

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

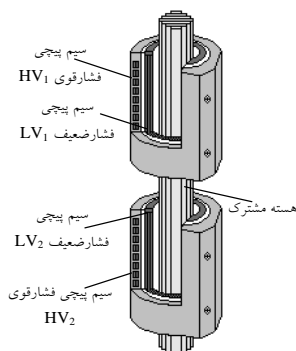
نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - ابهر - کیلومتر ۴ جاده ترانزیت ابهر - خرمدره - دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر - گروه مهندسی برق

سیم پیچ دوطبقه در حالت گذرا معرفی شده است. با کمک داده‌های تجربی و نتایج گرفته شده از سازنده، صحت نتایج ارزیابی و اعتبار مدل سازی تأیید می‌شود. 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 پیچی‌ها اندازه‌گیری و به عنوان داده‌های آزمایش حرارتی جمع‌آوری می‌شوند.

با توجه به قابلیت بسیار بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی سریع و برخط رفتار سیستم‌های پیچیده، در ادامه این مقاله، دو مدل دینامیک مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی، جهت مدل سازی حرارتی ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه ارائه شده است. با کمک داده‌های حرارتی جمع‌آوری شده، این مدل‌های حرارتی آموزش دیده و پارامترهای آن‌ها تخمین زده می‌شود. پس از آموزش مدل‌های حرارتی دینامیک، کارایی و اعتبار نتایج آن‌ها با کمک داده‌هایی اضافی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. چنانچه در انتهای مقاله نشان داده شده است، مدل‌های ارائه شده از دقت و کارایی بسیار بالایی جهت تخمین رفتار گذرای حرارتی در ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه برخوردارند. مدل‌های پیشنهادی و آموزش دیده به راحتی می‌توانند جهت ارزیابی و پیش‌بینی دمای سیم پیچ‌های ترانسفورماتور دوطبقه در شرایط مختلف بارگیری (به خصوص در مانیتورینگ حرارتی برخط و سریع) مورد استفاده متخصصان در سیستم‌های کششی و ذوب فلزات قرار گیرند.

۲- مدل سازی ریاضی ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه جهت محاسبه دمای سیم پیچی‌ها

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



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

۱-۲- معادلات حرارتی سیم پیچی‌ها

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

ترانسفورماتور با ساختار دوطبقه که اصطلاحاً به آن ترانسفورماتور با سیم پیچی‌های مجزا (split-winding) گفته می‌شود، امروزه به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم‌های کششی (مترو) و کارخانه‌های فولادسازی به‌طور گسترده‌ای از سیستم‌های یکسوساز استفاده می‌کنند. یکی از اجزای اصلی این سیستم‌های یکسوساز، ترانسفورماتور است. ترانسفورماتورهای استفاده شده در سیستم‌های یکسوساز دوازده پالسه می‌توانند ساختارهای متفاوتی داشته باشند. یکی از ساختارهای متداول این ترانسفورماتورها، ساختار دوطبقه است که در آن دو جفت سیم پیچی فشار ضعیف و فشار قوی روی هم و بر روی یک هسته مشترک ساخته می‌شوند. با وجود مزایای بسیار زیادی که ساختار مورد اشاره دارد، طراحی آن نیز پیچیدگی‌هایی دارد [۱]. از آن جمله می‌توان به توزیع حرارتی پیچیده و خطرناک در این نوع از ترانسفورماتورها اشاره کرد.

پیش‌تر 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] مطالعه‌ای را مبتنی بر نتایج تجربی برای بررسی رفتار حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی با سیم پیچی‌های هم‌محور انجام داده‌اند. مدل‌هایی نیز ریاضی جهت محاسبه دمای این‌گونه از ترانسفورماتورها در بارهای خطی و غیرخطی ارائه شده‌اند [۴-۱۱]. با توجه به اهمیت مطالعه رفتار حرارتی ترانسفورماتور در حالت گذرا، مدل‌هایی نیز جهت تحلیل رفتار گذرای حرارتی انواع مختلف ترانسفورماتور در مراجع [۱۲-۲۰] ارائه شده‌اند. مراجع [۱۳-۱۸] مدل‌هایی مبتنی بر مدارهای RC را جهت بررسی رفتار گذرای حرارتی در سیم پیچی‌های ترانسفورماتور خشک ارائه و مراجع [۱۳-۱۵] این مدل‌ها را جهت تخمین عمر و قابلیت اطمینان ترانسفورماتور خشک رزینی استفاده کرده‌اند. مراجع [۱۹ و ۲۰] نیز مدل جدیدی را مبتنی بر شبکه‌های 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 انجام پذیرفته است [۲۱-۲۵]. مرجع [۲۴] مطالعه جامعی از توزیع درجه حرارت سیم پیچی‌های 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 پیچی‌های آن پرداخته است. با وجود مطالعات گسترده در خصوص مدل سازی حرارتی ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه روغنی و خشک، هیچ‌گونه مطالعه‌ای 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 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:

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

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 (r) و محوری (z) 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 ختلاف 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.

$$\sum_{\substack{(i'j') \in \\ (ij \pm 1) \\ (i \pm 1j)}} \frac{T_{ij} - T_{i'j'}}{R_{ij-i'j'}} + h_{ij}(T_{ij} - T_{air}) + C_{ij} \frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = q_{ij} \quad (3)$$

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، رابطه (۳) را می‌توان با جایگذاری $\theta = T - T_{air}$ بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\sum_{\substack{(i'j') \in \\ (ij \pm 1), (i \pm 1j)}} \frac{\theta_{ij} - \theta_{i'j'}}{R_{ij-i'j'}} + h_{ij}\theta_{ij} + C_{ij} \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial t} = q_{ij} \quad (4)$$

از آنجایی که $\frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial t}$ 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.

$$\theta_{ij}(t+1) = \theta_{ij}(t) + C_{ij}^{-1} \Delta t \times \{q_{ij} - \sum_{i'j'} R_{ij-i'j'}^{-1} (\theta_{ij}(t) - \theta_{i'j'}(t)) - h_{ij}\theta_{ij}(t)\} \quad (5)$$

(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.

$$R_{ij-i'j'} = Ak/L_{ij-i'j'} \quad (7)$$

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.

$$C_{ij} = \rho c_p V \quad (8)$$

۲-۳- 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].

$$h = \varepsilon \sigma (T_s^3 + T_s T_{air}^3 + T_s^2 T_{air} + T_{air}^3) \quad (9)$$

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، به طوری 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 لایه مرزی 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:

۲-۴- 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:

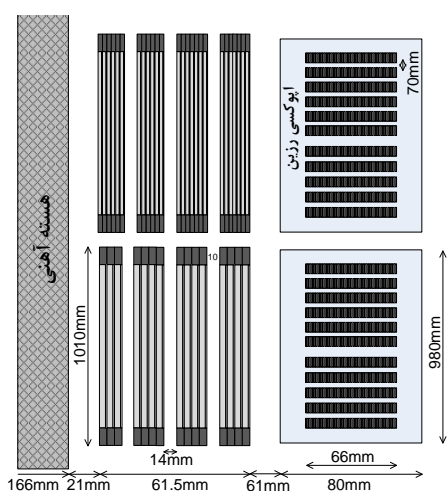
$$q_{ij} = (1 + K_{eddy})P_{dc} \quad (13)$$

در این رابطه P_{dc} تلفات اهمی ثابت و 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.

۲-۵- نتایج مدل‌سازی 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.

$$h = \sqrt[5]{\frac{4Pr^2 g \beta k^4 \bar{q}_{co} 1}{(36 + 45Pr)v^2 Z}} \quad (10)$$

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.

جابه‌جایی آزاد در مجاری هوای محوری: جابه‌جایی در اینجا تا حدودی متفاوت از جابه‌جایی 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 هم‌پوشانی لایه‌های مرزی رخ می‌دهد به نام ناحیه کاملاً توسعه یافته خوانده می‌شود. مشابه قبل جهت ساده‌سازی مدل‌سازی حرارتی، از روابط تجربی برای توصیف جابه‌جایی طبیعی در فواصل هوایی محوری استفاده شده است [۷]:

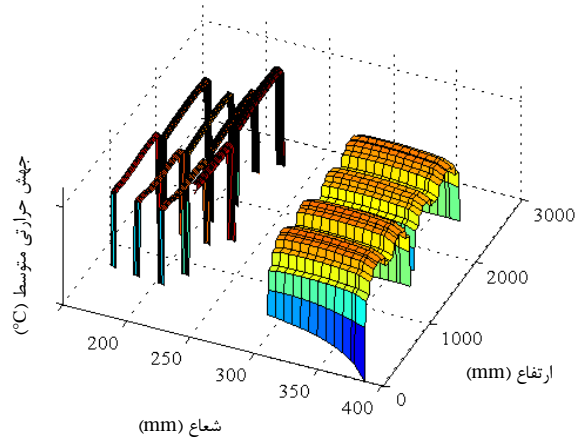
$$h = \frac{k}{b} \begin{cases} C_1 \sqrt[6]{(1+R)\varphi_Z^2} & \varphi_Z \leq 60^\circ \\ \frac{C_2}{\left[(1+R) \left(\frac{1}{\varphi_Z} \sqrt{\frac{24}{1+R} - \frac{9}{70}} \right) + \frac{1}{2} \right]} & \varphi_Z \geq 60^\circ \end{cases} \quad (11)$$

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

که R برای هر دیواره، نسبت شار حرارتی دیواره مقابل به دیواره مورد مطالعه، \bar{q}_{cd} شار حرارتی متوسط هر دیواره، b پهناى 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 جابه‌جایی 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 جابه‌جایی 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 مدل‌سازی 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 در خصوص نتایج مسئله مدل‌سازی و توزیع درجه حرارت حالت پایدار مرتبط با ترانسفورماتور چند سیم‌پیچ دوطبقه، خواننده می‌تواند به مرجع [۲۴] مراجعه نماید.



شکل (۳): توزیع جهش حرارتی در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور

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

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

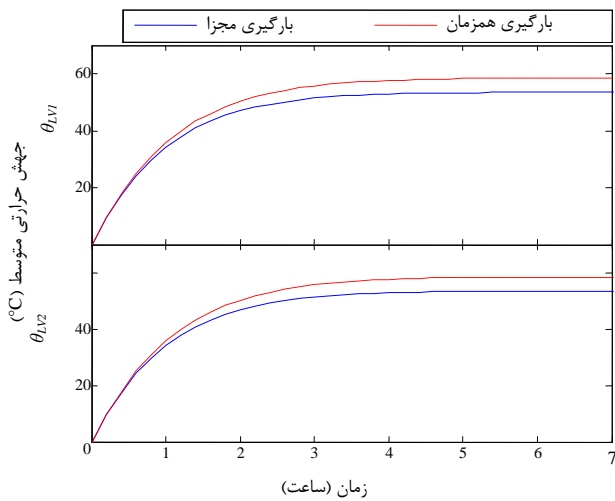
	جهش حرارتی متوسط سیم‌پیچی			
	LV ₁	HV ₁	LV ₂	HV ₂
کارخانه	۶۰	۴۵	۵۳	۴۵
روش تفاضلات محدود	۶۲	۴۷	۵۳	۴۵
روش اجزای محدود	۶۱	۴۵	۵۴	۴۶

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

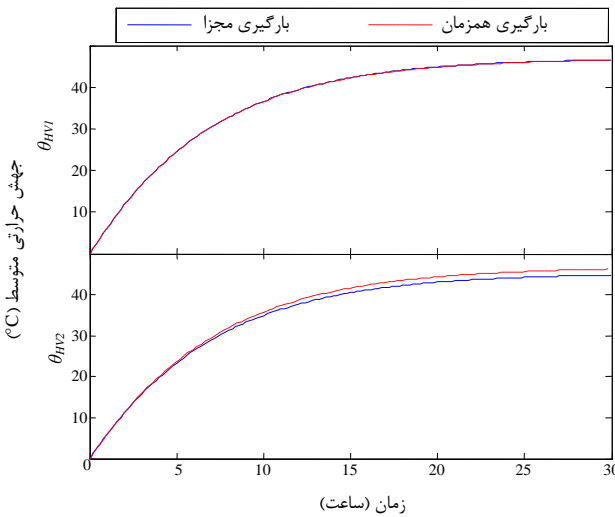
جدول (۲): جهش‌های حرارتی متوسط و نقطه داغ در سیم‌پیچی‌ها

بارگیری ترانسفورماتور	جهش حرارتی متوسط				جهش حرارتی نقطه داغ			
	LV ₁	HV ₁	LV ₂	HV ₂	LV ₁	HV ₁	LV ₂	HV ₂
بالا و پایین 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 سیم‌پیچی‌ها را در بارگیری هم‌زمان و مستقل دو ترانسفورماتور بالا و پایین نشان می‌دهد. در حالت بارگیری هم‌زمان دو ترانسفورماتور به صورت دوطبقه، دمای سیم‌پیچی‌های بالا بیشتر و دمای سیم‌پیچی‌های 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 سیم‌پیچی‌های بالایی (افزایش Z) سبب کاهش انتقال حرارت و افزایش دما در سیم‌پیچی‌ها (تا ۱۱ درصد) شده و شرایط خطرناکی را پدید می‌آورد.



(الف)



(ب)

شکل (۴): دمای سیم‌پیچی‌های (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 به‌هم پیوسته‌اند که از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی

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 غیرخطی 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 غیرخطی 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.

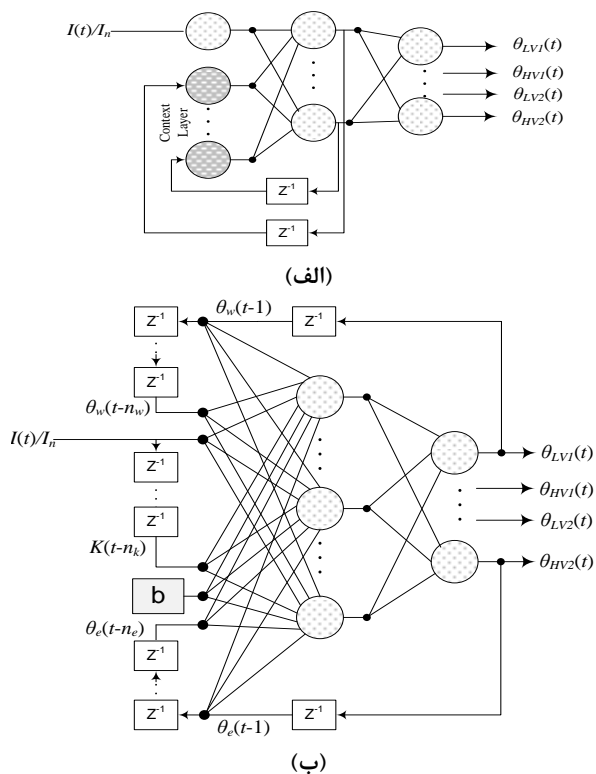
حالت دوم: اگر ارتباط بین سیم پیچی های فشار ضعیف و فشارقوی هم محور در نظر گرفته شود (این ارتباط می تواند از طریق مجرای هوای بین این سیم پیچی ها باشد) و از ارتباط مغناطیسی و حرارتی ترانسفورماتورهای بالا و پایین صرف نظر شود، دو مدل با ورودی ضریب جریان سیم پیچی (فشار ضعیف پایین یا بالا) و دو خروجی دما مطلوباند.

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 غیرخطی و وابسته به زمان است. پروسه یادگیری NARX بسیار مؤثر بوده و با سرعت بالایی همگرا می شود. در مدل سازی سیستم های با وابستگی های زمانی طولانی مدت، مدل NARX بهتر از سایر شبکه هاست. 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)

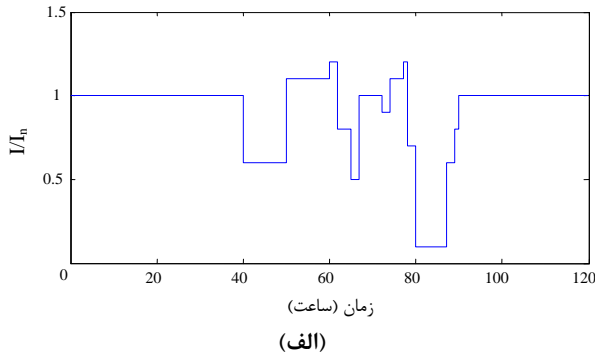
در این تحقیق، روش های مختلف آموزش بر روی دو عصبی ارائه شده آزمایش و تعداد لایه های پنهان، نوع توابع تبدیل و تعداد تکرارها

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 مقدر و به صرفه نمی‌باشد.

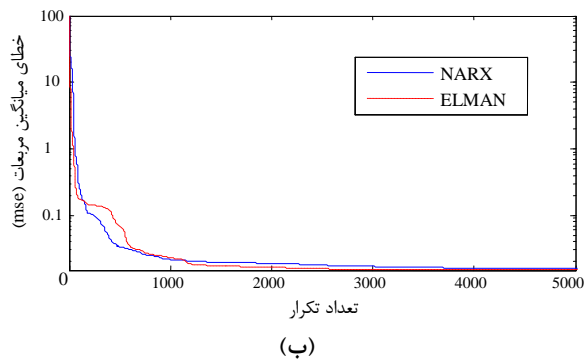
۴- تحلیل نتایج و ارزیابی مدل‌های حرارتی

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.

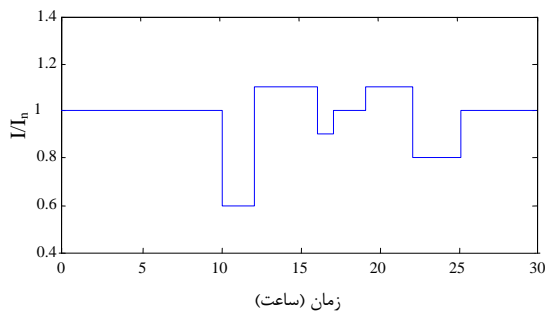


(الف)



(ب)

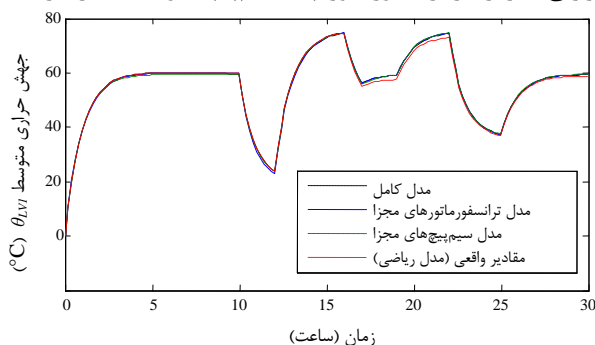
شکل (۶): (الف) آزمایش حرارتی برای آموزش مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی - (الف) بارگیری و (ب) پروسه آموزش



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 می‌تواند سبب بروز مشکلاتی در تخمین دمای سیم‌پیچی‌ها در بارگیری‌های نامتقارن و خطاها شود. بنابراین در صورت نیاز می‌توان تعداد ورودی‌های ضریب جریان را در مدل یکپارچه افزایش داده یا از مدل‌های ترانسفورماتور مجزا (حالت دوم) و سیم‌پیچی‌های مجزا (حالت اول) استفاده کرد. برای نمونه، شکل ۱۰ نتایج تخمین دمای سیم‌پیچی فشارضعیف پایین را که توسط مدل‌های مجزا و یکپارچه استخراج شده‌اند، مقایسه می‌کند. چنانچه مشخص است، هر سه حالت مدل‌سازی با دقت بسیار بالایی رفتار حرارتی گذرا را در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه مدل کرده‌اند.



شکل (۱۰): مقایسه تخمین دما در مدل‌های مختلف ELMAN

مدل‌سازی ریاضی از دقت بالایی برخوردار است و می‌تواند برای بررسی رفتار حرارتی گذرای ترانسفورماتور در شرایط مختلف بارگیری به کار رود. با این حال با توجه به پیچیدگی و زمان‌بر بودن آن، گزینه مناسبی در کاربردهای پایش (مانیتورینگ) درجه حرارت سیم‌پیچی‌ها در حالت برخط نیست. در چنین مواردی، مدل‌های دینامیک ارائه شده بر مبنای شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند راهگشا بوده و در عین سادگی با دقت بالایی رفتار حرارتی گذرای سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور دوطبقه را تخمین بزنند.

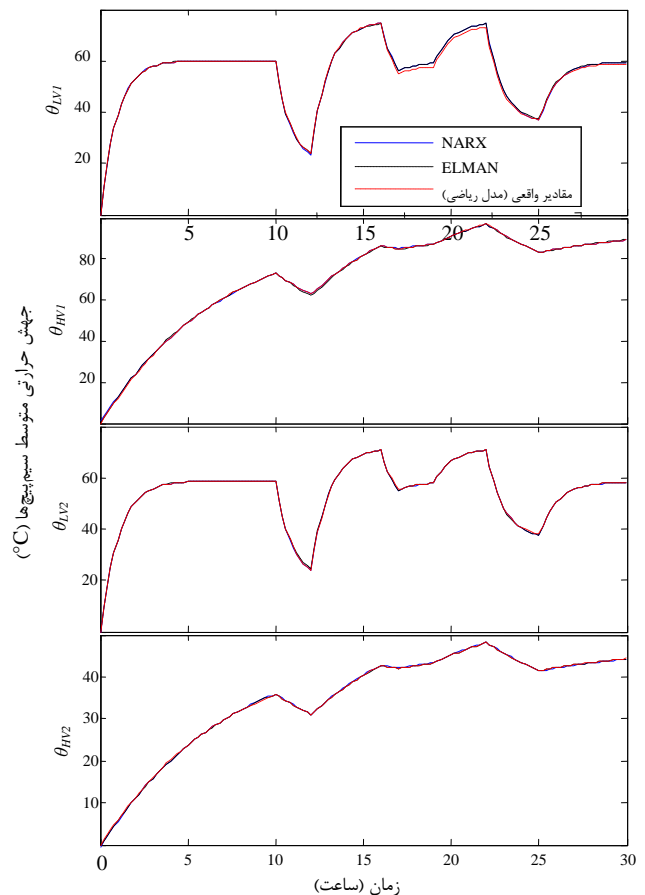
مجدداً از شکل ۸ دیده می‌شود که حساسیت دمای سیم‌پیچ‌های فشارقوی (بشقابی با رزین قالب ریزی شده) به تغییرات بار بسیار کمتر بوده و بارگیری‌های کوتاه مدت و سریع، تأثیر بسیار کمی روی جهش حرارتی این سیم‌پیچ‌ها می‌گذارند.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، در ابتدا مدل‌سازی ریاضی ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه بر مبنای روش تفاضلات محدود جهت مطالعه رفتار گذرای حرارتی سیم‌پیچی‌ها ارائه شد. بعد از تأیید اعتبار مدل ریاضی، با کمک نرم‌افزار مدل‌سازی حرارتی نوشته شده، رفتار حرارتی سیم‌پیچی‌ها تحت شرایط مختلف بارگیری مورد مطالعه قرار گرفت.

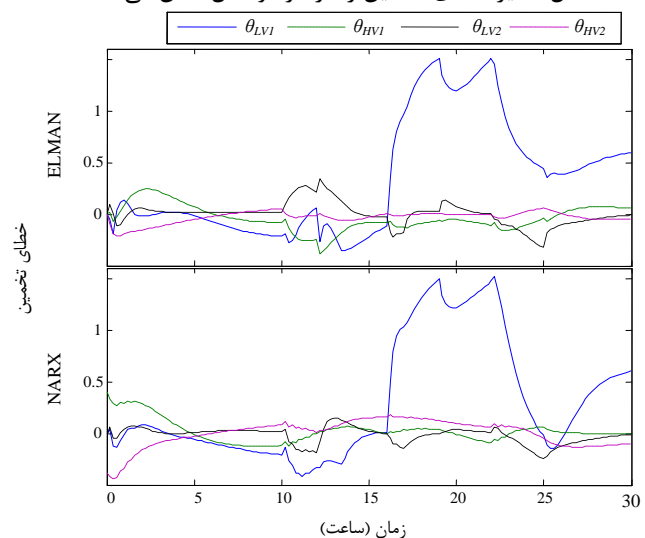
چنانچه نشان داد شد، مدل ریاضی و نرم‌افزار مربوطه، از دقت بالایی برخوردارند. با وجود دقت بالای مدل ریاضی، در عمل نیاز به

هر دو مدل با خطای بسیار ناچیزی دما را تخمین می‌زنند و تنها در سیم‌پیچی فشارضعیف پایین و در زمان‌هایی خاص این خطا به حدود ۳٪ می‌رسد. علاوه بر دقت بالای تخمین دما، این مدل‌ها از پیچیدگی کمی در مدل‌سازی رفتار حرارتی گذرای ترانسفورماتور برخوردارند.



شکل (۸): تخمین جهش حرارتی سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه

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



شکل (۹): خطای تخمین دمای سیم‌پیچی‌ها در مدل‌های 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 مدلسازی 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 شبکه‌های عصبی مصنوعی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال یازدهم، شماره اول، ۱۳۹۳.

مدل‌هایی ساده و کاربردی جهت مانیتورینگ حرارتی ترانسفورماتور است. بنابراین در ادامه مقاله، دو مدل حرارتی دینامیک مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت مدلسازی رفتار حرارتی گذرا در ترانسفورماتور دوطبقه ارائه شدند. با کمک یک سری داده حرارتی که از نرم‌افزار مدلسازی حرارتی ریاضی استخراج شدند، پارامترهای دو مدل شبکه عصبی ارائه شده آموزش دیده و با بهره گیری از داده‌های حرارتی اضافی، نتایج این مدل‌ها ارزیابی و تأیید شدند.

همان‌طور که از نتایج مقاله حاضر برمی‌آید، مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی از دقت مناسبی جهت تحلیل حرارتی گذرای ترانسفورماتور چند سیم‌پیچ دوطبقه برخوردارند. بنابراین مدل‌های ارائه شده می‌توانند به راحتی در پایش برخط رفتار حرارتی در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچ 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.Rahimpor, 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، مدلسازی حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق- قدرت، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، آبان ماه ۱۳۸۴.
- [۹] داود عزیزیان و ابراهیم رحیم‌پور، "تأثیر عوامل مختلف بر روی توزیع دمادر سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور خشک رزینی"، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی 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 بهینه‌سازی آموزش ژنتیکی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال یازدهم، شماره اول، ۱۳۹۳.