

مدل سازی حالت گذرای حرارتی در ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه مبتنی بر روش تفاضلات محدود و شبکه های عصبی مصنوعی

داود عزیزیان^۱

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد ابهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ابهر، ایران

d.azizian@abhariau.ac.ir

چکیده: ترانسفورماتورهای چند سیم پیچه به طور عمده ای در صنایع ریلی و کارخانه های فولادسازی مورد استفاده قرار می گیرند. ترانسفورماتورهای مورد استفاده در این سیستم ها دارای ساختار ویژه ای (دوطبقه) بوده و از لحاظ حرارتی و مغناطیسی مشکلات و پیچیدگی هایی را به همراه دارند. با توجه به ساختار ویژه ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه، تحلیل حالت گذرای حرارتی سیم پیچی های این ترانسفورماتور از درجه اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این مقاله ابتدا یک مدل مبتنی بر روش تفاضلات محدود جهت مدل سازی ریاضی رفتار حرارتی سیم پیچی ها در شرایط گذرا معرفی شده است. با تأیید صحت مدل سازی با کمک نتایج تجربی، یک بارگیری نمونه به ترانسفورماتور دوطبقه نوعی اعمال و درجه حرارت سیم پیچی های آن در زمان های مختلف نمونه برداری می شود. در ادامه با ارائه مدل هایی مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی و آموزش آن ها با کمک داده های حرارتی به دست آمده در قسمت اول مقاله، مدل هایی دینامیک جهت مطالعه رفتار حرارتی سیم پیچی های ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه پیشنهاد می شود. چنانچه نشان داده شده است، مدل های ارائه شده بر مبنای شبکه های عصبی، از دقت بالایی جهت مدل سازی حالت گذرای حرارتی در ترانسفورماتور دوطبقه برخوردارند.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور چند سیم پیچه، ساختار دوطبقه (سیم پیچی های مجزا)، مدل سازی حرارتی گذرا، روش تفاضلات محدود، شبکه های عصبی مصنوعی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

نام نویسنده مسئول: دکتر داود عزیزیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - ابهر - کیلومتر ۴ جاده ترانزیت ابهر - خرمدره - دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر - گروه مهندسی برق

ترانسفورماتور با ساختار دوطبقه که اصطلاحاً به آن ترانسفورماتور با سیم پیچی های مجزا (split-winding) گفته می شود، امروزه به صورت گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد. سیستم های کششی (مترو) و کارخانه های فولادسازی به طور گسترده ای از سیستم های یکسوساز استفاده می کنند. یکی از اجزای اصلی این سیستم های یکسوساز، ترانسفورماتور است. ترانسفورماتورهای استفاده شده در سیستم های یکسوساز دوازده پالسه می توانند ساختارهای متفاوتی داشته باشند. یکی از ساختارهای متداول این ترانسفورماتورها، ساختار دوطبقه است که در آن دو جفت سیم پیچی فشار ضعیف و فشارقوی روی هم و بر روی یک هسته مشترک ساخته می شوند. با وجود مزایای بسیار زیادی که ساختار مورد اشاره دارد، طراحی آن نیز پیچیدگی هایی دارد [۱]. از آن جمله می توان به توزیع حرارتی پیچیده و خطرناک در این نوع از ترانسفورماتورها اشاره کرد.

پیش تر مطالعات چندی در مورد مدل سازی حالت پایدار حرارتی در انواع ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه خشک انجام شده است [۲-۱۱]. مراجع [۲ و ۳] مطالعه ای را مبتنی بر نتایج تجربی برای بررسی رفتار حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی با سیم پیچی های هم محور انجام داده اند. مدل هایی نیز ریاضی جهت محاسبه دمای این گونه از ترانسفورماتورها در بارهای خطی و غیر خطی ارائه شده اند [۴-۱۱]. با توجه به اهمیت مطالعه رفتار حرارتی ترانسفورماتور در حالت گذرا، مدل هایی نیز جهت تحلیل رفتار گذرای حرارتی انواع مختلف ترانسفورماتور در مراجع [۱۲-۲۰] ارائه شده اند. مراجع [۱۳-۱۸] مدل هایی مبتنی بر مدارهای RC را جهت بررسی رفتار گذرای حرارتی در سیم پیچی های ترانسفورماتور خشک ارائه و مراجع [۱۳-۱۵] این مدل ها را جهت تخمین عمر و قابلیت اطمینان ترانسفورماتور خشک رزینی استفاده کرده اند. مراجع [۱۹ و ۲۰] نیز مدل جدیدی را مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی جهت مدل سازی رفتار حرارتی ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه خشک در حالت گذرا ارائه کرده است. مطالعات محدودی در خصوص رفتار مغناطیسی و حرارتی ترانسفورماتورهای چند سیم پیچه کششی انجام پذیرفته است [۲۱-۲۵]. مرجع [۲۴] مطالعه جامعی از توزیع درجه حرارت سیم پیچی های ترانسفورماتور کششی دوطبقه را در حالت پایدار ارائه کرده است. این مقاله روش تفاضلات محدود را جهت مدل سازی ریاضی ترانسفورماتور دوطبقه کششی مورد استفاده قرار داده و به بررسی رفتار حرارتی حالت پایدار در سیم پیچی های آن پرداخته است. باوجود مطالعات گسترده در خصوص مدل سازی حرارتی ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه روغنی و خشک، هیچ گونه مطالعه ای در خصوص مدل سازی رفتار گذرای حرارتی در ترانسفورماتور چند سیم پیچه با ساختار دوطبقه انجام نشده و هیچ مدل حرارتی دینامیکی برای آن ارائه نشده است. به این منظور در این مقاله، یک مدل ریاضی مبتنی بر روش تفاضلات محدود جهت مدل سازی رفتار حرارتی ترانسفورماتور چند

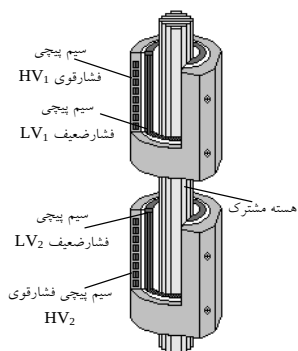
سیم پیچه دوطبقه در حالت گذرا معرفی شده است. با کمک داده های تجربی و نتایج گرفته شده از سازنده، صحت نتایج ارزیابی و اعتبار مدل سازی تأیید می شود. با اعمال یک بارگیری نمونه و دلخواه به نرم افزار مدل سازی حرارتی (توسعه یافته مبتنی بر مدل سازی ریاضی ارائه شده)، تغییرات دما در سیم پیچی ها اندازه گیری و به عنوان داده های آزمایش حرارتی جمع آوری می شوند.

با توجه به قابلیت بسیار بالای شبکه های عصبی مصنوعی در مدل سازی سریع و برخط رفتار سیستم های پیچیده، در ادامه این مقاله، دو مدل دینامیک مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی، جهت مدل سازی حرارتی ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه ارائه شده است. با کمک داده های حرارتی جمع آوری شده، این مدل های حرارتی آموزش دیده و پارامترهای آن ها تخمین زده می شود. پس از آموزش مدل های حرارتی دینامیک، کارایی و اعتبار نتایج آن ها با کمک داده هایی اضافی مورد ارزیابی قرار می گیرند. چنانچه در انتهای مقاله نشان داده شده است، مدل های ارائه شده از دقت و کارایی بسیار بالایی جهت تخمین رفتار گذرای حرارتی در ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه برخوردارند. مدل های پیشنهادی و آموزش دیده به راحتی می توانند جهت ارزیابی و پیش بینی دمای سیم پیچی های ترانسفورماتور دوطبقه در شرایط مختلف بارگیری (به خصوص در مانیتورینگ حرارتی برخط و سریع) مورد استفاده متخصصان در سیستم های کششی و ذوب فلزات قرار گیرند.

۲- مدل سازی ریاضی ترانسفورماتور چند سیم

پیچه دوطبقه جهت محاسبه دمای سیم پیچی ها

ساختار سیم پیچی های ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه در شکل ۱ نشان داده شده است. در این ترانسفورماتور یک جفت سیم پیچ فشار ضعیف و فشارقوی به صورت محوری روی یک ساق هسته مونتاژ شده و ساختاری دوطبقه را شکل می دهند [۱].



شکل (۱): شکل شماتیک ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه

۲-۱- معادلات حرارتی سیم پیچی ها

برای ساده سازی مدل و کوتاه کردن زمان محاسبه، ترانسفورماتور به صورت تکفاز مدل می شود [۸]. انتقال حرارت در ترانسفورماتور چند

سیم پیچ دوطبقه خشک در بخش‌های مختلف بررسی می‌شود [۷-۱۰]. مهم‌ترین بخش انتقال حرارت در داخل سیم پیچی سلب رخ می‌دهد. این انتقال حرارت از نوع هدایت بوده و معمولاً در مختصات استوانه‌ای بیان می‌شود:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۱)$$

که T درجه حرارت، q چگالی تلفات و k و α ضرایب هدایت و نفوذ حرارتی هستند.

در این تحقیق برای حل رابطه (۱) از روش تفاضلات محدود استفاده شده و ساختار ترانسفورماتور به واحدهایی (که توسط گره‌هایی نمایندگی می‌شوند) در راستای شعاعی (۲) و محوری (۳) تقسیم می‌شود [۷].

اساس روش تفاضلات محدود و استخراج معادلات مربوطه در تک تک گره‌ها، بر قانون بقای انرژی استوار است:

(۲) حرارت = انرژی حرارتی + حرارت انتقالی به تولیدی واحد = انتقالی به واحد + دیگر واحدها
حرارت انتقالی از یک جزء به جزء دیگر به صورت نسبتاً اختلاف دما بر مقاومت حرارتی بیند و جزء مشخصی گردد.

در حالت پایدار، انرژی حرارتی انتقالی به واحد برابر صفر است؛ با این حال در شرایط گذرا، این کمیت به صورت افزایشی در مجموع انرژی واحد ظاهر می‌شود.

در این حالت، واحد به صورت یک خازن مجتمع رفتار می‌کند. بنابراین با اعمال قانون بقای انرژی (۲) به واحد (ij)، رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\sum_{\substack{(i'j') \in \\ (ij \pm 1) \\ (i \pm 1j)}} \frac{T_{ij} - T_{i'j'}}{R_{ij-i'j'}} + h_{ij}(T_{ij} - T_{air}) + C_{ij} \frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = q_{ij} \quad (۳)$$

که T_{ij} دمای مطلق واحد، $T_{i'j'}$ دمای مطلق واحدی مجاور در سیم پیچی، T_{air} دمای محیط، $R_{ij-i'j'}$ مقاومت حرارتی واحد نسبت به واحدی مجاور در سیم پیچی، h_{ij} ضریب انتقال حرارت واحد نسبت به محیط (برای گره‌های سطحی)، C_{ij} خازن حرارتی واحد و q_{ij} حرارت تولیدی (تلفات) واحد است. مقاومت، خازن و حرارت تولیدی واحدها در ادامه تشریح می‌شوند.

در بسیاری موارد بجای دمای مطلق (T)، کمیتی به نام جهش حرارتی ($\theta = T - T_{air}$) مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای استخراج رابطه‌ای مبتنی بر جهش حرارتی θ ، رابطه (۳) را می‌توان با جایگذاری $T \leftarrow \theta + T_{air}$ بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\sum_{\substack{(i'j') \in \\ (ij \pm 1), (i \pm 1j)}} \frac{\theta_{ij} - \theta_{i'j'}}{R_{ij-i'j'}} + h_{ij}\theta_{ij} + C_{ij} \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial t} = q_{ij} \quad (۴)$$

از آنجایی که $\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial t} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial t}$ و $T_{ij} - T_{i'j'} = \theta_{ij} - \theta_{i'j'}$ تنها عبارت دوم سمت چپ تغییر کرده و دمای محیط از روابط حذف می‌شود.

با فرض تغییرات حوزه زمان (Δt) بسیار کوچک، می‌توان تقریب $\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial t} \approx \frac{\theta_{ij}(t+1) - \theta_{ij}(t)}{\Delta t}$ را به کار برده و رابطه (۴) را به صورت رابطه گسسته (۵) باز نویسی کرد. با اعمال رابطه (۵) به تمامی گره‌ها، شکل ماتریسی (۶) برای محاسبه دما در هر لحظه از زمان به دست می‌آید.

$$\theta_{ij}(t+1) = \theta_{ij}(t) + C_{ij}^{-1} \Delta t \times \{q_{ij} - \sum R_{ij-i'j'}^{-1} (\theta_{ij}(t) - \theta_{i'j'}(t)) - h_{ij}\theta_{ij}(t)\} \quad (۵)$$

(۶) $\theta(t+1) = \theta(t) + C^{-1} \Delta t \times \{Q - G\theta(t) - H\theta(t)\}$
که θ و Q آرایه ستونی دما و حرارت تولیدی، G ماتریس هدایت حرارتی، H ماتریس قطری انتقال حرارت به محیط و C ماتریس قطری خازن در گره‌های باشند.

۲-۲- مقاومت‌ها ($R_{ij-i'j'}$) و خازن (C_{ij}) حرارتی

با توجه به ساختار جامد سیم پیچی (متشکل از هادی‌های آلومینیومی و عایق‌های جامدی چون دی‌ام‌دی، مایلار و رزین)، تنها راه انتقال حرارت در داخل آن از طریق هدایت بوده و مقاومت حرارتی مرتبط با گره‌های میانی سیم پیچی می‌تواند از (۷) محاسبه شود.

$$R_{ij-i'j'} = Ak / L_{ij-i'j'} \quad (۷)$$

که در آن k ضریب هدایت حرارتی معادلسیم پیچی، A سطح عمود بر جریان حرارتی (شعاع متوسط دو گره $\pi \times 2$) و $L_{ij-i'j'}$ طول مسیر جریان حرارتی (فاصله بین دو گره) می‌باشند.

خازن حرارتی معادل هر واحد نیز از (۸) محاسبه می‌شود که ρ چگالی وزنی معادل، C_p ظرفیت حرارتی و V حجم واحد سیم پیچی می‌باشند.

$$C_{ij} = \rho C_p V \quad (۸)$$

۳-۲- ضرایب انتقال حرارت به محیط (h_{ij})

تشعشع در سطوح خارجی محوری: بخشی از حرارت به روش تشعشعی از سطوح خارجی ترانسفورماتور به محیط بیرون منتقل می‌شود. شار حرارتی انتقالی توسط تشعشع را می‌توان به صورت (۹) بیان کرد [۲۴].
(۹) $h = \varepsilon \sigma (T_s^3 + T_s^2 T_{air}^3 + T_s T_{air}^3 + T_{air}^3)$
که T_s دمای مطلق سطح، ε ضریب تشعشع از دیواره و σ ثابت استفان بولتزمن [۲۴] هستند.

جابه‌جایی آزاد در سطوح خارجی محوری: جابه‌جایی طبیعی هوا در این بخش ناشی از نیروهای ارشمیدس در سیال بوده، به‌طوری که هوای گرم و سبک ترجیح می‌دهد به سمت بالا فرار کرده و جای خود را به هوای سرد و سنگین بدهد. در واقع با افزایش ارتفاع، لایه‌های مرزی سرعت و حرارت از سطح صفحه فاصله می‌گیرند. دورتر شدن لایه‌مرزی از سطح سبب افزایش مقاومت حرارتی (و در نتیجه دمای دیواره نسبت به محیط می‌شود. در این تحقیق، جهت ساده‌سازی مدل حرارتی از روابط تجربی جابجایی طبیعی در سطوح عمودی با طول بی‌نهایت که پیش‌تر در مدل‌سازی حرارتی ترانسفورماتور خشک دو سیم پیچ مورد استفاده قرار گرفته بودند [۷]، استفاده شده است:

۴-۲- تلفات سیم پیچی (q_{ij})

روش‌های متعددی جهت محاسبه میدان مغناطیسی و تلفات سیم پیچی‌ها ارائه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به مراجع [۷ و ۲۴] اشاره کرد. در این تحقیق، از یک روش تلفیقی سریع و دقیق جهت محاسبه این کمیت استفاده شده است:

- ابتدا جریان سیم پیچی‌ها با استفاده از مدار معادل ترانسفورماتور [۲۱] و متناسب با بارگیری محاسبه می‌شود.

- سپس با کمک مدل ساده اجزای محدود، توزیع میدان مغناطیسی در نقاط مختلف محاسبه می‌شود [۲۱ و ۲۵].

- با کمک شدت میدان‌های شعاعی و محوری محاسبه شده در هر هادی، تلفات هر واحد از (۱۳) محاسبه می‌شود:

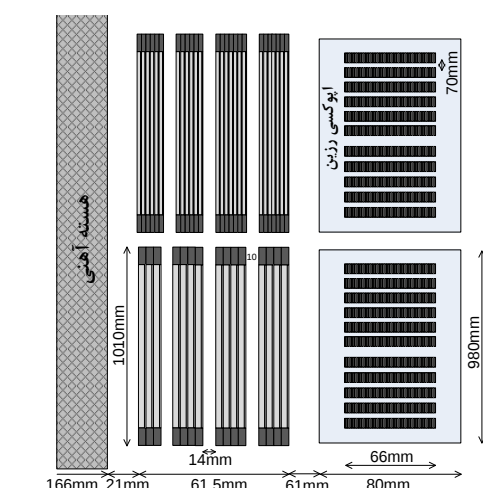
$$q_{ij} = (1 + K_{eddy})P_{dc} \quad (13)$$

در این رابطه P_{dc} تلفات اهمی ثابت K_{eddy} ضریب تلفات فوکو است که از [۷ و ۸] قابل محاسبه است.

مشخص است که تلفات سیم پیچ‌ها مرتبط با جریان گذرنده از آنهاست.

۵-۲- نتایج مدل سازی حرارتی و اعتبار سنجی آن

در این مقاله، یک ترانسفورماتور ۴۰۰۰ kVA، ۲۰ kV/۲×۷۵۰ V [۲۲] مطابق شکل ۲ انتخاب و رفتار حرارتی آن مطالعه شده است.



شکل (۲): شکل دوبعدی و ابعاد ترانسفورماتور مورد مطالعه

شکل ۳، توزیع دمای سیم پیچ‌های ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.

$$h = \sqrt[5]{\frac{4Pr^2 g \beta k^4 \bar{q}_{co}}{(36 + 45Pr)v^2 Z}} \quad (10)$$

که در این روابط، g شتاب جاذبه، k ضریب هدایت حرارتی هوا، Pr عدد پرانتل، $\bar{q}_{co}$ شار حرارتی متوسط سطح، Z ارتفاع از پایین، β ضریب انبساط حرارتی هوا و v ویسکوزیته هوا می‌باشند.

جابه جایی آزاد در مجاری هوای محوری: جابه جایی در اینجا تا حدودی متفاوت از جابه جایی در سطح خارجی استوانه عمودی بوده و به جریان داخلی معروف است. تا نقطه‌ای در ارتفاع معین لایه مرزی مشابه دو صفحه عمودی مجزا است، این ناحیه به ناحیه ورودی معروف است. ناحیه‌ای که بلافاصله بعد از طول ورودی به دلیل برخورد و هم پوشانی لایه‌های مرزی رخ می‌دهد به نام ناحیه کاملاً توسعه یافته خوانده می‌شود. مشابه قبل جهت ساده سازی مدل سازی حرارتی، از روابط تجربی برای توصیف جابه جایی طبیعی در فواصل هوایی محوری استفاده شده است [۷]:

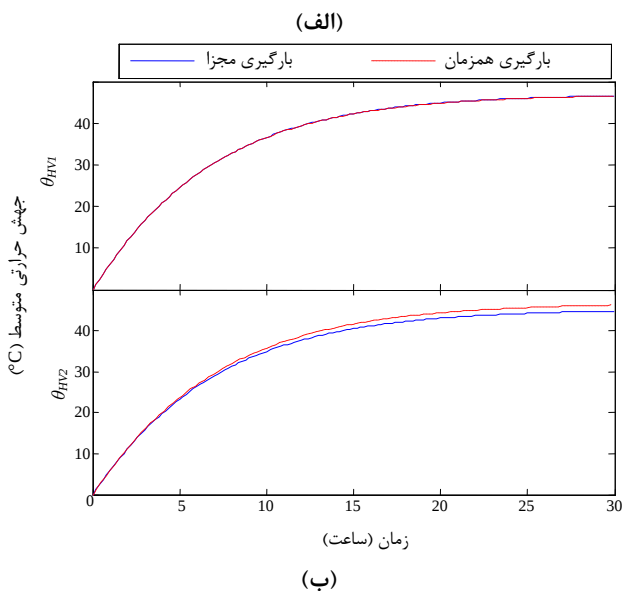
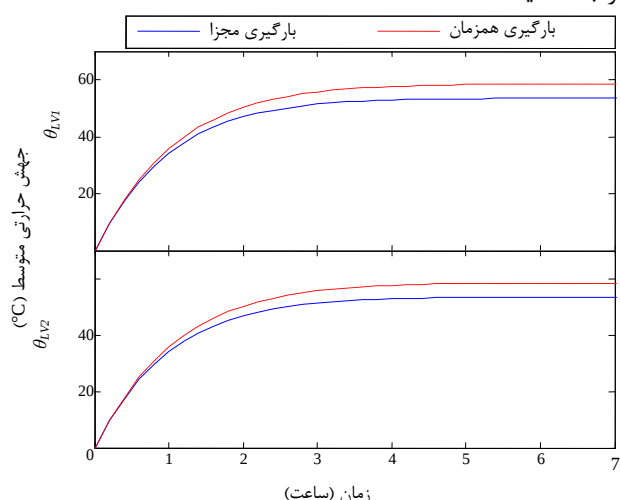
$$h = \frac{k}{b} \begin{cases} C_1 \sqrt{(1+R)\varphi_z^2} & \varphi_z \leq 60^\circ \\ C_2 \left[\frac{1}{(1+R)\left(\frac{1}{\varphi_z} \sqrt{\frac{24}{1+R}} - \frac{9}{70}\right)} + \frac{1}{2} \right] & \varphi_z \geq 60^\circ \end{cases} \quad (11)$$

$$\varphi_z = \sqrt{\frac{g \beta Pr L b^5 \bar{q}_{cd}}{k v^2}} \frac{1}{Z} \quad (12)$$

که R برای هر دیواره، نسبت شار حرارتی دیواره مقابل به دیواره مورد مطالعه، $\bar{q}_{cd}$ شار حرارتی متوسط هر دیواره، b پهنای مجرا، L ارتفاع کل مجرا هستند. C_1 و C_2 ضرایب ثابتی هستند که به صورت تجربی تعیین می‌شوند [۲۴].

سطوح خارجی شعاعی (بالا و پایین سیم پیچی‌ها): در سطوح بالا و پایین سیم پیچی‌ها، انتقال حرارت از دو طریق جابه جایی و تابش انجام می‌شود، و تا حدود زیادی ناشناخته و وابسته به شرایط محیطی است. مشکلی که در اینجا با آن روبه‌رو هستیم، این است که در محیط‌های مختلف، با ضرایب جابه جایی و تشعشع متفاوتی مواجه هستیم که فرموله کردن آن‌ها تقریباً غیرممکن و تنها از طریق تجربی مقدور است. خوشبختانه چنانچه در مرجع [۷] نشان داده است، انتقال حرارت از سطوح بالا و پایین سیم پیچی‌ها با تقریب بسیار خوبی قابل صرف نظر کردن می‌باشند. تنها مشکلی که در مدل سازی فاصله سطح میانی سیم پیچی‌های بالا و پایین وجود دارد، میزان دبی هوای ورودی از طریق این فاصله به مجاری هوایی سیم پیچی‌های بالا است. با وجود ناشناخته بودن میزان هوای ورودی از طریق این فاصله (که سبب تغییر در لایه‌های مرزی مجاری هوا در سیم پیچی‌های بالایی می‌شود)، بهتر است بدترین حالت ممکن در نظر گرفته شده و از این هوای ورودی صرف نظر شود. البته توجه شود که در بسیاری موارد این فاصله به دلایل فنی و تولیدی حذف و یا پوشانده می‌شود و بنابراین عملاً هیچ هوایی از این طریق وارد مجاری نمی‌گردد.

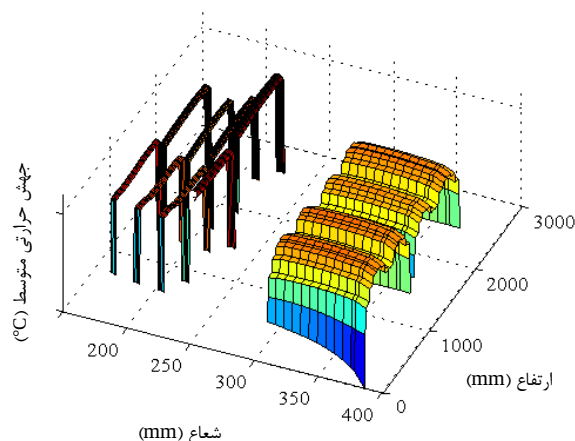
دیده می‌شود که ثابت زمانی حرارتی سیم‌پیچ‌های فشارقوی بیشتر از سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف است. این ثابت زمانی بیشتر، سبب می‌شود که حساسیت جهش حرارتی سیم‌پیچ‌های فشارقوی به تغییرات بار ترانسفورماتور کمتر از سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف باشد. بنابراین چنانچه در بخش ۴ نیز نشان داده شده است، عملاً اضافه بارگیری‌های کوتاه مدت، روی جهش حرارتی سیم‌پیچ‌های فشارقوی تأثیر بسیار کمتری داشته و خطر کمتری را ایجاد می‌کنند. برای درک بهتر مدل‌سازی حرارتی در حالت پایدار و مطالعه بیشتر درخصوص نتایج مسئله مدل‌سازی و توزیع درجه حرارت حالت پایدار مرتبط با ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه، خواننده می‌تواند به مرجع [۲۴] مراجعه نماید.



شکل (۴): دمای سیم‌پیچ‌های (الف) فشار ضعیف و (ب) فشارقوی در بارگیری‌های مجزا و هم‌زمان ترانسفورماتورهای بالا و پایین

۳- مدل‌های حرارتی مبتنی بر شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی مجموعه‌ای از نورون‌های به هم پیوسته‌اند که از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی



شکل (۳): توزیع جهش حرارتی در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور

چنانچه از جدول ۱ دیده می‌شود، مدل‌سازی ارائه شده با دقت مناسبی دمای سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور دوطبقه را تخمین می‌زند.

جدول (۱): جهش حرارتی سیم‌پیچ‌ها در حالتی که سیم‌پیچ‌های بالا و پایین به صورت دو ترانسفورماتور مجزا باشند

	جهش حرارتی متوسط سیم‌پیچ			
	LV ₁	HV ₁	LV ₂	HV ₂
کارخانه	۶۰	۴۵	۵۳	۴۵
روش تفاضلات محدود	۶۲	۴۷	۵۳	۴۵
روش اجزای محدود	۶۱	۴۵	۵۴	۴۶

جدول ۲ جهش حرارتی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور دوطبقه را با نتایج حاصل از بارگیری سیم‌پیچ‌های بالا و پایین به صورت دو ترانسفورماتور مجزا مقایسه می‌کند.

جدول (۲): جهش‌های حرارتی متوسط و نقطه داغ در سیم‌پیچ‌ها

بارگیری ترانسفورماتور بالا و پایین	جهش حرارتی متوسط				جهش حرارتی نقطه داغ			
	LV ₁	HV ₁	LV ₂	HV ₂	LV ₁	HV ₁	LV ₂	HV ₂
مجزا	۶۲	۴۷	۵۳	۴۵	۷۱	۵۶	۶۷	۵۵
دوطبقه (هم‌زمان)	۶۰	۴۷	۵۸	۴۷	۷۱	۵۶	۷۴	۵۶

شکل ۴ نیز حالت گذاری حرارتی سیم‌پیچ‌ها را در بارگیری هم‌زمان و مستقل دو ترانسفورماتور بالا و پایین نشان می‌دهد. در حالت بارگیری هم‌زمان دو ترانسفورماتور به صورت دوطبقه، دمای سیم‌پیچ‌های بالا بیشتر و دمای سیم‌پیچ‌های پایین کمتر از حالتی است که دو ترانسفورماتور به صورت مجزا ساخته و بارگیری می‌شوند. دمای پایین‌تر ترانسفورماتور پایینی را می‌توان مرتبط با افزایش ارتفاع مجاری هوا در روابط مربوط به جابجایی طبیعی هوا (افزایش L) توجیه نمود. با این حال و با وجود افزایش ارتفاع مجاری هوا که می‌تواند سبب بهبود انتقال حرارت ترانسفورماتورها شود، ارتفاع بالاتر سیم‌پیچ‌های بالایی (افزایش Z) سبب کاهش انتقال حرارت و افزایش دما در سیم‌پیچ‌ها (تا ۱۱ درصد) شده و شرایط خطرناکی را پدید می‌آورد.

بیولوژیک واقعی استفاده می کنند [۲۷ و ۲۸]. در یک شبکه عصبی مصنوعی، نورون های مصنوعی توسط وزن های قابل تنظیم به یکدیگر متصل می شوند تا بتوانند ارتباطات پیچیده بین ورودی و خروجی ها مدل کنند. یک شبکه عصبی می تواند برای تولید خروجی یا خروجی ها به ازای مجموعه مشخصی از ورودی ها آموزش ببیند.

چنانچه در قسمت قبل (رابطه ۶) نشان داده شد، جهش حرارتی سیم پیچ در هر لحظه تابعی از تلفات و در نتیجه جریان گذرنده از سیم پیچی (یا نسبت جریان سیم پیچی به جریان نامی آن)، دمای لحظاتی قبل و مشخصات حرارتی سیم پیچی می باشد. از طرف دیگر پارامترهای حرارتی سیم پیچی و به خصوص هوا بستگی شدید به دما دارند. بنابراین مدلی غیر خطی و دینامیک برای مطالعه رفتار حرارتی گذرای ترانسفورماتور نیاز است.

توجه شود که چون هدف محاسبه جهش حرارتی است، از تأثیر دمای محیط در رابطه (۶) صرف نظر شده و ورودی این مدل غیر خطی و دینامیک می بایست جریان سیم پیچی باشد. خروجی ها نیز با توجه به هدف مسئله، از نوع جهش حرارتی در نظر گرفته می شوند. انتخاب و ارائه جهش حرارتی سیم پیچ ها به جای دمای مطلق امری متداول در مطالعات حرارتی پایدار [۲۴] و گذرا [۱۴-۱۶] است. اصولاً انتخاب جهش حرارتی به جای دمای مطلق سیم پیچ ها برای کاهش متغیر دمای محیط و حذف آن در مطالعات حرارتی می باشد که به سادگی معادلات و مطالعات می انجامد. پیشتر نیز در مطالعات دیگر [۱۴-۱۶] اشاره شده است که می توان تأثیر دمای محیط را در مدل جهش حرارتی (و نه دمای مطلق) نادیده گرفت. قطعاً اضافه کردن دمای محیط به ورودی های مؤثر در مدل حرارتی ساده بوده و می تواند سبب افزایش بیشتر دقت مدل حرارتی شود. اما باعث پیچیدگی مدل جهت کاربردهای مانیتورینگ حرارتی شده و نیاز به نمونه برداری های بیشتر توسط بهره بردار را ضروری می نماید که امری مطلوب نیست.

حالت اول: اگر سیم پیچی ها مستقل از یکدیگر فرض شوند، می توان چهار مدل حرارتی دینامیک با یک ورودی و تنها یک خروجی برای مدل سازی رفتار حرارتی ترانسفورماتور دوطبقه در نظر گرفت.

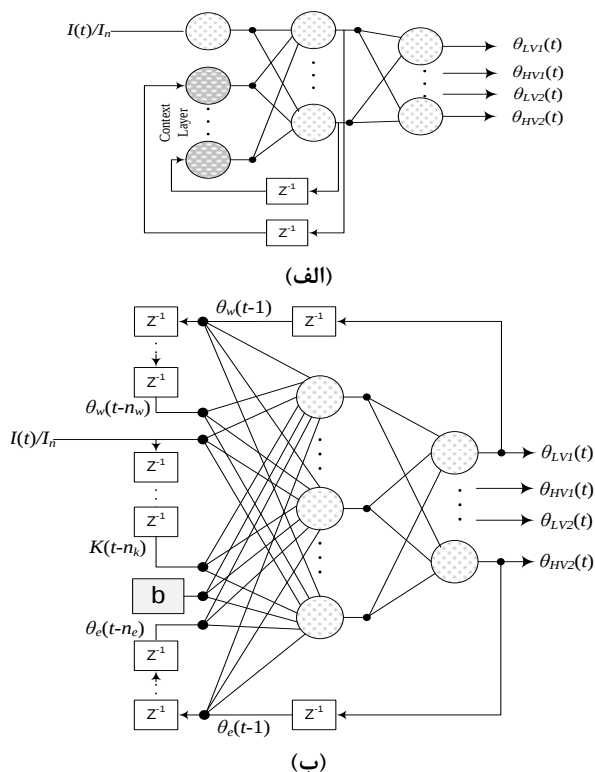
حالت دوم: اگر ارتباط بین سیم پیچی های فشار ضعیف و فشار قوی هم محور در نظر گرفته شود (این ارتباط می تواند از طریق مجرای هوای بین این سیم پیچی ها باشد) و از ارتباط مغناطیسی و حرارتی ترانسفورماتورهای بالا و پایین صرف نظر شود، دو مدل با ورودی ضریب جریان سیم پیچی (فشار ضعیف پایین یا بالا) و دو خروجی دما مطلوب اند.

حالت سوم: اگر ارتباطی بین سیم پیچی های بالا و پایین در نظر گرفته شود، یک مدل حرارتی با دو ورودی ضریب جریان سیم پیچی های فشار ضعیف پایین و بالا و چهار خروجی دما مورد نیاز است. در این مدل یکپارچه، ارتباط بین جریان های سیم پیچی ها، در ارتباط بین نرون ها نهفته خواهد بود.

در این تحقیق ضمن در نظر گرفتن حالت سوم (البته در انتهای مقاله، نتایج با حالت اول مقایسه شده اند)، فرض شده است که جریان همه سیم پیچی ها متناسب با یکدیگر تغییر داده می شود و بنابراین تنها یک ورودی ضریب جریان کافی است. این فرض برای سادگی محاسبات در نظر گرفته شده است؛ در غیر این صورت می بایست آزمایش های پیچیده تری ترتیب داده می شد. برای دستیابی به اهداف مورد اشاره، دو مدل شبکه عصبی بازگشتی ارائه شده است:

* اولین مدل، شبکه عصبی بازگشتی المان (ELRN) است که به صورت گسترده ای برای مدل سازی سیستم های دینامیک مورد استفاده قرار می گیرد. ELRN از لایه های ورودی، پنهان، زمینه و خروجی تشکیل می شود (شکل ۵-الف). شاخه های بازگشتی در لایه زمینه سبب حساسیت شبکه ELRN به گذشته خروجی شده و رفتاری دینامیک را ایجاد می کند.

* دیگر شبکه عصبی مورد استفاده، مدل NARX است که یکی از شبکه های عصبی دینامیک قدرتمند برای مدل سازی سیستم های غیر خطی و وابسته به زمان است. پروسه یادگیری NARX بسیار مؤثر بوده و با سرعت بالایی همگرا می شود. در مدل سازی سیستم های وابستگی های زمانی طولانی مدت، مدل NARX بهتر از سایر شبکه ها است. یکی از ساده ترین روش های به کارگیری این مدل ها، استفاده از یک شبکه با تغذیه پیشرو با ورودی های تأخیردار شده به علاوه شاخه هایی از خروجی های تأخیردار شده در ورودی است (شکل ۵-ب).



شکل (۵): ساختار مدل های الف) ELMAN و ب) NARX

در این تحقیق، روش های مختلف آموزش بر روی دو عصبی ارائه شده آزمایش و تعداد لایه های پنهان، نوع توابع تبدیل و تعداد تکرارها

به واسطه روش سعی و خطا تعیین شده‌اند. هر دو شبکه توسط روش 'Marquardt-Levenberg' آموزش داده شدند و توابع تبدیل 'logsig' و 'purelin' به ترتیب برای لایه‌های مخفی و لایه‌های خروجی انتخاب شده‌اند. لایه مخفی نیز با ۶ نورون انتخاب شده است.

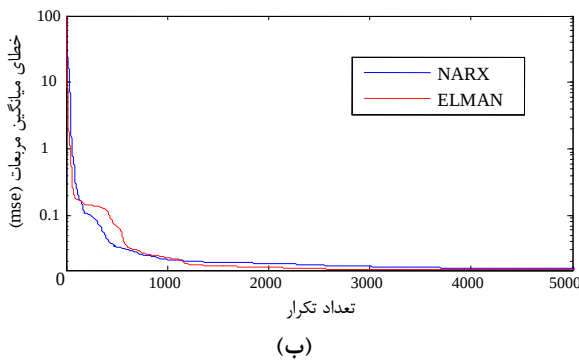
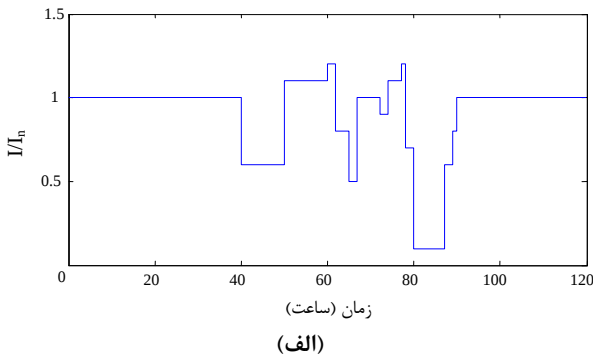
در حالت ایده‌آل برای تخمین و آموزش مدل‌های حرارتی ارائه شده بهتر است از داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌های حرارتی در حالت‌های گذرا و با اعمال بارگیری‌های مشخصی استفاده شود. با این حال از آنجایی که هدف مقاله حاضر مدلسازی دمای متوسط سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور به صورت مجزا است و اندازه‌گیری‌های مرتبط با آن بسیار پرهزینه و در موارد عملی ناممکن هستند. لذا در این مقاله مدل ریاضی ارائه شده در بخش قبل جهت مدلسازی آزمایش‌های حرارتی در حالت گذرا مورد استفاده قرار گرفته است.

ضمناً توجه شود که هدف تحقیق حاضر استخراج مدلی سریع و دقیق مبتنی بر داده‌های مستخرج از مدل ریاضی، جهت مانیتورینگ حرارتی برخط در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه است. در این حالت چنانچه در مقالات پیشین [۲۴ و ۲۶] و مقاله حاضر، تا حد امکان دقت مدل‌های ریاضی ارزیابی و تأیید شده‌اند، این مدل‌ها به عنوان مرجعی جهت انجام آزمایش‌های حرارتی گذرا در ترانسفورماتور مورد اشاره در نظر گرفته شده‌اند. مدل‌های مانیتورینگ حرارتی سریع ارائه شده مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی با کمک نتایج حاصل از این آزمایش‌ها تخمین و درنهایت ارزیابی می‌شوند. لازم به ذکر است که پارامترهای مدل‌های ارائه شده تنها یک بار تخمین زده شده و در حین بهره‌برداری می‌توانند به سرعت جهش حرارتی سیم‌پیچ‌ها را متناسب با میزان بارگیری تخمین زده و برای امور حفاظتی مورد استفاده قرار گیرند. قطعاً در صورت وجود امکان اندازه‌گیری‌های جامع حرارتی به صورت تجربی، می‌توان داده‌های تجربی گذرا را به جای داده‌های مدلسازی ریاضی مورد استفاده قرار داده و نتایج قابل اعتمادتری را از مدل‌های ارائه شده انتظار داشت. با این حال حتی در صورت امکان، در عمل چنین آزمایش‌های تجربی برای سازندگان و بهره‌برداران ترانسفورماتور مقدور و به صرفه نمی‌باشد.

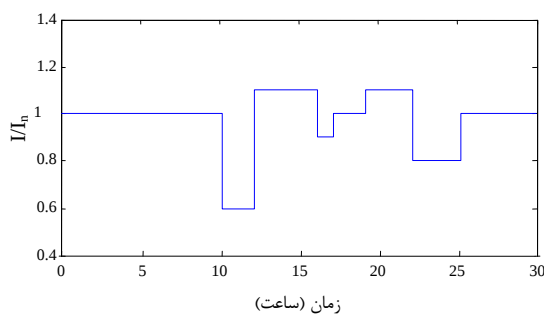
۴- تحلیل نتایج و ارزیابی مدل‌های حرارتی

با کمک نرم‌افزار مدلسازی حرارتی ریاضی ارائه شده در بخش قبل و اعمال یک بارگیری نوعی (شکل ۶-الف) به آن، داده‌های حرارتی گردآوری و برای آموزش مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (گام زمانی اندازه‌گیری‌ها هر ۱۵ دقیقه می‌باشد). با توجه به انتخاب این سیکل ترکیبی با تغییرات مکرر میزان بار و جریان سیم‌پیچ‌ها (برخلاف بارگیری ثابت)، عملاً مدل تحت شرایط مختلف قرار گرفته و آموزش شبکه با کارایی خوبی انجام می‌شود. از شکل ۶-ب دیده می‌شود که مدل حرارتی مبتنی بر NARX با سرعت بالاتری آموزش دیده و پارامترهای آن تخمین زده شده‌اند.

با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایش حرارتی، هر دو مدل ارائه شده مبتنی بر شبکه‌های عصبی آموزش دیدند. حال این مدل‌های آموزش دیده، می‌توانند جهت تخمین دمای حالت گذرای ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه در هر نوع شرایط بارگیری مورد استفاده قرار گیرند. در ادامه جهت تأیید صحت و اعتبار نتایج مدل‌های ارائه شده، یک بارگیری آزمایشی مطابق با شکل ۷ به مدل‌ها اعمال و دمای سیم‌پیچی‌ها استخراج شده‌اند. از آنجایی که این سیکل بارگیری جدید که هیچ ارتباطی به سیکل آموزش ندارد، جهت ارزیابی مدل آموزش دیده استفاده شده، نتایج اعتبارسنجی قابل اعتماد خواهند بود.



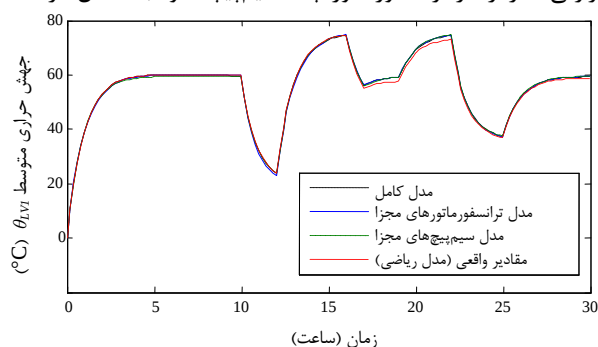
شکل (۶): (الف) آزمایش حرارتی برای آموزش مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی - (الف) بارگیری و (ب) پروسه آموزش



شکل (۷): بارگیری آزمایشی برای تأیید صحت مدلسازی

نتایج تخمین جهش حرارتی سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور دوطبقه توسط مدل‌های ارائه شده با نتایج واقعی (محاسبه شده توسط نرم‌افزار مدلسازی ریاضی بخش ۲) در شکل ۸ مقایسه شده‌اند. از این شکل‌ها دیده می‌شود که هر دو مدل ارائه شده با دقت بسیار بالایی رفتار حرارتی گذرا را در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه مدل می‌کنند. تفاوت معناداری در دقت مدلسازی مدل‌های حرارتی مبتنی بر ELRN و NARX وجود ندارد.

نهایتاً توجه شود که مدل حرارتی ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه به صورت یکپارچه (حالت سوم) و با تنها یک ورودی جریان در نظر گرفته شده است. این مسئله می تواند سبب بروز مشکلاتی در تخمین دمای سیم پیچی ها در بارگیری های نامتقارن و خطاها شود. بنابراین در صورت نیاز می توان تعداد ورودی های ضریب جریان را در مدل یکپارچه افزایش داده یا از مدل های ترانسفورماتور مجزا (حالت دوم) و سیم پیچی های مجزا (حالت اول) استفاده کرد. برای نمونه، شکل ۱۰ نتایج تخمین دمای سیم پیچی فشارضعیف پایین را که توسط مدل های مجزا و یکپارچه استخراج شده اند، مقایسه می کند. چنانچه مشخص است، هر سه حالت مدل سازی با دقت بسیار بالایی رفتار حرارتی گذرا را در ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه مدل کرده اند.



شکل (۱۰): مقایسه تخمین دما در مدل های مختلف ELMAN

مدل سازی ریاضی از دقت بالایی برخوردار است و می تواند برای بررسی رفتار حرارتی گذرای ترانسفورماتور در شرایط مختلف بارگیری به کار رود. با این حال با توجه به پیچیدگی و زمان بر بودن آن، گزینه مناسبی در کاربردهای پایش (مانیتورینگ) درجه حرارت سیم پیچی ها در حالت برخط نیست. در چنین مواردی، مدل های دینامیک ارائه شده بر مبنای شبکه های عصبی مصنوعی می توانند راهگشا بوده و در عین سادگی با دقت بالایی رفتار حرارتی گذرای سیم پیچی های ترانسفورماتور دوطبقه را تخمین بزنند.

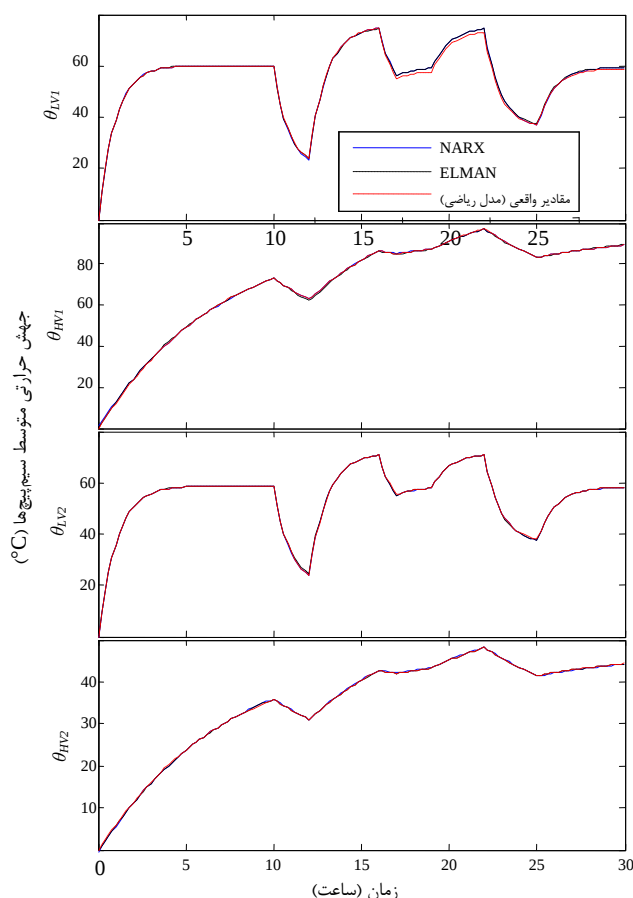
مجدداً از شکل ۸ دیده می شود که حساسیت دمای سیم پیچ های فشارقوی (بشقابی با رزین قالب ریزی شده) به تغییرات بار بسیار کمتر بوده و بارگیری های کوتاه مدت و سریع، تأثیر بسیار کمی روی جهش حرارتی این سیم پیچ ها می گذارند.

۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، در ابتدا مدل سازی ریاضی ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه بر مبنای روش تفاضلات محدود جهت مطالعه رفتار گذرای حرارتی سیم پیچی ها ارائه شد. بعد از تأیید اعتبار مدل ریاضی، با کمک نرم افزار مدل سازی حرارتی نوشته شده، رفتار حرارتی سیم پیچی ها تحت شرایط مختلف بارگیری مورد مطالعه قرار گرفت.

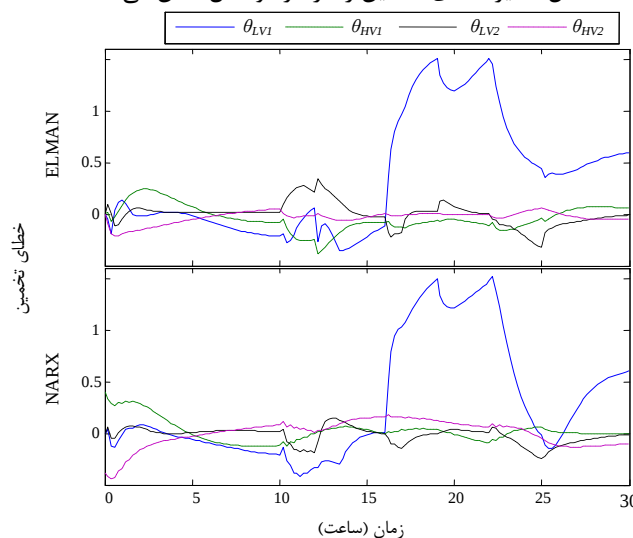
چنانچه نشان داد شد، مدل ریاضی و نرم افزار مربوطه، از دقت بالایی برخوردارند. با وجود دقت بالای مدل ریاضی، در عمل نیاز به

هر دو مدل با خطای بسیار ناچیزی دما را تخمین می زنند و تنها در سیم پیچی فشارضعیف پایین و در زمان هایی خاص این خطا به حدود ۳٪ می رسد. علاوه بر دقت بالای تخمین دما، این مدل ها از پیچیدگی کمی در مدل سازی رفتار حرارتی گذرای ترانسفورماتور برخوردارند.



شکل (۸): تخمین جهش حرارتی سیم پیچی های ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه

شکل ۹ نیز خطای تخمین را در هر دو مدل نشان می دهد.



شکل (۹): خطای تخمین دمای سیم پیچی ها در مدل های ELMAN و NARX

Improving the Accuracy of Predictions", MSc Thesis, Arizona State University, USA, 2014.

- [13] Taghikhani, M. A., "Power transformer top oil temperature estimation with GA and PSO methods", Energy and Power Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 41-46, 2012.
- [14] Azizian, D., Bigdeli, M., Fotuhi-Firuzabad, M., "A Dynamic Thermal based Reliability Model of Cast-Resin Dry-Type Transformers", International Conference on Power System Technology (POWERCON), Hangzhou, China, 2010.
- [15] Azizian, D., Bigdeli, M., "Cast-Resin Dry-Type Transformer Thermal Modeling Based on Particle Swarm Optimization", Advances in Intelligent Systems and Computing 356, DOI 10.1007/978-3-319-18296-4_12, pp. 141-153, 2016.
- [16] Azizian, D., Bigdeli, M., "Application of Heuristic Methods for Dynamic Thermal Modelling of Cast-Resin Transformer", International Journal of Advanced Intelligence Paradigms, Vol. 8, No. 3, 2016.
- [17] Najafi, A., Iskender, I., "Thermal Modeling and Electromagnetic Analysis of 1000 kVA Distribution Transformer Based on Electrical-Thermal Equivalent Circuit and FEM", Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology and Innovation, Vol. 4, No. 2, pp. 24-30, 2015.
- [18] Najafi, A., Iskender, I., "An Improved Thermal Model for Distribution Transformer under Unbalanced Voltage Conditions", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 104, pp. 373-385, 2016.
- [19] Najafi, A., Iskender, I., "Dry type transformer winding thermal analysis using different neural network methods", Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Vol. 26, No. 4, pp. 905-913, 2011.
- [20] Azizian, D., Bigdeli, M., "A New Cast-Resin Transformer Thermal Model Based on Recurrent Neural Networks", Archives of Electrical Engineering, Accepted, 2016.
- [21] Azizian, D., Vakilian, M., Faiz, J., "New Multi-Winding Traction Transformer Equivalent Circuit for Short-Circuit Performance Analysis", International Transaction on Electrical Energy Systems, Vol. 24, pp. 186-202, 2014.
- [22] Azizian, D., "Nonlinear Behavior Analysis of Split-Winding Dry-Type Transformer Using a New Star Model and a Coupled Field-Circuit Approach", Archives of Electrical Engineering, Vol. 65, No. 4, pp. 773-787, 2016.

[۲۳] داود عزیزیان، "مدلسازی حرارتی ترانسفورماتورهای سه سیم پیچ خشک با ساختار دوطبقه"، بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی برق (PSC2013)، تهران، ایران، ۱۳۹۲.

[24] Azizian, D., "Windings Temperature Prediction in Split-Winding Traction Transformer", Turkish Journal of Electrical engineering & Computer Sciences, Vol. 24, No. 4, pp. 3011-3022, 2016.

[25] Azizian, D., "Leakage Inductance Calculations in Different Geometries of Traction Transformers", ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol. 12, No. 2, pp. 28-34, 2014.

[۲۶] حسنی توراچ زن، داود عزیزیان و مهدی بیگدلی، "مدلسازی حرارتی ترانسفورماتور کششی با کمک روش اجزاء محدود" همایش مدلی سازی ریاضی در مهندسی، ابهر، ایران، ۱۳۹۳.

[۲۷] مهرداد حجت، محمد حسین جاویدی و سعیدرضا گلدانی، "تخصیص تلفات انتقال در محیط ترکیبی قراردادهای دوجانبه- حوضچه توان با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال یازدهم، شماره اول، ۱۳۹۳.

مدل هایی ساده و کاربردی جهت مانیتورینگ حرارتی ترانسفورماتور است. بنابراین در ادامه مقاله، دو مدل حرارتی دینامیک مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی جهت مدل سازی رفتار حرارتی گذرا در ترانسفورماتور دوطبقه ارائه شدند. با کمک یک سری داده حرارتی که از نرم افزار مدل سازی حرارتی ریاضی استخراج شدند، پارامترهای دو مدل شبکه عصبی ارائه شده آموزش دیده و با بهره گیری از داده های حرارتی اضافی، نتایج این مدل ها ارزیابی و تأیید شدند.

همان طور که از نتایج مقاله حاضر برمی آید، مدل های مبتنی بر شبکه های عصبی از دقت مناسبی جهت تحلیل حرارتی گذرای ترانسفورماتور چند سیم پیچ دوطبقه برخوردارند. بنابراین مدل های ارائه شده می توانند به راحتی در پایش برخط رفتار حرارتی در ترانسفورماتور چند سیم پیچ دوطبقه مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

- [۱] داود عزیزیان، طراحی ترانسفورماتورهای یکسوساز مترو، گزارش پروژه، مؤسسه تحقیقات ترانسفورماتور ایران، ۱۳۸۶.
- [2] Pierce, L. W., "Thermal Consideration in Specifying Dry-Type Transformers", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, pp. 1090-1097, 1994.
- [3] Pierce, L. W., "An Investigation of the Temperature Distribution in Cast-Resin Transformer Windings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 920-926, 1992.
- [4] Pierce, L. W., "Predicting Hottest Spot Temperatures in Ventilated Dry Type Transformer Windings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 1160-1172, 1994.
- [5] Nabhani, F., Hodgson, S., Warnakulasuri, K., "Estimation of Temperature Rise in MVA Range Dry-Type Transformers and Practical Verification Based on Simulated Loading", World Congress on Engineering (WCE2015), Vol. 1, 2015, London, U.K.
- [6] Cho, H. G., Lee, U. Y., Kim, S. S., Park, Y. D., "The Temperature Distribution and Thermal Stress Analysis of Pole Cast Resin Transformer for Power Distribution", IEEE Conference International Symposium on Electrical Insulation, pp. 384-386, 2002.
- [7] E. Rahimpour, Azizian, D., "Analysis of Temperature Distribution in Cast-Resin Dry-Type Transformers", Electrical Engineering, Vol. 89, No. 4, pp. 301-309, 2007.
- [۸] داود عزیزیان، مدل سازی حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق- قدرت، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، آبان ماه ۱۳۸۴.
- [۹] داود عزیزیان و ابراهیم رحیم پور، "تأثیر عوامل مختلف بر روی توزیع دمادر سیم پیچی های ترانسفورماتور خشک رزینی"، بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق (PSC2006)، تهران، ۱۳۸۵.
- [10] Eslamian, M., Vahidi, B., Eslamian, A., "Thermal Analysis of Cast-Resin Dry-Type Transformers", Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 7, pp. 2479-2488, 2011.
- [11] Azizian, D., "Temperature Prediction in Cast-Resin Transformer Due to Non-Linear Loads", Journal of Electrical Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 23-249, 2014.
- [12] Rao, S. D., "Dynamic Loading of Substation Distribution Transformers: Detecting Unreliable Thermal Models and

[۲۸] رحمت اله هوشمند و مجید معظمی، "پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت تراکم گرهی در یک سیستم قدرت بزرگ تجدید ساختار یافته با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی با بهینه سازی آموزش ژنتیکی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال یازدهم، شماره اول، ۱۳۹۳.