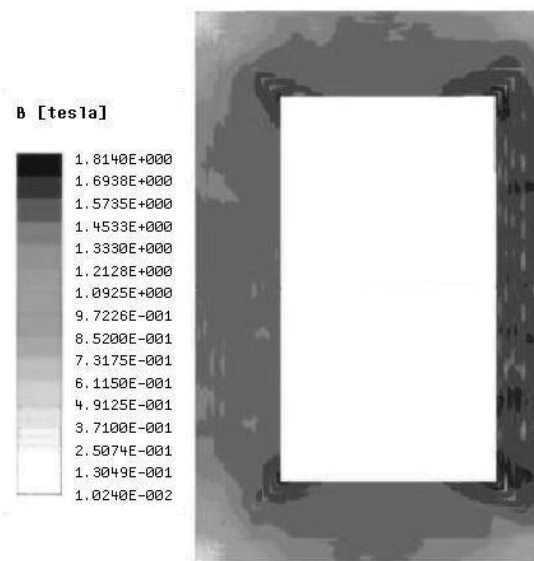


Fig. 24 Magnetic flux density in core of 100kVA silicon transformer in no-load conditions

شکل 24 چگالی شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور سیلیکونی با ظرفیت 100kVA در شرایط بی باری

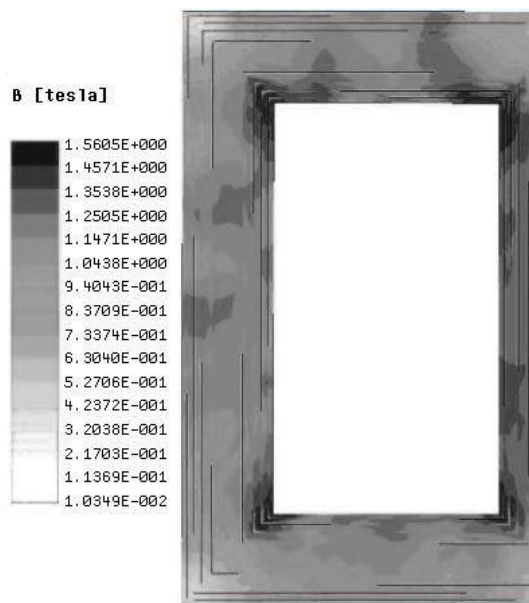


Fig. 25 Magnetic flux density in core of 100kVA amorphous transformer in no-load conditions

شکل 25 چگالی شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور آمورف با ظرفیت 100kVA در شرایط بی باری

"28" بصورت کیفی انطباق قابل قبولی با شکل "29" از مرجع [13] دارد.

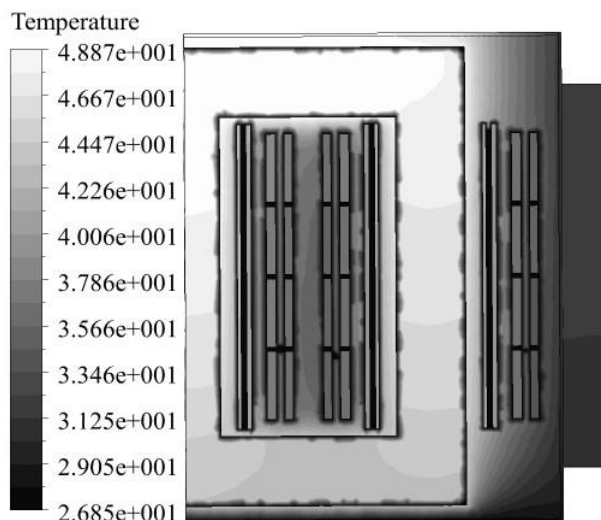
8- نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل الکترومغناطیسی-مکانیکی-حرارتی یک نمونه ترانسفورماتور توزیع با هسته ای از جنس فلز آمورف در مقایسه با ترانسفورماتوری که هسته آن از جنس استیل کریستالی سیلیکون است بصورت عددی شبیه سازی و بررسی شد. در بیشتر مراجع جهت مدلسازی حرارتی هسته یا سیم پیچهای ترانسفورماتور، تلفات بصورت یکنواخت لحاظ می گردد. یعنی یک چگالی جریان یا چگالی تلفات ثابت در نظر گرفته میشود.

آمورف در شرایط بار کامل بر عکس حالت بی باری دارای دمای بیشتری نسبت به ترانسفورماتور هسته سیلیکونی خواهد بود.

9- مراجع

- [1] A. Baggini, F. Bua, Power transformers energy efficiency programs: a critical review, *IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Rome, Italy, pp. 1961-1965, 10-13 June, 2015.
- [2] M. Toren, M. Celebi, Impact on efficiency of core materials in dry type transformers, *National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, pp. 308-312, 1-3 Dec., 2016.
- [3] A. S. Tatevosyan, A. A. Tatevosyan, N. V. Zaharova, The study of the electrical steel and amorphous ferromagnets magnetic properties, *Procedia Engineering, International Conference on Oil and Gas Engineering(OGE)*, Omsk, Russian Federation, pp. 727-734, 25-30 April, 2016.
- [4] F. Isik, Y. Uyaroglu, Amorphous core transformers efficiency analysis in turkish electrical distribution systems, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 23, No. 6, pp. 1523-1535, 2015.
- [5] J. Wang, W. Sheng, L. Wang, H. Yang, Study on technical and economical efficiency of amorphous alloy transformer and on-load capacity regulating transformer in distribution network application, *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Shenzhen, China, pp. 30-34, 23-26 Sept., 2014.
- [6] M. T. Isha, Z. Wang, Transformer hotspot temperature calculation using IEEE loading guide, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, pp. 1017-1020, 21-24 April, 2008.
- [7] J. Li, T. Jiang, S. Grzybowski, Hot spot temperature models based on top-oil temperature for oil immersed transformers, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach, VA, USA, pp. 55-58, 18-21 Oct., 2009.
- [8] H. R. Lashgari, Z. Chen, X. Z. Liao, D. Chu, M. Ferry and S. Li, Thermal stability, dynamic mechanical analysis and nanoindentation behavior of FeSiB(Cu) amorphous alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 626, No. 6, pp. 480-499, 2015.
- [9] A. Najafi, I. Iskender, Reducing losses in distribution transformer using 2605SA1 amorphous core based on time stepping finite element method, *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, Russia, pp. 1-4, 21-23 May, 2015.
- [10] T. Steinmetz, B. Cranganu-Cretu, J. Smajic, Investigations of no-load and load losses in amorphous core dry-type transformers, *The XIX International Conference on Electrical Machines(ICEM)*, Rome, Italy, pp.1-6, 6-8 Sept., 2010.
- [11] M. A. Taghikhani, A. Gholami, Estimation of hottest spot temperature in power transformer windings with NDOF and DOF cooling, *ScientiaIranica, Transactions D: Computer Science & Engineering and Electrical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 163-170, 2009.
- [12] J. Faiz, M. B. B. Sharifian, A. Fakhri, Two-dimensional finite element thermal modeling of an oil-immersed transformer, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 18, No. 6, pp. 577-594, 2007.
- [13] J. Smolka, A. J. Nowak, Experimental validation of the coupled fluid flow, heat transfer and electromagnetic numerical model of the medium-power dry-type electrical transformer, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 10, pp. 1393-1410, 2008.
- [14] C. Liu, J. Ruan, W. Wen, R. Gong, C. Liao, Temperature rise of a dry-type transformer with quasi-3D coupled-field method, *IET Electric Power Applications*, Vol. 10, No. 7, pp. 598-603, 2016.
- [15] A. K. Das, S. Chatterjee, Finite element method-based modelling of flow rate and temperature distribution in an oil-filled disc-type winding transformer using COMSOL multiphysics, *IET Electric Power Applications*, Vol. 11, No. 4, pp. 664-673, 2017.
- [16] J. R. D. Silva, J. P. A. Bastos, On-line evaluation of power transformer temperatures using magnetic and thermodynamics numerical modeling, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 53, No. 6, pp. 1-4, 2017.
- [17] R. Hasegawa, D. Azuma, Impact of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment, *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, Vol. 320, No. 20, pp. 2451-2456, 2008.
- [18] J. Guo, S. Li, Study on no-load loss of amorphous alloy control transformer based on the finite element method analysis, *IEEE International Conference of Online Analysis and Computing Science (ICOACS)*, Chongqing, China, pp. 16-19, 28-29 May, 2016.
- [19] D. L. P. Feil, P. R. Silva, D. P. Bernardon, T. B. Marchesan, M. Sperandio, L. H. Medeiros, Development of an efficient distribution transformer using amorphous core and vegetable insulating oil, *Electric Power Systems Research*, Vol. 144, No. 4, pp. 268-279, 2017.
- [20] B. A. Luciano, M. E. de Moraes, C. S. Kiminami, Single phase 1-kVA amorphous core transformer: design, experimental tests, and performance after annealing, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 4, pp. 2152-2154, 1999.
- [21] S. Sieradzki, R. Rygal, M. Soinski, Apparent core losses and core losses in five-limb amorphous transformer of 160 kVA, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 4, pp. 1189-1191, 1998.
- [22] M. A. Taghikhani, Modeling of heat transfer in layer-type power transformer, *PrzegladElektrotechniczny (Electrical Review)*, Vol. 87, No. 12, pp. 121-123, 2011.



[C]

Fig. 28 Temperature distribution in 100kVA amorphous core transformer in no-load conditions

شکل 28 توزیع دما در ترانسفورماتور هسته آمورف با ظرفیت 100kVA در شرایط بی باری

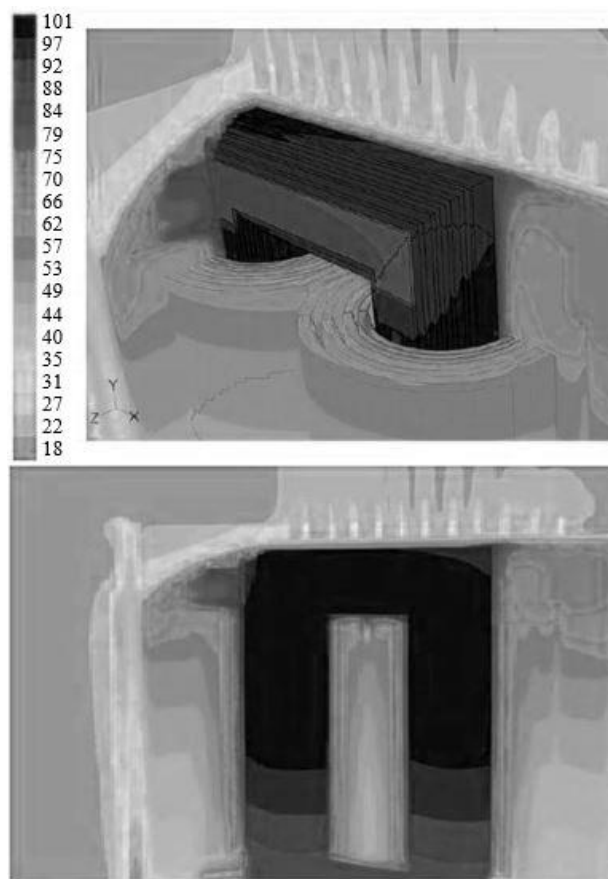


Fig. 29 Temperature distribution in 630 kVA dry-type silicon core transformer in no-load conditions [13]

شکل 29 توزیع دما در ترانسفورماتور خشک هسته سیلیکونی با ظرفیت 630kVA در شرایط بی باری [13]

تحلیل حرارتی ترانسفورماتور انجام شد. در تحلیل حرارتی نشان داده شد که ترانسفورماتور هسته آمورف در شرایط بی باری دمای کمتری نسبت به ترانسفورماتور هسته سیلیکونی دارد. از طرف دیگر ترانسفورماتور هسته

- sandwich winding, *28th International Power System Conference*, Tehran, Iran, pp. 1-7, 4-6 Nov., 2013. (in Persian فارسی)
- [26] *IEEE Standards, C57.91-2011*, IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators, 2012.
- [27] L. J. Rivera, D. J. Tylavsky, Acceptability of four transformer top-oil thermal models-part 2: comparing metrics, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, pp. 866-872, 2008.
- [23] G. Swift, T. S. Molinski, W. Lehn, A fundamental approach to transformer thermal modeling—part I: Theory and equivalent circuit, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No. 2, pp. 171-175, 2001.
- [24] D. J. Tylavsky, Q. He, G. A. McCulla, J. R. Hunt, Sources of error in substation distribution transformer dynamic thermal modeling, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 178-185, 2000.
- [25] D. Azizian, Triple winding dry type transformers thermal modeling with