

تعیین توزیع حرارتی یک پست کمپکت

DOR: 20.1001.1.27832570.1399.1.1.4.8

مقاله پژوهشی

میثم بهاروند^۱

۱- موسسه تحقیقات ایران ترانسفو، زنجان، ایران meisam_baharvand@yahoo.com

چکیده: ترانسفورمرها یکی از اجزاء مهم پستهای کمپکت هستند و مطالعه رفتار مغناطیسی و حرارتی آنها در داخل پست، دارای اهمیت بسزائی می‌باشد. تعیین توزیع حرارتی در داخل ترانسفورمرها بعلت پیچیدگی هندسی ساختمان ترانسفورمر، وابسته بودن خواص مواد بکار رفته با درجه حرارت و غیرخطی بودن رفتار مغناطیسی آنها معمولاً مشکل می‌باشد. در این بین استفاده از روشهای عددی همانند اجزاء محدود یک روش کارآمد برای تعیین توزیع حرارتی داخل ترانسفورمر و نیز تعیین حداکثر دمای سیم‌پیچی‌های ترانسفورمر می‌باشد. در این پایان نامه با استفاده از تحلیل‌های مغناطیسی و حرارتی دو بعدی اجزاء محدود توسط نرم افزار از سیم‌پیچ‌های ترانسفورمر در شرایط نرمال بهره برداری در فضای باز و نیز در شرایطی که ترانسفورمر در داخل پست کمپکت قرار دارد تعیین می‌شود و با توجه به اختلاف دمای حداکثر دمای سیم‌پیچ‌ها در دو شرایط، کلاس حرارتی پست کمپکت تعیین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اجزاء محدود، جهش حرارتی، پست کمپکت، ترانسفورماتور

Thermal analysis of a compact Substation

Meisam Baharvand¹

1- Irantransfo Research Center, Zanjan, Iran, meisam_baharvand@yahoo.com

Abstract: Transformers are one of the most important components of compact substations and the study of their magnetic and thermal behavior inside the substation is very important. Determining the thermal distribution inside transformers is usually difficult due to the geometric complexity of the transformer structure, the dependence of the properties of the materials used on the temperature, and the nonlinearity of their magnetic behavior. In the meantime, the use of numerical methods such as finite elements is an efficient method to determine the thermal distribution inside the transformer and also to determine the maximum temperature of the transformer windings. In this dissertation, using magnetic and two-dimensional thermal analysis of finite elements by Ansys software, the thermal distribution of transformer windings in normal outdoor operation conditions and also in conditions where the transformer is located inside the compact substation is determined and according to The temperature difference of the maximum temperature of the windings in the two conditions determines the thermal class of the compact.

Keywords: Finite Elements, Temperature Rise, Compact substation, Transformer

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۱

تراکم بار در مناطق مرکزی محیط‌های شهری و قیمت بالای زمین و عدم دسترسی به زمین‌های با ابعاد مناسب برای ساخت پست‌های معمولی توزیع، موجب گسترش استفاده از انواع پست‌های کمپکت پیش ساخته شده است. پست‌های کمپکت پیش ساخته به پست‌هایی اطلاق می‌شود که بدون نیاز به عملیات ساختمانی و به صورت آماده شده از قبل و یا با حداقل عملیات ساختمانی قابل نصب در محل باشند. از دیگر مزایای پست‌های کمپکت ایمنی و ضریب اطمینان بالا، سهولت فراوان عملیات حمل و نصب، سرعت بالای عملیات نصب و راه‌اندازی، عدم نیاز به عملیات ساختمانی و صرفه جویی در هزینه‌ها، اقتصادی بودن استفاده از آن در جاهایی که قیمت زمین بالا است، انعطاف پذیری در چیدمان اجزاء و نحوه اتصالات در شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف و نیز سرعت عمل در نصب و راه‌اندازی می‌باشد [1, 2].

یکی از تایپ تست‌های مربوط به پست کمپکت تست بررسی افزایش درجه حرارت تجهیزات اصلی پست کمپکت می‌باشد این تست با اندازه گیری افزایش دمای روغن و سیم پیچی ترانسفورمر (برای ترانسفورمر خشک فقط سیم پیچی) و افزایش دمای تجهیزات فشار ضعیف انجام می‌شود. تست باید نشان دهد که افزایش دمای ترانسفورمر داخل پست کمپکت نسبت به افزایش دمای همان ترانسفورمر در خارج پست، از مقدار معینی بیشتر نیست. این مقدار معین، کلاس حرارتی پست را مشخص می‌کند (به عنوان مثال ۱۰ K).

یکی از مهمترین اجزاء پست‌های کمپکت، ترانسفورمر است که قسمت فشار متوسط و فشار ضعیف داخل پست را به هم مرتبط می‌سازد. عوامل متعددی از قبیل بهره‌برداری غلط که ناشی از عدم دسترسی به اطلاعات جامع در خصوص ترانسفورمر است، موجب به وجود آمدن شرایط بحرانی برای آن می‌شود. این شرایط بحرانی علاوه بر اینکه منجر به کاهش طول عمر ترانسفورمرها و تحمیل هزینه‌های تعمیرات و تعویض قطعات آن می‌شود، بعضاً موجب از مدار خارج شدن ترانسفورماتورها و به دنبال آن محدودیت در انتقال قدرت در شبکه می‌شود. تلفات هسته و سیم پیچی‌های ترانسفورمر باعث تولید گرما و افزایش دمای سیم پیچی‌های ترانسفورمر می‌شود. افزایش غیر مجاز دمای سیم پیچی‌های ترانسفورمر، در اثر افزایش نامناسبی ضریب بار ترانسفورمر بدون توجه به شرایط اقلیمی و دمایی، موجب آسیب دیدن عایق سیم پیچی‌ها و گاهی شکست عایقی و در نهایت کاهش طول عمر ترانسفورمر می‌شود.

تست جهش حرارتی در آزمایشگاه‌ها به علت هزینه بالا و طولانی بودن زمان تست و نیز مشکلات حمل و نقل به آزمایشگاه‌ها چندان مورد درخواست کارخانجات سازنده نمی‌باشد و آنها به دنبال روش‌های جایگزینی هستند که کم هزینه‌تر و سریعتر باشد. اما با توجه به اینکه تعیین توزیع دمایی دقیق تمامی نقاط ترانسفورمر، به‌خاطر پیچیدگی‌هایی که در ساختمان ترانسفورمر وجود دارد و نیز نیاز به

محاسبات طولانی و وقت گیر دارد مدل‌های ارائه شده مدل‌های دقیقی نبوده‌اند. با مطرح شدن روش‌های کامپیوتر مینا همانند اجزاء محدود و به‌وجود آمدن نرم افزارهای مختلف مثل Ansys، که قابلیت حل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل را بطور همزمان دارند، بدست آوردن مدل حرارتی برای ترانسفورمرها به مساله تعیین توزیع حرارت برای ترانسفورمرها تبدیل شد. در این مقاله ابتدا توزیع حرارتی سیم پیچی‌های ترانسفورمر را یکبار در شرایط نرمال (محیط باز، بار کامل و دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد) و یکبار وقتی ترانسفورمر در داخل پست کمپکت قرار دارد، را با استفاده از روش اجزاء محدود بدست آورده و حداکثر دمای سیم پیچی‌های ترانسفورمر را در هر دو شرایط تعیین می‌کنیم سپس با مقایسه این دو دما کلاس حرارتی پست کمپکت را تعیین می‌کنیم.

۲- تئوری ریاضی

هر امروزه روش‌های عددی که بر پایه حل مسائل با محاسبات تقریبی هستند گسترش پیدا کرده‌اند، گرچه اکثر این روش‌ها چندان جدید نیستند و در گذشته نیز از آنها برای تحلیل مسائل استفاده می‌شده است اما حجیم و وقت گیر بودن این محاسبات باعث منسوخ شدن این روش‌ها شده بود که با وجود آمدن کامپیوترها و قابلیت آنها در انجام محاسبات تکراری و حجیم، استفاده و گسترش این روش‌های عددی توسط مهندسين مرسوم گردید. امروزه روش‌های عددی متنوعی بسته به نوع روش و نوع تقسیم‌بندی فضای مساله برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسائل مورد استفاده قرار می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به روش‌های اجزاء محدود، حجم محدود، تفاضل محدود و ... اشاره کرد که در قالب نرم‌افزارهایی به کاربران ارائه می‌شود. پیدایش روش اجزاء محدود به حل مسائل پیچیده الاستیسیته و تحلیل سازه‌ها در مهندسی عمران و هوا فضا برمی‌گردد. این روش حاصل کار الکساندر هرنیکوف و ریچارد کورانت می‌باشد. روش اجزاء محدود را می‌توان به پنج مرحله اصلی تقسیم کرد:

- تقسیم ناحیه مورد نظر به تعداد زیادی زیر فضا کوچک موسوم به اجزاء که نقاط اتصال این اجزاء به یکدیگر، گره نامیده می‌شود.
- تعیین تقریب اولیه برای حل به صورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول که همواره یا خطی و یا از مرتبه دوم است. که پس از تعیین شدن مرتبه تقریب اولیه، معادله حاکم در هر گره نوشته می‌شود.
- استخراج دستگاه معادلات جبری، که در صورت استفاده از روش گالریکین، تابع وزنی برای هر گره مشخص شده و سپس انتگرال باقیمانده وزنی تشکیل می‌گردد. با انتگرال گیری، برای هر گره یک معادله جبری ایجاد می‌گردد که پس از استخراج معادلات همه گره‌ها، دستگاه معادلات بوجود می‌آید.
- حل دستگاه معادلات ایجاد شده
- محاسبه سایر کمیات از روی مقادیر گره‌ی

۱-۲ توسعه معادلات الکترومغناطیسی

با فرض وابسته بودن مشخصات الکتریکی مواد با درجه حرارت صورت کلی معادله پواسن در مورد یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot (\nu_r(T) \nabla A) - \mu \sigma(T) \frac{\partial A}{\partial T} = -\mu J_0 \quad (1)$$

در یک محیط دو بعدی A مولفه Z از پتانسیل مغناطیسی متغیر با زمان بوده که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A(t) = Ae^{j\omega t} \quad (2)$$

با استفاده از مختصات کارتزین معادله رابطه (۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -J_0 + j\omega \sigma A \quad (3)$$

که در آن μ ضریب نفوذ پذیری، σ رسانایی الکتریکی و J_0 چگالی جریانهای ادی است.

۲-۲ محاسبه تلفات ترانسفورماتور

۱-۲-۲ تلفات هسته

هسته ترانسفورماتور متشکل از ورقه‌های نازکی است که سطح آنها با توجه به ظرفیت ترانسفورماتور فور ماتورها محاسبه می‌شود. قسمت عمده تلفات بی باری ترانسفورماتورها مربوط به تلفات هسته آهنی ترانسفورماتور است کیفیت هسته تاثیر به سزایی در مقدار این تلفات دارد. برای کم کردن تلفات آهنی هسته ترانسفورماتور معمولاً آنها را از ورقه‌های نازک فلزی که نسبت به یکدیگر عایق هستند، می‌سازند این ورقه‌ها از آهن بدون پسماند با آلیاژی از سیلیسیم که دارای قابلیت هدایت الکتریکی و قابلیت هدایت مغناطیسی زیادی است ساخته می‌شوند.

تلفات هسته عموماً ناشی از تلفات هیستریزیس و تلفات جریانهای گردابی می‌باشد. تلفات جریانهای گردابی توسط رابطه (۴) قابل محاسبه می‌باشد [3].

$$P_E = \frac{\omega^2 \gamma_c}{24} \epsilon^2 B_{Max}^2 V_{core} \quad (4)$$

در رابطه فوق γ_c ضریب هدایت مغناطیسی صفحات در واحد حجم، ϵ ضخامت صفحات مغناطیسی، V_{core} حجم موثر هسته می‌باشد، ضخامت صفحات ثابت در نظر گرفته شده است.

تلفات هیستریزیس در اثر خاصیت پس ماند مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور ایجاد می‌شود. مقدار تلفات هیستریزیس نسبت به تلفات گردابی در یک ترانسفورماتور تغذیه کمتر است چرا که مقدار تلفات هیستریزیس بستگی به فرکانس داشته و در فرکانس‌های پایین مقدار آن کمتر است، اما مقدار آن با افزایش فرکانس به شدت افزایش می‌یابد. برای محاسبه تلفات هیستریزیس در یک مدار مغناطیسی با چگالی شار یکنواخت متناوب می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [3].

$$P_H = \frac{\omega}{2\pi} k_H V B_{Max}^v \quad (5)$$

k_H ضریب هیستریزیس ماده هسته، v ضریب تجربی اشمیتز می‌باشد که می‌تواند بین ۱/۶ تا ۲/۵ تغییر کند. در نهایت تلفات هسته شامل مجموع این دو تلفات می‌باشد:

$$P_{core} = P_E + P_H \quad (6)$$

۲-۲-۲ تلفات سیم پیچها

تلفات سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتورها هنگامی که تحت بار هستند شامل دو بخش می‌شود بخش اول این تلفات ناشی از تلفات مسی سیم‌پیچ‌ها بوده و بخش دوم اختصاص به تلفات ناشی از جریانهای گردابی در سطح مقطع سیم‌پیچ‌ها دارد بر خلاف حالت بی باری ترانسفورماتور می‌توان از تلفات جریانهای گردابی صرف نظر کرد، اینجا میزان تلفات گردابی با افزایش بار افزایش می‌یابد [4].

تلفات مسی همانطور که از نامش پیداست ناشی از عبور جریان از مقاومت سیم پیچها است که می‌تواند از طریق تست اتصال کوتاه ترانسفورماتور تحت جریان نامی تعیین شود. اگر از تلفات هسته در این حالت صرف نظر کنیم می‌توان تلفات اتصال کوتاه را به عنوان تلفات سیم پیچی‌ها در نظر گرفت. تلفات اتصال کوتاه در جریان نامی ترانسفورماتور برابر است با

$$P_{cc} \approx P_{winDC} = R \cdot I_R^2 = \frac{1}{\gamma_w} \frac{l_w}{A_c} I_R^2 \quad (7)$$

که در آن γ_w ، رسانایی الکتریکی سیم پیچهاست، l_w طول سیم بندی سیم پیچی‌ها و I_R ، جریان نامی ترانسفورماتور می‌باشد [4].

۳-۲ توسعه معادلات حرارتی

بین دو محیط که اختلاف دمایی وجود دارد تبادل گرمایی صورت می‌گیرد، انتقال گرما بین دو محیط به شیوه‌های مختلفی انجام می‌شود. وقتی در محیط ساکنی که می‌تواند جامد یا سیال باشد شیب دما وجود دارد، انتقال گرما در آن به صورت رسانش صورت می‌گیرد. برای انتقال گرما بین سطح و سیالی متحرک که دمای آنها با هم متفاوت است از واژه جابجایی استفاده می‌شود. نوع سوم انتقال گرما تشعشع گرمایی است. تمام سطوح با دمای معین انرژی را بشکل امواج الکترومغناطیسی گسیل می‌دارند. از این رو در نبود محیط واسط میان دو سطح با دمای مختلف انتقال گرمای تشعشعی وجود دارد.

معادلات آهنگ رسانش گرما به قانون فوریه معروف است. در حالت کلی گرادیان گرمایی ایجاد شده در اثر وجود شار گرمایی در مورد یک جسم در حالت سه بعدی را بر طبق قانون فوریه به صورت زیر می‌توان بیان کرد [5]:

$$q'' = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} - k_y \frac{\partial T}{\partial y} - k_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (8)$$

که در آن T درجه حرارت ماده، q'' شار گرمایی و k_x, k_y, k_z رسانندگی گرمایی در جهت محورهای x, y, z است. شار گرمایی به انتقال گرما در واحد سطح گفته می‌شود.

شود.

۳- تحلیل اجزا محدود پست کمپکت در حوزه حرارتی

۳-۱ مدلسازی سیم پیچی های ترانسفورماتور

مشخصات حرارتی مواد هادی و عایق بکار رفته در ترانسفورماتور فورمرها عموماً ثابت نبوده و تابعی از درجه حرارت است. مدلسازی حرارتی تک تک سیم پیچ های ترانسفورماتور فورمرها در محیط المان محدود به خاطر بالا بودن تعداد دور سیم پیچ ها و متفاوت بودن مشخصات عایقی مواد به کار رفته در آنها مشکل و غیرممکن است. همچنین به خاطر متفاوت بودن نحوه سیم پیچی و ابعاد هادیهای بکار رفته در سیم پیچ های فشار قوی و فشار ضعیف، استفاده از یک مدل واحد بمنظور مطالعه حرارتی آنها دقیق نمی باشد. در مورد سیم پیچ های فشار قوی به خاطر استفاده از سیم پیچی های نوع رشته ای و به علت متقارن بودن توزیع مواد هادی و عایقی استفاده شده در آنها رفتار کل سیم پیچ ها را می توان همانند یک جسم همگن با مشخصات حرارتی معادل که به صورت زیر تعریف می شود در نظر گرفت [6]:

$$\lambda^{AB} = \frac{\lambda^A V^A + \lambda^B V^B}{V^A + V^B} \quad (9)$$

$$C^{AB} = \frac{C^A \rho^A V^A + C^B \rho^B V^B}{\rho^A V^A + \rho^B V^B}$$

$$\rho^{AB} = \frac{\rho^A V^A + \rho^B V^B}{V^A + V^B}$$

که در آن ، ضریب هدایت گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه، چگالی حجمی و حجم است. که بالا نویسهها بترتیب نشان دهنده هادی و عایق است.

در سیم پیچ های فشار ضعیف به خاطر استفاده از سیم پیچ های فویلی و نیز به خاطر متفاوت بودن ضخامت لایه عایقی بکار رفته در امتداد محور x و y، رفتار حرارتی کل سیم پیچ ها نمی تواند همانند یک جسم همگن در نظر گرفته شود. بنابر این سیم پیچ های فشار ضعیف را می توان همانند یک جسم غیرهمگن با ضریب هدایت حرارتی متفاوت در امتداد محور x و y، تصور نمود.

با توجه به اینکه ارتفاع کل سیم پیچ های فشار ضعیف در مقایسه با عرض آنها بسیار بیشتر می باشد، با تقریب می توان تصور نمود که شار حرارتی ایجاد شده ناشی از تلفات سیم پیچ ها فقط در جهت محور x و عمود بر ارتفاع سیم پیچ ها انتقال می یابد. بنابر این گرادین دما در جهات x و y ناچیز و قابل صرف نظر کردن می باشد. شار حرارتی در جهت x از سیم پیچ ها توسط دو ضریب هدایت حرارتی λ_y و λ_x منتقل می شود. ضریب هدایت حرارتی معادل در جهت عمود بر فویلها بوده و به صورت هدایت حرارتی معادل دو مسیر حرارتی سری که شامل هادی و عایق است تعریف می شود [7]، یعنی:

$$\lambda_x = \frac{d_A + d_B}{\frac{d_A}{\lambda_A} + \frac{d_B}{\lambda_B}} \quad (10)$$

در رابطه مذکور d_A ، d_B ضخامت محیط مورد نظر می باشد. λ_y ضریب هدایت حرارتی معادل در جهت فویلها بوده و به صورت ضریب

هدایت حرارتی معادل دو مسیر حرارتی موازی که شامل هادی و عایق است تعریف می گردد:

$$\lambda_y = \frac{\lambda_A d_A + \lambda_B d_B}{d_A + d_B} \quad (11)$$

۳-۲ محاسبه شرط مرزی همرفت بر روی دیواره سیم پیچها

همانطور که قبلاً ذکر شد برای حل مدل ارائه شده در محیط المان محدود نیازمند به دانستن شرایط مرزی هستیم. یکی از شرایط مرزی معمولاً توسط روشهای محاسباتی قابل محاسبه می باشد، شرط مرزی ضریب همرفت است که لازم است بر روی دیواره های سیم پیچ ها معلوم باشد. مقدار این ضریب معمولاً ثابت نبوده و تابعی از ارتفاع، درجه حرارت سطح، مشخصات فیزیکی سیال اطراف سیم پیچ ها و هندسه سطح می باشد. در هر مکان y از ارتفاع سیم پیچها مکانی مانند $x = \delta(y)$ در شاره وجود دارد که درجه حرارت آن ۰٫۹۹ درجه حرارت سیال می باشد. مکان هندسی چنین نقاطی لایه مرزی گرمائی نامیده می شود. طبق نظریه Eckert ضخامت این لایه در داخل سیال توسط رابطه زیر حساب می شود [8]:

$$\delta(y) = 3.93 \cdot y \cdot \text{Pr}^{-0.5} (0.92 + \text{Pr})^{0.25} \text{Gr}^{-0.25} \quad (12)$$

که در آن $\delta(y)$ ضخامت لایه مرزی، y ارتفاع سیم پیچی، Pr، ضریب بی بعد پراندالت و Gr ضریب بی بعد گراششف می باشد، که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{Gr}(y) = \frac{g \beta q_w'' y^4}{\lambda v^2} \quad (13)$$

که در آن g شتاب جاذبه زمین، β ضریب انبساط حجمی، q_w'' شار حرارتی منتقل شده از سطح سیم پیچ ها و v ویسکوزیته سیال می باشد.

با توجه به روابط (12) و (13) و با فرض دانستن مشخصات حرارتی روغن، حداکثر ضخامت لایه مرزی گرما در حداکثر ارتفاع سیم پیچها، با فرض حداکثر میانگین درجه حرارت روغن داخل کانال برابر با ۱۰۰ درجه سانتیگراد، به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Gr}|_{y=0.28} = 2.7 \times 10^{10} \quad (14)$$

$$\delta|_{y=0.28} = 1.06 \times 10^{-3} (m)$$

همانطور که ملاحظه می شود حداکثر ضخامت لایه مرزی گرمائی در مقایسه با عرض کانال بین سیم پیچها که برابر ۴ میلیمتر است بسیار کوچک می باشد. بر طبق نظریه Eckert برای حالتی که ضخامت لایه مرزی سیال در بالاترین نقطه سیم پیچها در مقایسه با عرض کانال کوچک باشد جریان سیال داخل کانال آرام بوده و ضریب همرفت توسط رابطه تجربی زیر محاسبه می گردد:

$$h(y) = \frac{\text{Nu}(y) \times \lambda}{y} \quad (15)$$

$$\text{Nu}(y) = 0.6(\text{Gr}(y) \times \text{Pr})^{0.2}$$

که در آن $\text{Nu}(y)$ عدد بدون بعد ناسلت است.

۳-۳ محاسبه ضریب تابش

بطور کلی تشعشع می‌تواند توسط بازتاب و گسیل از سطحی خارج شود و با رسیدن به سطح دیگر بازتاب و جذب شود. این مساله برای سطوحی که می‌توان آنها را اجسام سیاه گرفت ساده می‌شود، زیرا هیچ بازتابی وجود ندارد. لذا انرژی فقط با گسیل خارج می‌شود و تمام تشعشع فرودی جذب می‌شود. در حالت ایده‌آل جسم سیاه به جسمی گفته می‌شود که تمام تشعشع فرودی را با هر طول موج و در هر جهت جذب می‌کند و لزوماً جسم سیاه نیست. در اینجا فرض می‌شود که سطوح خارجی ترانسفورماتور و دیواره‌های پست در تعریف جسم سیاه می‌گنجد.

آهنگ تشعشع گرمایی که از سطح i خارج می‌شود و توسط سطح j دریافت می‌شود را می‌توان توسط رابطه زیر تعریف کرد:

$$q_{ij} = A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (16)$$

که در آن σ ثابت استفان بولتزمن و A_i مساحت سطحی است که تشعشع از آن صورت می‌گیرد. F_{ij} کسری از تشعشع خروجی از سطح i است که توسط سطح j دریافت می‌شود است که به آن ضریب دید نیز گفته می‌شود. برای سطوح خارجی ترانسفورماتور و دیواره‌های پست این سطوح به صورت سطوح موازی و عمود برهم در مقابل هم قرار گرفته‌اند.

ضریب دید دو سطح موازی را می‌توان از رابطه زیر تعیین کرد [9]:

$$F_{ij} = \frac{\sqrt{[(W_i + W_j)^2 + 4L^2]} - \sqrt{[(W_j - W_i)^2 + 4L^2]}}{2W_i} \quad (17)$$

$$W_i = \frac{w_i}{L}$$

$$W_j = \frac{w_j}{L}$$

که در آن w_i و w_j بترتیب طول سطوح مقابل هم یا موازی هم و L فاصله دو سطح از هم است. رابطه ضریب دید برای دو سطح عمود بر هم را نیز می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$F_{ij} = \frac{1 + (w_j/w_i) - \sqrt{[1 + (w_j/w_i)^2]}}{2} \quad (18)$$

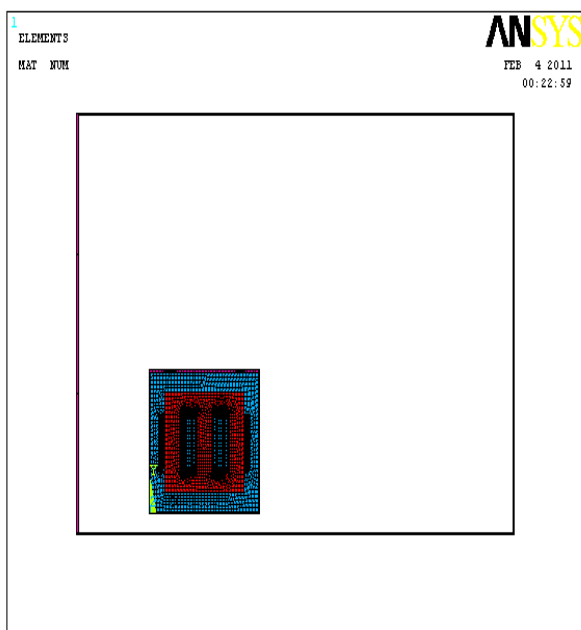
با استفاده از ضریب دید مربوط به سطوح در دو حالت می‌توان رابطه انرژی گسیل شده از سطوح خارجی ترانسفورماتور به سطوح دیواره‌های پست را برای استفاده در تحلیل اجزا محدود تعیین کرد.

۴- نتایج شبیه سازیها

در مثال شبیه سازی زیر به تحلیل حرارتی یک پست کمپکت ۵۰ کیلو ولت آمپر می‌پردازیم که مشخصات ترانسفورماتور آن در جدول (۱) آورده شده است.

ابعاد محوطه ترانسفورماتور	74 × 33 × 67	جریان نامی فشار قوی	1.44A
ابعاد هسته	48 × 54	جریان نامی فشار ضعیف	72A
ابعاد پنجره	28 × 24	ولتاژ نامی فشار قوی	20kV
ابعاد ساقها	10 × 10	ولتاژ نامی فشار ضعیف	400V
ابعاد سیم پیچی‌های فشار قوی	2 × 24	مقاومت سیم پیچی فشار قوی	121.5 Ω
ابعاد سیم پیچی‌های فشار ضعیف	1.2 × 23	مقاومت سیم پیچی فشار ضعیف	0.03Ω
ظرفیت نامی	50kVA	جریان نامی فشار قوی	1.44A

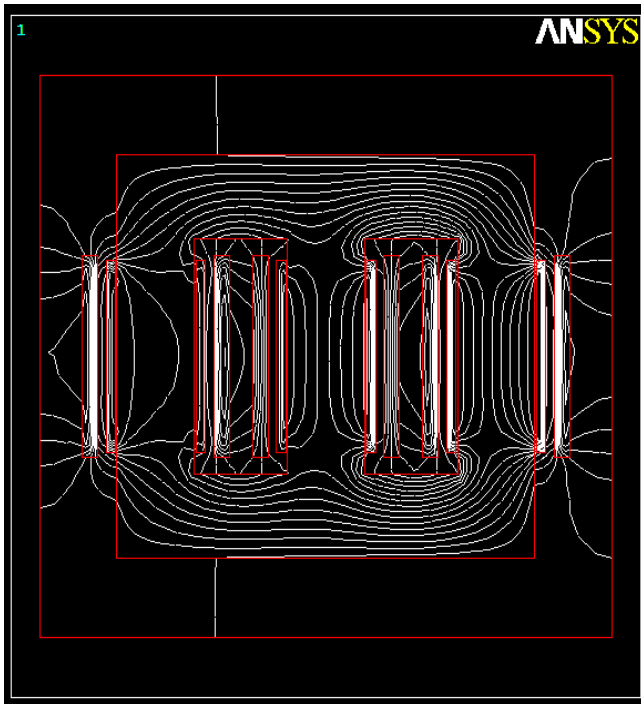
۴-۱ محاسبه تلفات با استفاده از آنالیز مغناطیسی اجزاء محدود
شکل‌های (۱) و (۲) نحوه مش بندی فضای داخل پست و ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱: مش بندی پست کمپکت به همراه ترانسفورماتور

برای تعیین تلفات بی باری هسته چگالی جریان بی باری به طرف فشار متوسط ترانسفورمر بعنوان شرط مرزی آنالیز الکترومغناطیسی اجزاء محدود، اعمال می‌شود و سپس تحلیل الکترومغناطیسی حالت ماندگار برای بدست آوردن چگالی فلو مغناطیسی در هر کدام از المانهای هسته، بر اساس منحنی مغناطیس شوندهگی هسته انجام می‌گیرد. با توجه به معلوم بودن چگالی فلو در هر کدام از المانهای هسته می‌توان تلفات هسته را با استفاده از دیتا شیت‌های مربوط به ترانسفورمر مورد

کوتاه به سیم پیچی های فشار ضعیف و فشار متوسط بعنوان شرط مرزی صورت می گیرد. شکل (۴) نحوه توزیع شار مغناطیسی در هسته ترانسفورمر و در اطراف آن را نشان می دهد.



شکل ۴: توزیع شار مغناطیسی درون محفظه ترانسفورماتور فورمر در تحلیل الکترومغناطیسی هارمونیک اجزاء محدود در $\omega t = 0$ در نهایت پس از محاسبه کلیه تلفات، بر اساس قانون جمع آثار، کلیه مقادیر تلفات با همدیگر جمع شده و به عنوان شرایط مرزی به مساله تحلیل حرارتی اجزاء محدود اعمال می شود. خلاصه ای از نتایج در جدول (۲) آورده شده است.

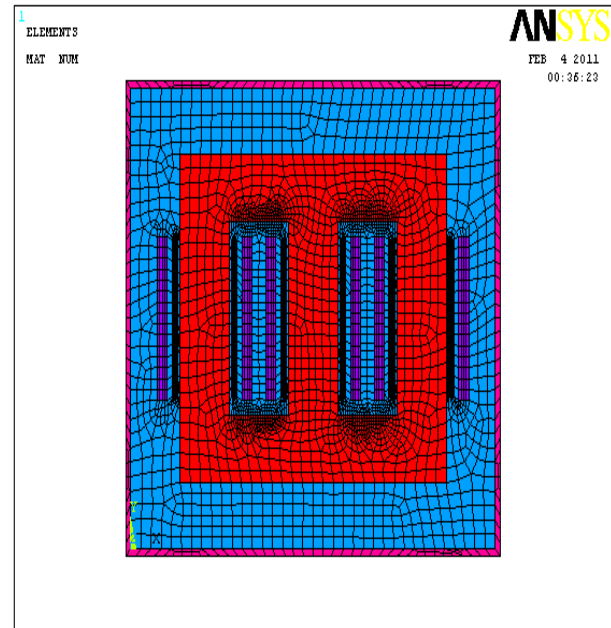
جدول ۲: نتایج تحلیلهای مغناطیسی اجزاء محدود

نوع تلفات	مقادیر واقعی	تحلیل مغناطیسی اجزاء محدود
تلفات DC در سیم پیچی فشار قوی	۵۳۴/۷۳	۵۲۹/۴۴
تلفات DC در سیم پیچی فشار ضعیف	۳۸۴/۹۲	۳۸۸/۲۴
تلفات جریانهای گردابی در سیم پیچی فشار قوی	۶۴/۳۸	۶۴/۹
تلفات جریانهای گردابی در سیم پیچی فشار ضعیف	۱/۳۸	-
هسته	۱۵۸/۵۷	۱۵۶/۱۸

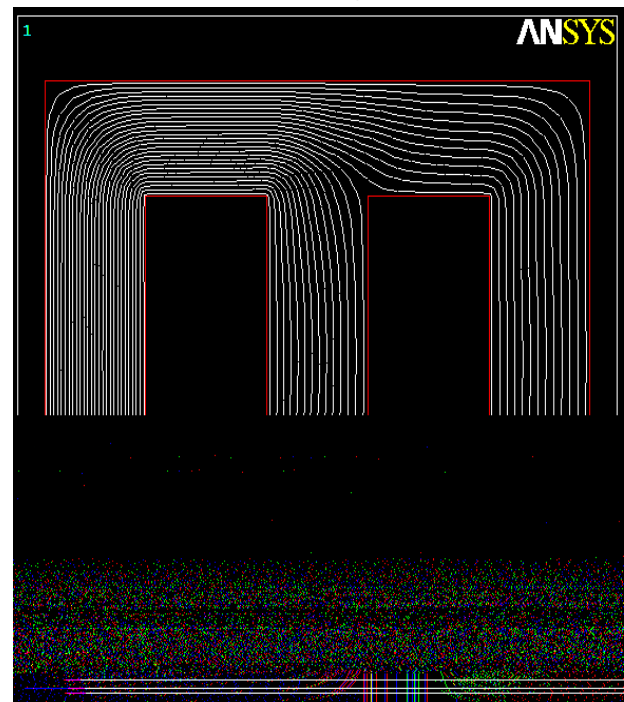
۴-۲ تعیین توزیع حرارتی داخل ترانسفورماتور:

برای اینکه بتوان تغییرات دمایی ناشی از قرار گرفتن یک ترانسفورمر در داخل یک پست کمپکت را بررسی کرد لازم است که دو تحلیل حرارتی اجزاء محدود جداگانه صورت پذیرد. یکی از این تحلیلها برای

نظر محاسبه کرد. شکل (۳) پراکندگی شار مغناطیسی داخل هسته را نشان می دهد.



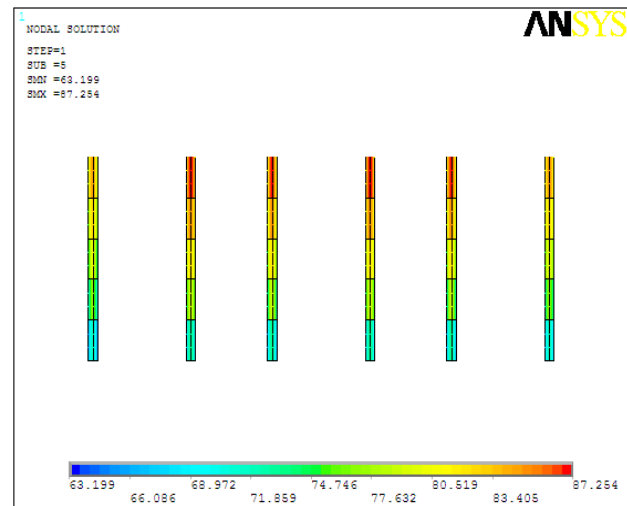
شکل ۲: مش بندی ترانسفورماتور



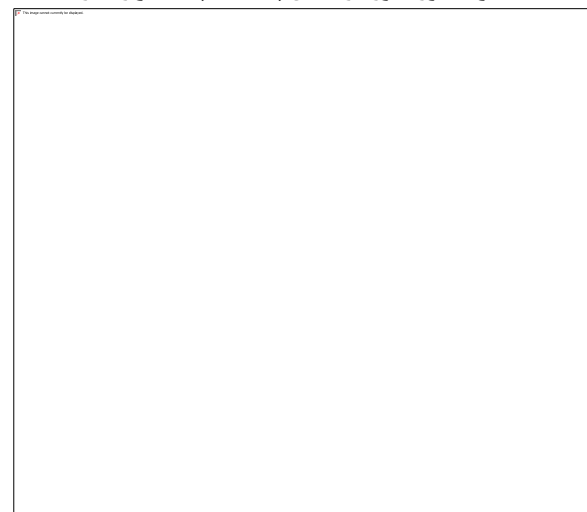
شکل ۳: توزیع شار مغناطیسی داخل هسته ترانسفورماتور فورمر در تحلیل الکترومغناطیسی حالت ماندگار اجزاء محدود

همچنین برای بدست آوردن تلفات dc سیم پیچی های ترانسفورمر باید چگالی جریانهای نامی ترانسفورمر به سیم پیچ های اولیه و ثانویه بعنوان شرط مرزی آنالیز الکترومغناطیسی اجزاء محدود، اعمال شود و سپس تحلیل الکترومغناطیسی هارمونیک توسط نرم افزار بر روی مساله انجام شود. همین طور برای تعیین تلفات جریانهای گردابی سیم پیچی های ترانسفورمر تحلیل هارمونیک اجزاء محدود با اعمال جریانهای اتصال

تعیین نحوه توزیع حرارتی سیم‌پیچی‌های ترانسفورمر در شرایطی که ترانسفورمر در خارج از کانکس پست و در معرض دمای محیط قرار دارد، است، و تحلیل دیگر مربوط به وقتی است که ترانسفورمر در داخل کانکس قرار می‌گیرد. در تحلیل حرارتی اجزاء محدود وقتی ترانسفورماتور در خارج از پست قرار دارد، شرایط مرزی که به تحلیل افزوده می‌شود شامل شرایط مرزی همرفت و نیز نرخ تولید انرژی یا همان گرمای ناشی از تلفات هسته و سیم‌پیچی‌ها است و نیز در تحلیل حرارتی اجزاء محدود ترانسفورماتور وقتی که در داخل محوطه پست قرار دارد، شرایط مرزی که به تحلیل افزوده می‌شود شامل شرایط مرزی همرفت، شرایط مرزی تابش و نیز نرخ تولید انرژی یا همان گرمای ناشی از تلفات هسته و سیم‌پیچی‌ها می‌باشد که به مساله افزوده می‌شود. در ادامه اشکال توزیع دمایی سیم‌پیچی‌های فشارضعیف و فشار قوی حاصل از تحلیل حرارتی اجزاء محدود، وقتی ترانسفورماتور در داخل پست قرار ندارد را نشان می‌دهد.



شکل ۵: توزیع دمایی سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف در شرایطی که ترانسفورماتور در داخل پست کمپکت قرار ندارد



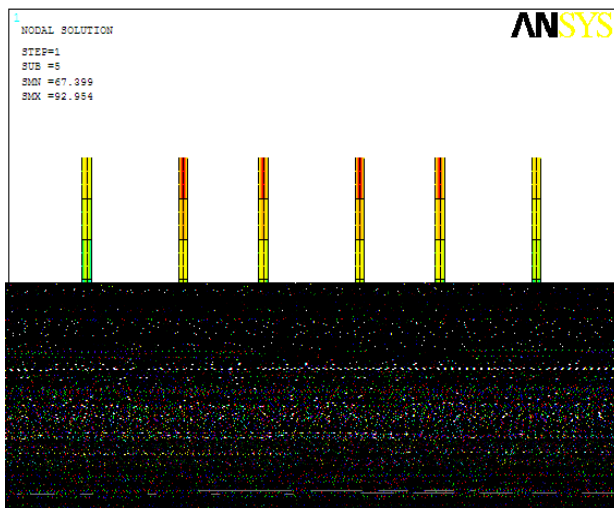
شکل ۶: توزیع دمایی سیم‌پیچ‌های فشار قوی در شرایطی که ترانسفورماتور در داخل پست کمپکت قرار ندارد

همانطور که شکل (۵)، (۶) نشان می‌دهد بیشترین دمای سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف و فشار قوی در شرایطی که ترانسفورماتور در داخل پست کمپکت قرار ندارد، به ترتیب ۸۷/۲۵ و ۷۸/۰۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، که این مقادیر با نتایج اندازه‌گیری‌های عملی که در جدول (۳) آمده است نیز مطابقت دارد [10].

جدول ۳: مقایسه نتایج اندازه‌گیری عملی و تحلیل حرارتی اجزاء محدود

بیشترین دمای سیم‌پیچی‌های فشار قوی	بیشترین دمای سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف	بیشترین دمای سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف
۸۱ درجه سانتی‌گراد	۸۹ درجه سانتی‌گراد	اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی
۷۸/۰۴ درجه سانتی‌گراد	۸۷/۲۵ درجه سانتی‌گراد	تحلیل اجزاء محدود

برای تعیین مقدار افزایش دمای سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور، وقتی ترانسفورماتور در داخل پست کمپکت قرار دارد، توزیع دمایی سیم‌پیچی‌های فشار قوی و فشار ضعیف آن در اشکال (۷) و (۸) آورده شده است.



شکل ۷: توزیع دمایی سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف وقتی ترانسفورماتور در داخل پست کمپکت قرار دارد

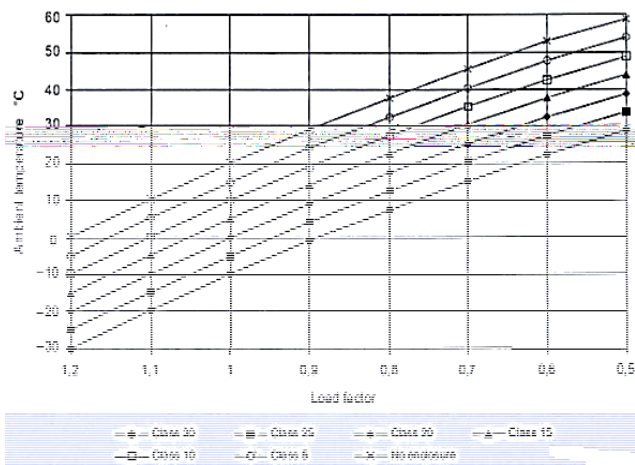
همانطور که در شکل‌ها نیز دیده می‌شود میزان افزایش دمای بیشترین دمای سیم‌پیچی فشار ضعیف وقتی در داخل پست کمپکت قرار می‌گیرد تقریباً هر کدام در حدود شش درجه سانتی‌گراد خواهد بود. این مقدار افزایش درجه برای یک پست کمپکت ۵۰ کیلو ولت آمپری که دمای محیطی که در آن قرار می‌گیرد ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است معقول می‌باشد. البته در بررسی چند نمونه از گزارش‌های تست‌های افزایش دما انجام شده بر اساس استاندارد IEC 62271، توسط آزمایشگاه‌های کارخانه ایران ترانسفو، به نمونه تقریباً مشابهی از یک تست حرارتی انجام شده بروی یک نمونه پست کمپکت ۵۰ کیلو ولت آمپر می‌رسیم که در دمای محیطی ۴۰ درجه سانتی‌گراد که همان دمای آزمایشگاه است، انجام شده است.

میزان افزایش دما		۵/۷ درجه	۹/۲ درجه
سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف در دو حالت	-	سانتی گراد	سانتی گراد

با توجه به جدول (۴) می‌توان دید که در نتایج تست حرارتی که برای یک نمونه پست کمپکت ۵۰ کیلو ولت آمپر انجام شده است میزان افزایش دمای سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف و قوی حدوداً ۱۰ درجه سانتی گراد می‌باشد که این نتیجه با نتیجه حاصل از آنالیز اجزاء محدود که این افزایش دما را در حدود شش درجه برای سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف و قوی نشان می‌دهد، مطابقت دارد. البته این اختلاف با توجه به تفاوت دماهای محیطی که برای پست در نظر گرفته شده قابل توجیه است.

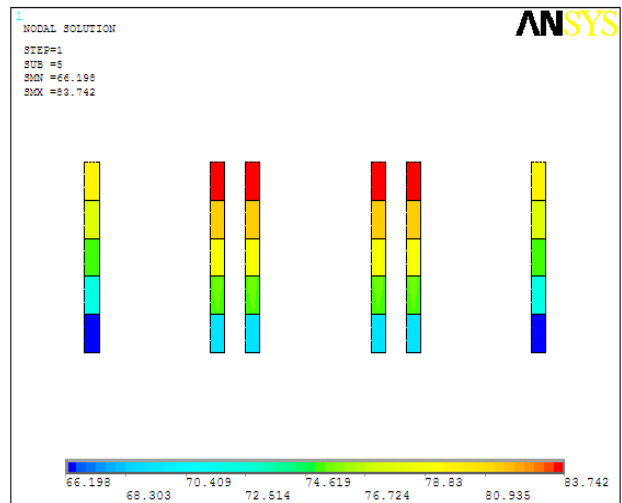
۵- تعیین کلاس حرارتی پست بر اساس تفسیر نتایج

کلاس حرارتی یک پست کمپکت به میزان اختلاف افزایش دمای بین ترانسفورمر در داخل پست و همان ترانسفورمر در خارج از پست، در وضعیت بهره برداری نرمال و بار نامی، اطلاق می‌شود. کلاس‌های حرارتی پست که برای تعیین ضریب بار ترانسفورمر مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل شش کلاس حرارتی ۵k، ۱۰k، ۱۵k، ۲۰k، ۲۵k، ۳۰k است، که برای مثال ۱۰k یعنی اختلاف بین دمای اطراف ترانسفورمر مورد بهره برداری در داخل پست و همان ترانسفورماتور در بیرون پست، ۱۰ درجه سانتیگراد یا ۱۰ درجه کلوین است. همانطور که ذکر شد ضریب بار ترانسفورمر داخل پست کمپکت بر اساس کلاس حرارتی پست و با استفاده از منحنی‌های استاندارد ضریب بار-دما تعیین می‌شود. یک نمونه از منحنی ضریب بار-دما برای ترانسفورمرهای روغنی در شکل (۹) آمده است.



شکل ۹: منحنی ضریب بار-دما برای ترانسفورمرهای روغنی

نتایج بدست آمده از تحلیل اجزاء محدود در تعیین بیشترین دمای سیم‌پیچی‌های ترانسفورمر وقتی در خارج از پست کمپکت قرار دارد با وقتی که در داخل پست کمپکت قرار دارد وجود حدود شش درجه اختلاف دما را نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن تقریب‌های اعمال شده، کلاس حرارتی پست کمپکت مورد نظر ۱۰k در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۸: توزیع دمایی سیم‌پیچ‌های فشار قوی وقتی ترانسفورماتور در داخل پست کمپکت قرار دارد

با در نظر گرفتن دمای محیط و افزودن مقدار دمای آن به مقدار میانگین افزایش دمای سیم‌پیچ‌ها به نتایج جالبی می‌رسیم که جدول (۴) به صورت خلاصه این نتایج را آشکارا بیان می‌کند.

جدول ۴: خلاصه بندی نتایج حاصل از روشهای مختلف برای ترانس ۵۰ کیلو ولت آمپر

تست افزایش دما	تحلیل اجزاء محدود	اندازه گیریهای آزمایشگاهی	تست
۴۰ درجه سانتی گراد	۲۰ درجه سانتی گراد	۲۰ درجه سانتی گراد	۴۰ درجه سانتی گراد
۹۵/۳ درجه سانتی گراد	۷۸/۰۴ درجه سانتی گراد	۸۱ درجه سانتی گراد	بیشینه دمای سیم‌پیچی‌های فشار قوی (ترانس در داخل پست قرار ندارد)
۹۸/۸ درجه سانتی گراد	۸۷/۲۵ درجه سانتی گراد	۸۹ درجه سانتی گراد	بیشینه دمای سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف (ترانس در داخل پست قرار ندارد)
۱۰۴/۵ درجه سانتی گراد	۸۳/۷۴ درجه سانتی گراد	-	بیشینه دمای سیم‌پیچی‌های فشار قوی (ترانس در داخل پست قرار دارد)
۱۰۸/۸ درجه سانتی گراد	۹۲/۹۵ درجه سانتی گراد	-	بیشینه دمای سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف (ترانس در داخل پست قرار دارد)
۱۰ درجه سانتی گراد	۵/۷ درجه سانتی گراد	-	میزان افزایش دمای سیم‌پیچی‌های فشار قوی در دو حالت

۵- نتیجه

برای نتایج تحلیل‌های مغناطیسی و حرارتی اجزاء محدود انجام شده بر روی ترانسفورمر وقتی که در خارج از پست قرار دارد و نیز وقتی در داخل پست قرار دارد حاکی از انطباق خوب این نتایج با نتایج تستهای آزمایشگاهی است و می‌توان از تفسیر نتایج این تحلیل‌های نرم افزاری برای تهیه جدول ضریب بار-دما ترانسفورمر پست کمپکت، که در اختیار خریدار قرار می‌گیرد، استفاده کرد. ضمناً ذکر این نقطه که استفاده از تحلیل‌های نرم افزاری همیشه قابل دسترسی بوده و هزینه بسیار کمی در مقایسه با هزینه‌های انجام تست‌های آزمایشگاهی در قبال صرف مقادیر زیادی پول، زمان و نیز خطر آسیب دیدن پست در حین انتقال به آزمایشگاه، دارد، اهمیت انجام چنین تحلیل‌های نرم افزاری را هر چه بیشتر آشکار می‌کند.

مراجع:

- [1] مجموعه کاتالوگهای شرکت توسعه پستهای ایران ترانسفو
- [2] مجموعه کاتالوگهای شرکت ایران ترانسفو
- [3] S. C. Bell, P. S. Bodger, "Power Transformer Design Using Magnetic Circuit Theory and Finite Element Analysis-A Comparison of Techniques," Australia Power Electric Conference, 2007; 607-612.
- [4] N.E. Mastorakis, C. A. Bulucea, M. C. Popescu, "Transformer Electromagnetic and Thermal Models," 9th WSEAS International Conference on Power Systems, 108-116.
- [5] G. Swift, T.S. Molinski, R. Bray, A. Manzi, "Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling-Part II: Field Verification," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 2, pp. 176-180, 2001.
- [6] G. L. Alegi, W. Z. Black, "Real Time Thermal Model for An Oil-Immersed Forced-Air Cooled Transformer," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 2, pp. 991-999, 1990.
- [7] W. H. Tang, O.H. Wu, Z. J. Richardson, "Equivalent Heat Circuit Based Power Transformer Thermal Model," IEEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. 149, no. 2, pp. 87-92, 2004.
- [8] D. Susa, M. Lehtonen, H. Nordman H, "Dynamic Thermal Modeling of Power Transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 197-204, 2010.
- [9] K. M. Takami, J. Mahmoudi, "Numerical Modeling of Heat Generation and Distribution in the Core and Winding of Power Transformers," International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 9, no. 2, pp. 75-90, 2010.
- [10] J. Faiz, M. B. Sharifian, A. Fakhri, "Oil- Immersed Transformer Thermal Modeling," Euro. Transaction Electric Power, vol. 18, pp. 577-594, 2012.