

## مدل سازی نقاط داغ ترانسفورماتور با استفاده از روش های تحلیلی یا عددی

پویان دنیاران\*<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی اراک donyaranff@yahoo.com

### چکیده

ترانسفورماتورهای قدرت نقش حیاتی در انتقال و توزیع برق شهر ایفا می کنند و بزرگترین سرمایه گذاری در مقوله انتقال نیرو محسوب می شوند. قطعی ترانسفورماتورهای قدرت بسیار نامطلوب بوده و باعث زیان قابل توجهی به اقتصاد شبکه های الکتریکی می شود در این پژوهش از مدل سازی تحلیلی ساده در جولیا و مدل سازی عددی الکترومغناطیسی و ترمودینامیک در کامسول استفاده می شود. هدف اصلی این مقاله تجزیه و تحلیل اثر حرارتی روی ترانسفورماتورهایی است که در حالت تقویت کار می کنند

**واژگان کلیدی:** نقاط داغ، ترانسفورماتور، مدلسازی تحلیلی یا عددی

## مقدمه

با توجه به نفوذ روزافزون منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه های برق و تغییرات زیاد توان، پایداری سیستم های قدرت دچار مشکل شده است. هیدروژنراتورها برای حفظ تعادل سیستم در کوتاه مدت در حالت بوستینگ عمل می کنند تا توان انفعالی بیشتری نسبت به آستانه تولید کنند. این عملکرد باعث تنش حرارتی در سیستم های ترانسفورماتور و تحریک (ارتعاش) می شود. ترانسفورماتورهای قدرت نقش حیاتی در انتقال و توزیع برق شهر ایفا می کنند و بزرگترین سرمایه گذاری در مقوله انتقال نیرو محسوب می شوند. قطعی ترانسفورماتورهای قدرت بسیار نامطلوب بوده و باعث زیان قابل توجهی به اقتصاد شبکه های الکتریکی می شود [۱]. هنگام تعیین درجه بندی ترانسفورماتور، دمای نقاط داغ سیم پیچ ها یکی از پارامترهای ارزیابی در تخصیص ظرفیت حرارتی و اضافه بار است. در این پژوهش از مدل سازی تحلیلی ساده در جولیا و مدل سازی عددی الکترومغناطیسی و ترمودینامیک در کامسول استفاده می شود. چگالی شار مغناطیسی در هسته، چگالی جریان، چگالی تلفات گرمایی و دما بررسی شده است همچنین اثرات تغییر در دمای محیط و شرایط خنک کننده نیز مورد بحث قرار گرفته است.

## پیشینه تحقیق

### تلفات حرارتی

تبدیل انرژی به شکل گرمایی در ترانسفورماتورهای اهمیت زیادی دارد تلفات هسته و سیم پیچ باعث تلفات حرارتی در داخل ترانسفورماتور می شود. تلفات هسته ناشی تلفات هیستریزیس و جریان های گردابی است و تلفات سیم پیچ به دلیل مقاومت سیم پیچ ها است. این تلفات باعث کاهش کارایی و عمر دستگاه می شود. از آنجا که در تحقیقات گذشته از مدل های زیادی برای برآورد این تلفات استفاده شده است برخی از جدیدترین تحقیقات تنش حرارتی ترانسفورماتور مورد بحث قرار گرفته است. نخستین بار استوارت و ویتمن در سال ۱۹۴۴ دمای نقطه داغ را اندازه گیری کردند آنها یک سری آزمایشات حرارتی را بر روی انواع سیم پیچ های ترانسفورماتور خشک انجام دادند و دمای نقطه داغ آنها را محاسبه کردند [۲].

یانگ و همکارانش، ۲۰۲۳، بیان کردند از آنجا که اندازه گیری مستقیم دمای نقطه داغ در ترانسفورماتورهای کششی دشوار است از روش شبکه عصبی ترکیبی و مدل فیزیکی استفاده کردند این روش دقت بالاتری نسبت به شبکه های عصبی منفرد داشته است. [۳] تائو و همکارانش، ۲۰۲۲، برای پیش بینی دمای نقطه داغ ترانسفورماتور از روش تجزیه حالت دینامیکی (DMD) استفاده کرده اند این روش می تواند توزیع میدان دمایی HST و سیم پیچ را در چند ثانیه پیش بینی کند و معنای فیزیکی واضحی دارد. [۴] رومل و دی مابو، ۲۰۲۱، از روشی جایگزین برای محاسبه دمای نقطه داغ و طول عمر ترانسفورماتورهای قدرت استفاده کردند یعنی با توجه به اطلاعات محدود، به بررسی اطلاعات رتبه بندی ترانسفورماتور و اندازه گیری های جریان و ولتاژ  $rms$  (زوایای فاز) پرداختند. [۵] ژانگ و همکارانش، ۲۰۲۱، برای پیش بینی دمای نقطه داغ ترانسفورماتور کشی دو سیم پیچ با در نظر گرفتن ویژگی های بار از روش شبیه سازی المان محدود استفاده کردند تجزیه و تحلیل منحنی بار نشان داده است که ترکیب بار ثابت و پله ای می تواند به خوبی بار کششی را شبیه سازی کند. نتایج نشان می دهد که این روش می تواند HST ترانسفورماتور کششی را در شرایط کاری مختلف پیش بینی کند و مرجعی برای توزیع بار ترانسفورماتور کششی ارائه کند. [۶] هو و همکارانش، ۲۰۲۰، برای طول عمر ترانسفورماتورهای نوع خشک و شرایط عملکرد آنها، توزیع میدان دما را بررسی کرده است بدین منظور از روش المان محدود سه بعدی استفاده کرده است. [۷]

آلوارز و همکارانش، ۲۰۱۹، برای پیش نقطه داغ از یک الگوریتم آنلاین برای تخمین و پیش بینی رده ی ترانسفورماتور ها استفاده کرده است تا بتواند قابلیت اضافه بار را در زمان های کوتاه و طولانی ارزیابی کند ویژگی اصلی این پیشنهاد این است که شرایط خنک کاری محیطی با برازش پارامترهای یک مدار حرارتی معادل ساده انجام میشود و از روش فیلتر کالمن پیشرفته استفاده میشود برای اعتبارسنجی روش، از اطلاعات سیستم های نظارت بر رتبه ترانسفورماتور معمولی استفاده می شود بنابراین، عملکرد و

اثر بخشی الگوریتم با استفاده از داده های میدانی تأیید می شود. [۸] میتی و همکارانش، ۲۰۱۸، برای تشخیص نقطه داغ در ترانسفورماتور ولتاژ بالا از سنسور حرارتی استفاده کرده اند نقطه پروب کامسول به عنوان یک سنسور حرارتی برای تشخیص دمای نقطه داغ است که در هسته ترانسفورماتور رخ داده است. تشخیص نقاط داغ می تواند تجهیزات را از خرابی کامل محافظت کند. [۹] بی جی و همکارانش، ۲۰۱۷، از شبکه عصبی و الگوریتم IEC60076 مقایسه ای انجام دادند. بر اساس تجزیه و تحلیل فرآیندهای انتقال حرارت و ویژگی های حرارتی داخل ترانسفورماتورها، تأثیر عواملی مانند نور خورشید، سرعت باد و غیره بر روی ترانسفورماتورهای غوطه ور در روغن در نظر گرفته می شود. نتایج نشان می دهد مقدار محاسبه شده با الگوریتم شبکه عصبی بهتر از مقدار محاسبه شده با الگوریتم پیشنهادی IEC60076 است. [۱۰] لی و همکارانش، ۲۰۱۵، برای محاسبه و تحلیل افزایش دمای نقطه داغ قطعات ساختاری ترانسفورماتور خودکار تک فاز از روش جدیدی استفاده کردند ضریب انتقال حرارت همرفتی را با دینامیک سیالات محاسباتی برآورد کردند و از روش المان محدود استفاده کردند. در نهایت نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است. [۱۱]

کاستیج و همکاران، ۲۰۱۴، برای تعیین بخش تلفات روی سیم پیچ ها از روش اجزای محدود استفاده کردند و برای تعیین مقدار ضریب نقطه داغ از مدل شبکه حرارتی هیدرولیک بهره گرفته شده است این روش برای تعیین توان ترانسفورماتور نیز کاربرد دارد. [۱۲]

### روش پژوهش

ابتدا برای مدل سازی تحلیلی مقایسه حرارتی - الکتریکی انجام میشود غیرخطی بودن رفتار حرارتی با تعریف مقاومت حرارتی غیرخطی مشخص می شود در دمای بالای از مدل حرارتی ساده استفاده می شود.

### پارامترهای ترانسفورماتور

پارامترهای ترانسفورماتور مدل تحلیلی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای ترانسفورماتور مدل تحلیلی

نام پارامتر	مقدار
توان مجاز	۱۱۸ (MVA)
فرکانس	۵۰ (هرتز)
فاز	۳
ولتاژ اولیه	۱۵ (کیلو ولت)
ولتاژ ثانویه	۳۰۸ (کیلو ولت)
جریان اولیه	۴۵۵۰ (A)
جریان ثانویه	۲۲۲ (A)
جرم روغن	۲۵۰۰۰ (کیلوگرم)
جرم هسته، سیم پیچ و دریچه	۹۰۰۰۰ (کیلوگرم)
جرم جعبه و خنک کننده	۱۳۰۰۰ (کیلوگرم)
روش خنک کننده	OFWF
تلفات اتصال کوتاه	۳۶۵ (کیلو وات)

### مدل تحلیلی حرارتی

در این بخش، داده های حرارتی ترانسفورماتور واقعی با ثابت زمانی حرارتی تخمین زده می شود همچنین از جولیا و روش اصلاح شده IEEE برای پیش بینی رفتار حرارتی ترانسفورماتور استفاده می شود.

### مقایسه الکتریکی - حرارتی

مقایسه پایه حرارتی- الکتریکی با فرمول زیر بیان میشود. [۱۳]:

$$q \times dt = C_{th} \times dT + \frac{T - T_{amb}}{R_{th}} \times dt$$

که در آن،  $q$  = تولید گرما،  $C_{th}$  = ظرفیت حرارتی،  $T$  = دما،  $T_{amb}$  = دمای محیط،  $R_{th}$  = مقاومت حرارتی است. از قانون Kirchhoff برای جریان ها استفاده میشود. که فرمول آن به شرح زیر است.

$$i = C + R$$

با استفاده از قانون اهم، معادله بالا به شکل زیر تشریح می شود.

$$i = C \times \frac{du}{dt} + \frac{u}{R}$$

با استفاده از معادله حرارتی پایه (۲) و معادله الکتریکی (۳) یک قیاس حرارتی- الکتریکی به دست می آید که در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- قیاس حرارتی - الکتریکی [۱۳].

الکتریکی	حرارتی
جریان	گرمای تولید شده
ولتاژ	دما
مقاومت	مقاومت حرارتی
ظرفیت	ظرفیت حرارتی

معادله دیفرانسیل مدل حرارتی بالای روغن به صورت زیر است:

$$C_{th-oil} \times \frac{dT_{oil}}{dt} = q_{tot} - \frac{T_{oil} - T_{amb}}{R_{th-oil}}$$

### ثابت زمانی

ثابت زمانی حرارتی مانند ثابت زمانی الکتریکی با استفاده از قیاس حرارتی- الکتریکی تعریف می شود. به طور کلی، ۶۳ درصد تغییر دما در یک زمان ثابت بدون توجه به دمای اولیه و نهایی رخ می دهد [۱۳].

$$\tau = R \cdot C$$

<sup>1</sup> top oil thermal

$$\tau_{th} = R_{th} \cdot C_{th}$$

که در آن،  $\tau_{th}$  = ثابت زمان حرارتی بر حسب دقیقه،  $R_{th}$  = مقاومت حرارتی بر حسب K/W،  $C_{th}$  = ظرفیت حرارتی W·s/K است.

در نهایت از فرمول زیر برای مدل حرارتی بالای روغن استفاده میشود.

$$\frac{dT_{oil}}{dt} = \frac{1}{\tau_{th-oil}} \cdot (q_{tot} \times R_{th-oil} - (T_{oil} - T_{amb}))$$

تلفات توان فعال ترانسفورماتور در pu، تلفات Pt با استفاده از پلاک نام ترانسفورماتور به شکل زیر محاسبه می شود.

$$E_r = 0.31\%$$

Er درصد تلفات اتصال کوتاه ترانسفورماتور در بار کامل را نشان می دهد.

$$P_k = 0.31\% \times 118MVA = 365kW$$

Pk نشان دهنده تلفات توان فعال ترانسفورماتور به صورت گرمایش در بار کامل و Pk-pu نشان دهنده تلفات ترانسفورماتور در بار کامل است.

$$P_{k-pu} = 0.0031pu$$

برای پیش بینی دمای هات اسپات از روش ODified IEEE استفاده شده است شبیه سازی در محیط Matlab انجام شده است و از روش Runge-Kutta برای حل معادلات استفاده شده است. سه حالت مختلف در نتایج شبیه سازی نشان داده شده است:

۱. کمتر از بار قتی که ضریب بارگذاری  $K = 0.85$ .

۲. بار مجاز زمانی که ضریب بارگذاری  $K = 1$ .

۳. اضافه بار زمانی که ضریب بارگذاری  $K = 1.2$ .

"تابع ضرر" قبلا تعریف شده است زیرا "عملکرد سلسله" خطا را اندازه گیری می کند و برای اندازه گیری میزان خطا به این تابع نیاز دارد. "مدل" مدل شبکه عصبی است که باید آموزش داده شود. "داده" داده های آموزشی است که بر اساس تعداد "دوران" ارائه شده است. پس از هر بار تکرار، برای به حداقل رساندن خطا، وزنی در نظر گرفته می شود. وزن اختصاص داده شده توسط "بهینه ساز" تعریف می شود. در این پژوهش، الگوریتم بهینه سازی "آداماکس" است که پارامترهای یادگیری ماشین را با تخصیص وزن آنها در طول تماس flux.train به روز می کند. [۱۴].

**روش اصلاح شده IEEE برای هات اسپات**

افزایش بارگیری منجر به افزایش دمای بالای روغن می شود. روش اصلاح شده IEEE شامل تغییرات دمای محیط روش روش اصلی حرارت بالای روغن IEEE است. افزایش نهایی دمای بالای روغن نسبت به دمای محیط توسط رابطه زیر به دست می آید [۱۵]:

$$\Delta T_{oil,u} = \tau_0 \frac{dT_{oil}}{dt} - T_{amb} + T_{oil}$$

$\Delta T_{oil,u}$  = افزایش نهایی دمای بالای روغن نسبت به محیط در درجه سانتیگراد،

$\tau_0$  = ثابت زمانی دمای بالای روغن بر حسب ساعت،

$T_{oil}$  = دمای بالای روغن پویا بر حسب درجه سانتیگراد،

$T_{amb}$  = دمای محیط بر حسب درجه سانتیگراد.

$$\Delta T_{oil,u} = \Delta T_{oil,R} \left( \frac{K^2 R + 1}{R + 1} \right)^n$$

$\Delta T_{oil,R}$  = افزایش درجه حرارت بالای روغن نسبت به محیط در درجه سانتیگراد،

$K$  = جریان بار در واحد،

$R$  = نسبت بار به تلفات بدون بار،

$n$  = نمایی که غیر خطی بودن را تعریف می کند.

سپس دمای بالای روغن ورودی برای تخمین دمای هات اسپات به شکل زیر محاسبه میشود. [۱۵]:

$$\Delta T_{hst,u} = \tau_{wnd,R} \frac{dT_{hst}}{dt} + T_{hst} - T_{oil}$$

$$\Delta T_{hst,u} = \Delta T_{hst,R} (K)^{2m}$$

$\Delta T_{hst,u}$  = افزایش دمای نقطه داغ نهایی روغن نسبت به بالای روغن بر حسب درجه سانتیگراد،

$\Delta T_{hst,R}$  = افزایش درجه حرارت روغن نقطه داغ نسبت به روغن بالا بر حسب درجه سانتیگراد،

$T_{hst}$  = دمای نقطه پویا بر حسب درجه سانتیگراد،

$\tau_{wnd,R}$  = ثابت زمان سیم پیچ در دقیقه،

$m$  = نمایی برای غیر خطی بودن

در این پژوهش معادله استفاده شده در میدان های مغناطیسی قانون آمپر است [۱۶] سپس چگالی شار مغناطیسی استفاده میشود.

سپس چگالی جریان حالت استاتیکی محاسبه میشود.

### مدارهای الکتریکی

سیم پیچ های ترانسفورماتور با استفاده از سیم پیچ در رابط "میدان مغناطیسی" مدل سازی شدند اما اتصالات آنها با یکدیگر و

تحریک سیم پیچ از طریق یک منبع ولتاژ خارجی و با استفاده از رابط "مدار الکتریکی" انجام میشود زیر کنترل بیشتری برای

اتصالات سه فاز و همچنین چندین منبع برق ارائه می دهد.

### جدول ۳- پارامترهای ورودی مدار الکتریکی

پارامتر	مقدار	گره های اتصال	واحد
V <sub>۱</sub>	$6600\sqrt{\frac{2}{3}} @ -120deg$	۰-۱۱	V
V <sub>۲</sub>	$6600\sqrt{\frac{2}{3}} @ 0deg$	۰-۲۱	V
V <sub>۳</sub>	$6600\sqrt{\frac{2}{3}} @ 120deg$	۰-۳۱	V

-	0-11, 0-12, 0-13 0-21, 0-22, 0-23 0-31, 0-32, 0-33	.	Gnd
mΩ	11-12, 21-22, 31-32	۱	R <sub>e</sub>
Ω	0-13, 0-23, 0-33	۱۰۵,۸	R <sub>Load</sub>

## انتقال حرارت

معادله عمومی انتقال حرارت در Comsol به صورت [۱۷] تعریف شده است:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot \mathbf{q} = Q$$

سپس؛

از جریان آرام برای مدل سازی جریان سیالات تک فاز استفاده می شود. جریان آرام بر اساس معادله Navier Stokes ارائه شده به صورت زیر است [۲]:

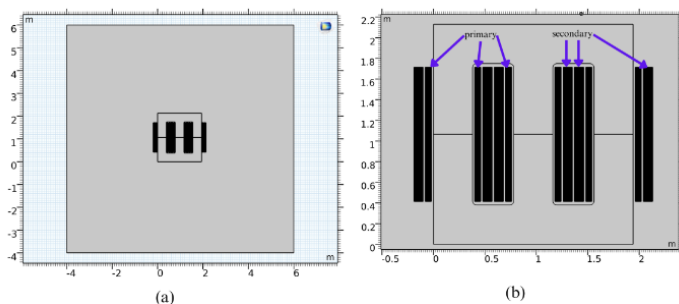
$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} + \mathbf{F} + \rho\mathbf{g}$$

جایی که:

$\mathbf{I}$  = ماتریس هویت،

$\mathbf{F}$  = اعمال اجباری خارجی بر روی سیال، بر حسب  $\text{N/m}^2$ ،

$\mathbf{g}$  = شتاب گرانشی، بر حسب  $\text{m/s}^2$ .



شکل ۱- شماتیک ۲ بعدی ترانسفورماتور سه فاز (a) روی هسته و سیم پیچ (b)

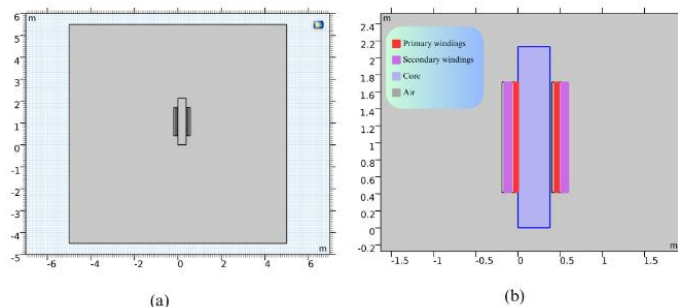
مواد به کار برده شده در این پژوهش آهن، هوا و آلومینیوم است.

## جدول ۴- تغییرات خواص مواد

واحد	مقدار جدید	پیش فرض	سمبل	ویژگی	مواد
S/m	۱	.	$\sigma_e$	رسانایی الکتریکی	هوا
S/m	$1/\rho_e$	$3.774 \times 10^7$	$\sigma_e$	رسانایی الکتریکی	آلومینیوم
S/m	$\sigma_{Fe}$	$1.12 \times 10^7$	$\sigma_e$	رسانایی الکتریکی	آهن
--	$j 25 + 1100$	۴۰۰۰	$\mu_r$	نفوذپذیری نسبی	آهن

ترانسفورماتور تک فاز (مدل ۲)

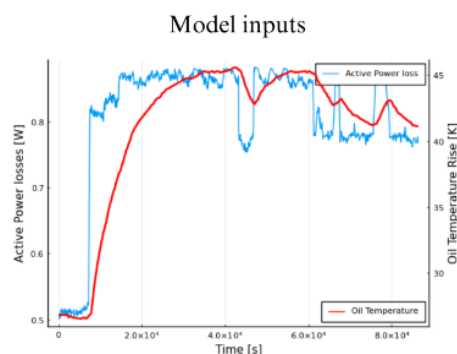
مدل ترانسفورماتور دو بعدی تک فاز ساده از ترانسفورماتور سه فازی است که قبلاً (مدل ۱) در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل از مدل سه فازی استخراج شده است.



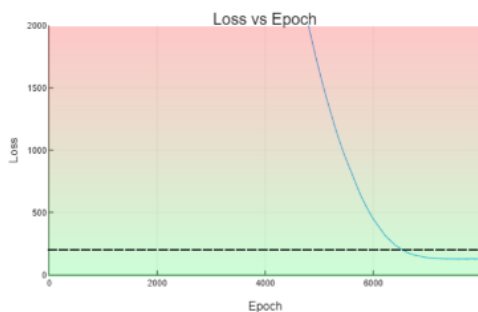
شکل ۲- هندسه کلی تک فاز (مدل ۲)

### بحث و بررسی

در این بخش مدل تحلیلی بر اساس داده های «اسکاگرک انرژی» انجام شده است در مدل سازی عددی، ابتدا نتایج رفتار الکترومغناطیسی ارائه می شود و بعداً مدل سازی حرارتی برای هر دو مدل ارائه می شود. فازهای ۱، ۲، ۳ به صورت فازهای a، b و c برای اولیه و A، B، و C برای ثانویه در کامسول انجام میشود.



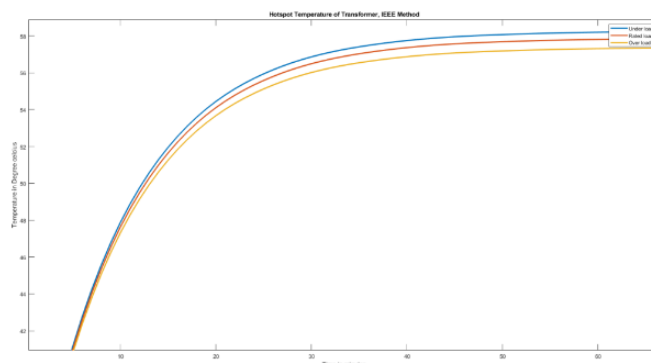
شکل ۳- داده های ورودی مدل تحلیلی



شکل ۴- کاهش خطا با استفاده از بسته flux در جولیا

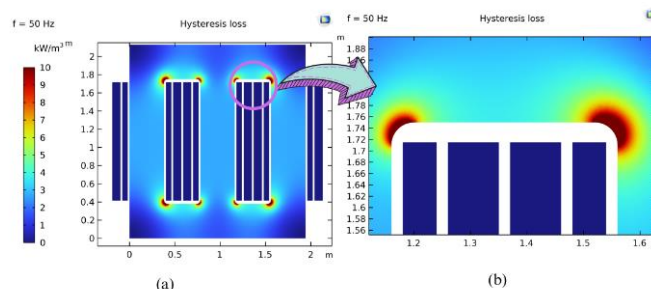


تخمین دما با استفاده از روش IEEE برای روغن انجام می شود که این دما در ورودی تخمین دمای هات اسپات تبدیل می شود و در نهایت تغییرات دمای هات اسپات زیر بار، بار مجاز و اضافه بار نشان داده میشود.



شکل ۵- تخمین دمای هات اسپات در زیر بار، بار مجاز و اضافه بار با استفاده از روش اصلاح شده IEEE

ولتاژ اولیه ورودی مدار ترانسفورماتور دارای اختلاف فاز  $120^\circ$  است جریان در سیم پیچ های اولیه بیشتر از سیم پیچ ثانویه است هر دو نمودار ولتاژ و جریان نشان می دهد که ترانسفورماتور ثابت کار می کند. اگر مقاومت بار بیش از حد کاهش یابد (افزایش بار بیش از ظرفیت) آنگاه ترانسفورماتور از تعادل خارج می شود. این مدل بسیار پیچیده است زیرا بیش از ۱۲۰۰ دامنه دارد، هر چرخش سیم پیچ، هندسه خاص خود را دارد. چگالی جریان در کل ترانسفورماتور در مقایسه با گوشه های سیم پیچ ها، لبه های پایین و لبه های بالایی سیم پیچ ها بسیار کم است، لبه های مرزی به دلیل هندسه بسیار دقیق سیم پیچ ها برای نمودارهای بصری بهتر مدل سازی نشده اند. لبه های بیرونی دارای جریان گردابی تقریباً صفر یا بسیار کمتری هستند، اما چگالی جریان در قسمت میانی به دلیل میدان مغناطیسی قوی تر در آن ناحیه بسته که توسط سیم پیچ هایی در دو طرف احاطه شده است، بالاترین میزان است. بار دار است و جریان های گردابی بیشتری را القا می کنند. تلفات هیستریزس در هسته کلی در شکل ۶ (الف) و بزرگنمایی در لبه های هسته در (ب) نشان داده شده است. تلفات هیستریزس در گوشه ها به اوج می رسد، (با حداکثر مقدار ۲۱,۱ کیلووات بر متر مکعب)، هسته دارای شعاع گوشه ای (۴۰ میلی متر) است فقط دامنه اصلی میدان های مغناطیسی شامل مدل سازی تلفات شده است. قسمت نفوذپذیری نسبی (j 25) است و باعث تلفات هیستریزس در هسته می شود چگالی شار در هسته که در آن رسانایی الکتریکی ناهمسانگرد است، به این معنی که هسته در هر دو محور X و Y هدایت می شود. اما در محور Z چنین نیست. اگر از رسانایی الکتریکی همسانگرد (پیش فرض) استفاده شود، به دلیل رفتار غیر لایه لایه هسته، هیچ شار مغناطیسی کلی در هسته نخواهد داشت. بیشترین چگالی شار در هسته  $T = 2,86$  و چگالی شار متوسط  $T = 1,1$  است.

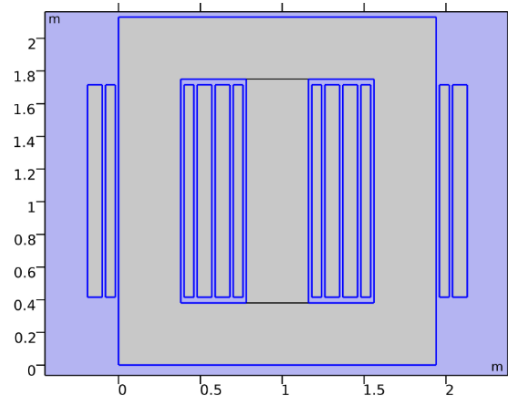


شکل ۶- تلفات هیستریزس در هسته (مدل-۱) (الف) و بزرگنمایی در گوشه هسته (ب)

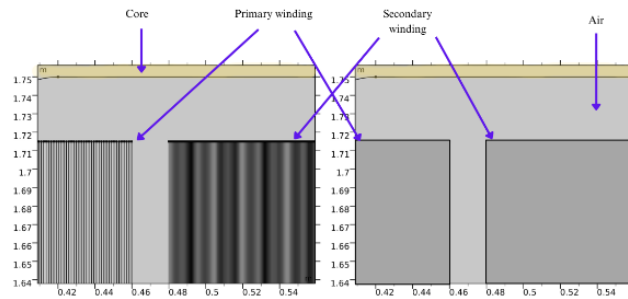
هندسه حوزه سیم پیچ در آنالیز الکترومغناطیسی قبلی بسیار دقیق بود و از ۱۲۰۰ حوزه تشکیل شده است که به مش بسیار دقیق و توان محاسباتی بالا نیاز دارد. تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی ارائه شده در بخش قبل بر اساس تجزیه و تحلیل وابسته به زمان

و تحلیل دامنه فرکانس است که رفتار گذرا دارند، اما برای تجزیه و تحلیل حرارتی، سرعت افزایش دما در مقایسه با تغییرات ولتاژ، فرکانس، جریان و غیره بسیار کند است.

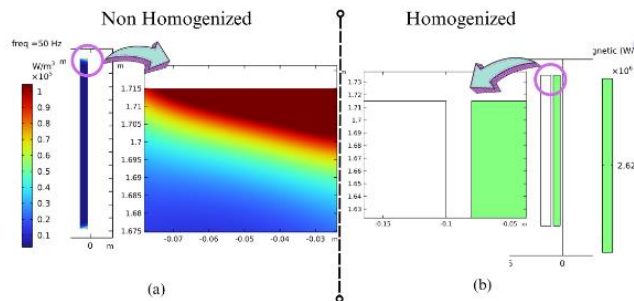
مدل ۱ دارای سیم پیچ های همگن است، ابتدا مطالعه حوزه فراوانی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و تلفات الکترومغناطیسی در حلال ذخیره می شود و سپس در ورودی دومین ثابت انتقال حرارت تبدیل می شود دمای محیط ۲۰ درجه سانتیگراد بود و جریان آرام برای تجزیه و تحلیل دامنه سیال استفاده شد، اما فن ها خاموش هستند (دبی هوای طبیعی بسیار کم است ۰.۰۴ متر بر ثانیه) اما شدت (جاذبه) در مدل گنجانده شده است. هوای گرم سبک تر به سمت بالا حرکت می کند و تابش سطح به سطح در مدل گنجانده شده است. حداکثر دما حدود ۱۱۰ درجه سانتیگراد در سیم پیچ های اولیه است این مدل در مقابل دمای سیم پیچ ها مقاوم است. از آنجایی که از کویل های همگن استفاده می شود، نتایج تنش حرارتی تقریبی هستند اما ما نمی توان نقاط داغ یا مکان را در هندسه مشاهده کرد.



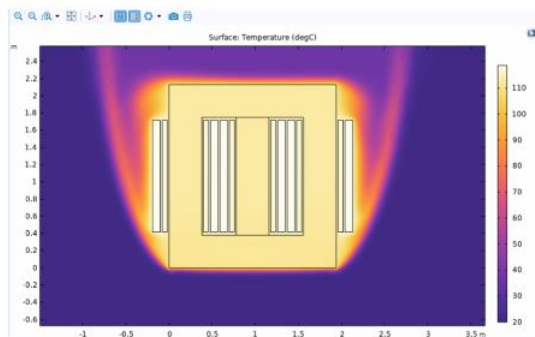
شکل ۷- ترانسفورماتور سه فاز (مدل-۱) با کویل های هموژن



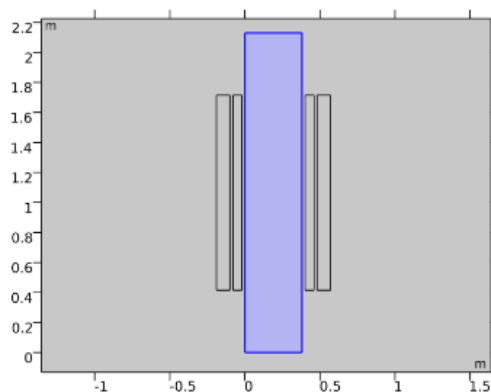
شکل ۸- هندسه ترانسفورماتور سه فاز بزرگنمایی شده (مدل-۱)، غیر همگن (چپ) در مقابل همگن (راست)



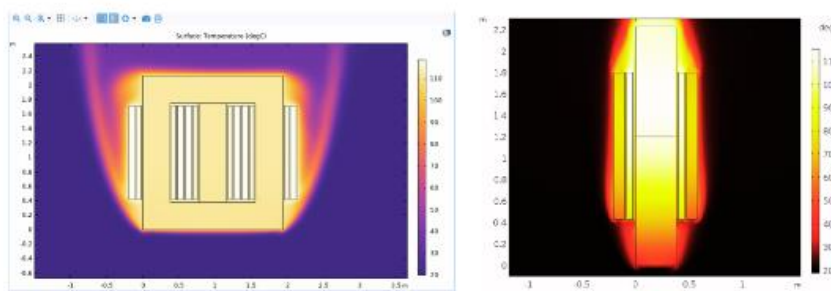
شکل ۹- اثرات سیم پیچ های همگن بر تلفات الکترومغناطیسی در سیم پیچ ها، قبل از (الف) و بعد از (ب)



شکل ۱۰- دمای حالت پایدار ترانسفورماتور سه فاز (مدل-۱)



شکل ۱۱- مدل تک فاز بر اساس داده های سه فاز (مدل-۲)



شکل ۱۲- مقایسه حالت پایدار حرارتی مدل سه فاز در مقابل تک فاز

### نتیجه گیری

در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل رفتار ترانسفورماتورها هنگامی که بیش از حد بارگذاری می شود یا زمانی که تنش حرارتی زمانی به حداکثر محدودیت می رسد از دو روش استفاده می شود در مدل تحلیلی مدل سازی عددی با استفاده از کامسول انجام می شود، با توجه به محدودیت داده ها، از شبکه عصبی برای تخمین ثابت های زمانی استفاده شد و از روش های اصلاح شده

IEEE بهره گرفته شد. تجزیه و تحلیل دمای هات اسپات در مدل سازی عددی با دو تحلیل انجام می شود. تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی حرارتی بر روی ترانسفورماتور سه فاز نوع خشک با سیم پیچ های متعدد تک چرخشی برای توصیف سیم پیچ ها انجام شده است. مدل سازی حرارتی برای شبیه سازی با مدل سازی الکترومغناطیسی به زمان بسیار زیادی نیاز دارد، با این حال تقریب های همگن برای سرعت بخشیدن به تحلیل استفاده می شوند. عمق پوسته و اثرات مجاورت مدل ها با استفاده از تقریب ها حذف می شوند از این رو، هات اسپات ها را نمی توان تخمین زد، با این حال آنالیز حرارتی در مدل ترانسفورماتور سه فاز ۱ به انتها می رسد و بالاترین دما در سیم پیچ ها در حدود ۱۱۰ درجه بدون خنک کننده های خارجی مشاهده می شود.

#### منابع

1. D. Susa, M. Lehtonen and H. Nordman, 'Dynamic thermal modelling of power transformers,' IEEE transactions on Power Delivery, vol. ۲۰, no. ۱, pp. ۱۹۷-۲۰۴, ۲۰۰۵
2. S. Attestog, 'Electromagnetic and thermal modelling for prognosis of distribution transformer,' M.S. thesis, Universitetet i Agder; University of Agder, 2018.
3. Yang, J., Zhang, G., Liu, Y., Gong, Z., & Liu, Z. (2023). A method for calculating hot-spot temperature of traction transformer based on multi-physical model and combined neural network. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
4. Yang, F., Wu, T., Jiang, H., Jiang, J., Hao, H., & Zhang, L. (2022). A new method for transformer hot-spot temperature prediction based on dynamic mode decomposition. *Case Studies in Thermal Engineering*, 37, 102268.
5. Rommel, D. P., Di Maio, D., & Tinga, T. (2021). Transformer hot spot temperature prediction based on basic operator information. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 124, 106340.
6. Zhang, Y., Wei, X., Fan, X., Wang, K., Zhuo, R., Zhang, W., ... & Liu, J. (2021). A prediction model of Hot spot temperature for split-windings traction transformer considering the load characteristics. *IEEE Access*, 9, 22605-22615.
7. Xu, G., Sun, Y., Zhong, H., Li, N., Wang, E., Zhang, L., & Hu, Y. (2020, July). Analysis of Hot Spot Temperature of Dry-Type Transformer Based on Finite Element Method. In *2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)* (pp. 449-453). IEEE.
8. Alvarez, D. L., Rivera, S. R., & Mombello, E. E. (2019). Transformer thermal capacity estimation and prediction using dynamic rating monitoring. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(4), 1695-1705.
9. Meitei, S. N., Saikia, A., Borah, K., & Chatterjee, S. (2018, June). Hot spot detection in high voltage transformer by thermal sensor using COMSOL Multiphysics. In *2018 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE)* (pp. 1-4). IEEE.
10. Wei, B. G., Wu, X. Y., Yao, Z. F., & Huang, H. (2017, November). A method of optimized neural network by LM algorithm to transformer winding hot spot temperature forecasting. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 93, No. 1, p. 012030). IOP Publishing.
11. Li, L., Niu, S., Ho, S. L., Fu, W. N., & Li, Y. (2015). A novel approach to investigate the hot-spot temperature rise in power transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(3), 1-4.
12. Radaković, Z., Radoman, U., & Kostić, P. (2014). Decomposition of the hot-spot factor. *IEEE Transactions on Power delivery*, 30(1), 403-411.
13. D. Susa, 'Dynamic thermal modelling of power transformers,' Ph.D. dissertation, Helsinki University of Technology, FINLAND, 2005.
14. A. Germanov, 'Deep learning with julia – how to build and train a model using a neural network,' Accessed: May 14, 2023. [Online]. Available: <https://dev.to/andreygermanov/deep-learning-with-julia-how-to-build-and-train-a-model-using-a-neural-network-40pe>.
15. H. Xiaofeng, Z. Lijun, W. Guangning and D. Qingquan, 'Simulation models of

16. transformer hot-spot temperature,' in 2012 IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, 2012, pp. 1–4. doi: 10 . 1109/ICPADM.2012.631894
17. C. Multyphysics. 'Comsol multiphysics quick start and quick reference v5.5.' (Ac-cessed: April 10, 2023), [Online]. Available: [https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/comsol\\_ref\\_equationbased.23.008.html](https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/comsol_ref_equationbased.23.008.html).