ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(5):1177-1186

Simulation and Parametric Analysis of Zigzag Cooling Flow Path in a Disc-Type Transformer Winding to Investigate Parameters Affecting Cooling Conditions

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Hamedi F.[1] *MSc,*
Moqtaderi H.*[1] *PhD*

How to cite this article
Hamedi F, Moqtaderi H. Simulation and Parametric Analysis of Zigzag Cooling Flow Path in a Disc-Type Transformer Winding to Investigate Parameters Affecting Cooling Conditions. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(5):1177-1186.

ABSTRACT

Heat transfer phenomenon and location prediction as well as hotspot temperature in disc-type transformer windings have attracted many researches in recent years. The motivation is based on noticeable effects of these issues on transformers endurance, reliability, and functionality. This paper focuses on developing a sufficiently accurate CFD model to carry out paremetric studies and address some guidelines for disc-type transformer windings with zigzag cooling path with a reasonable computional resource demands. The discs composed from copper wires and paper insulators wrapped around them. Accounting for this inhomogeneity by zone distinction in CFD model results in many computational subdomains in very small size, which makes model development and mesh generation difficult and also computational costs, very high. In this paper, using properties definition functions, a method is introduced that accounts for different material properties with no need to resolve solution subdomains. Also temperature dependency of thermo-physical properties such as conductivity, viscousity, and density have been taken care of. Results show that using current method, model development, and also solution time noticeably reduced without any considerable descripancies in numerical results. Furthermore, using Ansys Workbench capabilities for automatic parameters study, i.e. automatic geometry reconstruction and mesh generation, effects of several parameters on transformer cooling condition have been investigated. Finally, some guidelines for such transformers design have been addressed.

Keywords Transformer; Hotspot Temperature; Zigzag Cooling Path

[1]Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Alzahra University, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Alzahra University, Deh Vanak Street, Tehran, Iran. Postal Code: 1993893973
Phone: +98 (21) 85692161
Fax: +98 (21) 88617537
h.moqtaderi@alzahra.ac.ir

Article History
Received: July 09, 2018
Accepted: December 10, 2018
ePublished: May 01, 2019

CITATION LINKS

[1] CFD study on the thermal performance of transformer disc windings without oil guides [2] Thermal investigation and heat flux analysis of a cascaded transformer in the tropics [3] Thermal-fluid characterization of alternative liquids of power transformers: A numerical approach [4] Assessment of a hydraulic network model for zig-zag cooled power transformer windings [5] Thermal modelling of a natural-convection-cooled, oil-immersed distribution transformer [6] An investigation of parameters affecting the temperature rise in windings with zigzag cooling flow path [7] Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type transformer winding [8] Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding [9] Numerical study of cooling solutions inside a power transformer [10] Oil cooling for disk-type transformer windings-part 1: Theory and model development [11] Computational methods for fluid dynamics

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

شبیه‌سازی و تحلیل پارامتریک مسیر خنک‌کاری زیگزاگ در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور دیسکی به‌منظور بررسی پارامترهای طراحی موثر بر شرایط خنک‌کاری

فهیمه حامدی MSc
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهرا(س)، تهران، ایران
حامد مقتدری* PhD
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهرا(س)، تهران، ایران

چکیده
پدیده انتقال حرارت، تعیین موقعیت و دمای نقطه داغ در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این اقبال ناشی از تاثیرات قابل ملاحظه این امور بر استقامت، قابلیت اطمینان و بازده عملکرد ترانسفورماتورها است. هدف اصلی در این مقاله، توسعه یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی با دقت مناسب و حجم محاسباتی متعادل برای انجام مطالعات پارامتری و به‌دست‌آوردن معیارهایی برای طراحی سیم‌پیچ‌های دیسکی با مسیر خنک‌کاری زیگزاگ بوده است. این دیسک‌ها از سیم‌های مسی و عایق کاغذی که به دور آنها پیچیده شده، ساخته شده‌اند. درنظرگرفتن این ناهمگنی، به‌صورت تفکیک نواحی حل برای به‌وجودآمدن تعداد نواحی بسیار زیاد با اندازه بسیار کوچک، توسعه مدل و به‌خصوص شبکه را دشوار می‌سازد و همچنین هزینه محاسباتی بالایی ایجاد می‌کند. در این مقاله با استفاده از توابع تعریف خواص روشی ارایه شده است که بدون تفکیک نواحی حل، ناهمگنی دیسک‌ها به‌لحاظ جنس و وابستگی خواص ترموفیزیک همچون هدایت حرارتی و لزجت به دما لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از این روش علاوه بر اینکه زمان توسعه مدل و زمان تحلیل، کاهش چشمگیری داشته، دقت تحلیل نیز در حد قابل قبولی بوده و انحراف قابل توجهی در نتایج دیده نشده است. در ادامه نیز با استفاده از قابلیت محیط نرم‌افزار Ansys WorKbench در تحلیل پارامتری، تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و عملکردی بر شرایط خنک‌کاری ترانسفورماتور بررسی شده و در نهایت پیشنهاداتی برای طراحی این مدل از ترانسفورماتورها ارایه شده است.

کلیدواژه‌ها: ترانسفورماتور، دمای نقطه داغ، مسیر خنک‌کاری زیگزاگ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۹
*نویسنده مسئول: h.moqtaderi@alzahra.ac.ir

۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت، یکی از باارزش‌ترین تجهیزات شبکه‌های الکتریکی و همچنین سیستم‌های تبدیل انرژی هستند. خرابی یک ترانسفورماتور دارای تبعات قابل توجهی است که هزینه زیاد زمانی و مالی برای تعمیر، کاهش قابلیت اطمینان شبکه، اختلال در برق‌رسانی و ازدست‌رفتن سود فروش برق یا تحمل ضرر تاخیر در تولید محصولات از آن جمله هستند.

اگرچه معمولاً در طراحی تجهیزات الکتریکی به‌خصوص ترانسفورماتور، عمر مفیدی حدود ۴۰ سال در نظر گرفته می‌شود، اما عمر واقعی عملکرد این تجهیزات بیش از ۵۰ سال است که در این خصوص، نحوه حفاظت و مراقبت از ترانسفورماتور برای افزایش عمر (یا جلوگیری از کاهش عمر طبیعی) نقش اساسی دارد.

یکی از عواملی که باعث می‌شود ترانسفورماتورها زودتر از پایان عمر مفید، دچار خرابی شوند، خنک‌کاری نامناسب هسته و سیم‌پیچ است. برای جلوگیری از اثر تخریبی هوا (اکسایش هسته و سیم‌پیچ) و بهبود شرایط خنک‌کاری ترانسفورماتورهای با قدرت زیاد، معمولاً هسته و سیم‌پیچ‌ها را درون مخزن پُر از روغن قرار می‌دهند که این نوع ترانسفورماتور را روغنی می‌نامند.

در این نوع ترانسفورماتور، روغن سرد از سیستم خنک‌کننده بیرونی وارد محفظه سیم‌پیچ می‌شود. دمای روغن در اثر شار حرارتی به‌وجودآمده در سطح سیم‌پیچ‌ها به‌تدریج بالا می‌رود. با توجه به اندازه‌گیری‌های تجربی، شار حرارتی موجود در دیسک‌های بالایی سیم‌پیچ بیشتر از دیسک‌های پایینی است که این پدیده باعث می‌شود دمای دیسک‌های بالایی به‌شدت افزایش یابد. باید در طراحی به این نکته توجه کرد که این افزایش دما از مقدار استاندارد و تعیین‌شده بیشتر نشود.

مطالعات گسترده‌ای در رابطه با انتقال حرارت و جریان سیال در ترانس‌های قدرت صورت گرفته است. بیشتر مطالعات موجود در زمینه مدل‌سازی حرارتی ترانسفورماتورها، مربوط به تعیین نقاط داغ و تعیین حداکثر دمای روغن بوده است. این مدل‌ها از مدل‌های ساده تا مدل‌های پیچیده سه‌بُعدی را شامل می‌شوند. چون اندازه‌گیری مستقیم دمای نقاط داغ دشوار است، اکثر مدل‌های ارایه‌شده به‌طور کامل اعتبارسنجی نشده‌اند[1-4].

مدل‌های عددی برای تعیین توزیع دما و جریان در ترانسفورماتورهای قدرت بیش از ۴۰ سال سابقه دارند. *مارکو* در سال ۱۹۹۷ روند کامل مدل‌سازی عددی را برای انتقال حرارت کوپل یک ترانسفورماتور روغنی ارایه داده است که از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی خنک می‌شود تا میدان دما را در اطراف هسته و سیم‌پیچ‌ها پیش‌بینی نماید[5]. مدل ارایه‌شده او دارای هندسه دوبُعدی در مختصات کارتزین است. معادلات انتقال حاکم، با استفاده از روش حجم محدود روی یک شبکه با فواصل غیریکنواخت گسسته‌سازی شده است. او تاثیر پارامترهای متعددی نظیر مدل‌سازی هسته و سیم‌پیچ به‌عنوان یک ناحیه همسان‌گرد، هدایت حرارتی ناهمسان‌گرد در بخش‌های جامد میدان حل، شرایط محیطی و فرض تابع دمابودن لزجت روغن را مورد بررسی قرار داده است. از جمله فرضیات او، همگن‌فرض‌کردن ناحیه سیم‌پیچ‌ها است که در واقع شامل سیم‌های مسی و عایق‌های کاغذی هستند. او مشاهده کرد که جریان روغن اطراف سیم‌پیچ‌ها و هسته ترانس اغلب ناپایدار بوده و به نوسانات کوچک در میدان دما بسیار حساس است.

رحیم‌پور و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از مدل شبکه گرمایی (TNM) مطالعه‌ای پارامتری انجام دادند. آنها اثرات تلفات گرمایی، ارتفاع رادیاتور، هندسه کانال‌های روغن و تعداد واشر در سیم‌پیچ‌های دیسکی را بررسی کردند[6]. همچنین به بررسی اثر پارامترهای مختلف در افزایش دمای سیم‌پیچ‌ها با سیستم خنک‌کاری زیگزاگ پرداختند. با توجه به اینکه سیم‌پیچ‌های دیسکی معمولاً در ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ استفاده می‌شوند، استفاده از واشرهای نگهدارنده برای هدایت روغن نیز در برخی از طراحی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. آنها نشان دادند که استفاده از این واشرها باعث چرخش روغن از کانال‌های افقی شده و با عبور جریان روغن به‌صورت زیگزاگ از سیم‌پیچ‌ها با بهبود خنک‌کاری، ضریب انتقال حرارت را افزایش داده است و دمای نقطه داغ را کاهش می‌دهد و در نتیجه، باعث کاهش اندازه ترانس می‌شود. این محققان مدل ارایه‌شده را با استفاده از داده‌های تجربی اعتبارسنجی کرده و به نتایج زیر دست یافته‌اند:

۱- تلفات جریان گردابه‌ای، میزان تولید گرما و دمای سیم‌پیچ‌ها را به‌ویژه در سیم‌پیچ‌های بالا و پایین افزایش می‌دهد.

۲- تعداد دیسک‌های کمتر در یک بخش، یعنی بین دو واشر، دما را کاهش می‌دهد، ولی باعث افزایش افت فشار در کانال‌های بالایی می‌شود.

۳- دمای دیسک‌ها در راستای ارتفاع کانال‌های خنک‌کاری افزایش می‌یابد، چون ضریب انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند.

توریانو و همکاران در سال ۲۰۱۰، تاثیر شار جرمی و شرایط مرزی بر توزیع جریان و دما در سیم‌پیچ‌های مدل دیسکی ترانس را مورد بررسی قرار دادند[7]. آنها رویکردهای مختلف عددی با سطوح پیچیدگی متفاوت را بررسی کرده و اثر هر سطح از ساده‌سازی را بر نتایج گزارش نموده‌اند. در پیچیده‌ترین حالت، سطح دیسک‌ها به‌صورت غیریکنواخت با درنظرگرفتن مس و عایق کاغذی و همچنین خواص سیال به‌عنوان تابعی از دما در نظر گرفته شده است. در این مدل، ناحیه سیال و جامد به‌صورت کوپل حل شده‌اند. جریان را به‌صورت آرام و متقارن محوری در دو بُعد در نظر گرفته‌اند. آنها برای حل معادلات حاکم از نرم‌افزار CFX (روش حجم محدود) استفاده کرده‌اند. همچنین پروفیل دما (یکنواخت یا غیریکنواخت) در ورودی سیم‌پیچ را به‌عنوان یک پارامتر مهم معرفی کردند که بر دمای نقطه داغ تاثیر می‌گذارد. نتایج عددی آنها نشان داد که شار جرمی بیشتر در ورودی، اثر خنک‌کاری را بهبود می‌بخشد، زیرا توزیع دما یکنواخت‌تر و ضریب نقطه داغ کاهش خواهد یافت.

در ادامه *توریانو* و همکاران در سال ۲۰۱۲، یک مدل سه‌بُعدی از شبیه‌سازی انتقال حرارت را مورد توجه قرار دادند تا به‌وسیله آن توزیع جریان و دما در سیم‌پیچ‌های دیسکی ترانس را به دست آورند[8]. در واقع، آنها مدل دوبُعدی حجم محدود خود را ارتقا دادند. آنها نشان دادند با توجه به وجود واشرها و نگهدارنده‌ها در کانال‌های خنک‌کننده نمی‌توان سیستم را متقارن در نظر گرفت، چرا که واشرها و نگهدارنده‌ها مانع از آن می‌شود که سطح دیسک با سیال خنک‌کننده تماس مستقیم داشته باشد. آنها نشان دادند که شبیه‌سازی سه‌بُعدی دقیق‌تر از شبیه‌سازی دوبُعدی بوده و به نتایج تجربی نزدیک‌تر است و به همین دلیل از داده‌های آن برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی دوبُعدی استفاده کردند. محاسبات سه‌بُعدی نشان می‌دهد که جریان در کانال‌های خنک‌کاری متقارن نیست و بیشترین گرادیان سرعت و دما در محل اتصالات و مجراهای جداکننده رخ می‌دهد.

چرچس و همکاران در سال ۲۰۱۷، روی جریان سیال و انتقال گرمای جابه‌جایی در یک مدار حرارتی با چندین کانال خنک‌کاری با سرعت‌های ورودی متفاوت کار کردند[9]. آنها به مطالعه عددی جریان سیال و انتقال حرارت در شرایط پایدار برای یک ترانس قدرت سه‌فاز غوطه‌ورشده در داخل یک تانک روغن پرداختند. مدل مورد بررسی آنها به‌صورت متقارن محوری فرض شده و برخی دیگر از فرضیات آنها، درنظرگرفتن سطح دیسک‌ها به‌صورت یکنواخت و صرف نظر از تغییرات خواص سیال بر اثر دما بوده است. هدف اصلی آنها بهینه‌سازی خنک‌کاری ترانسفورماتور قدرت بوده است. آنها از یک مانع در بخش‌های پایینی از یک ترانسفورماتور به‌منظور هدایت روغن به سطوح گرم‌تر استفاده کردند.

آنها برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر انتقال گرما، مواردی نظیر دمای نقطه داغ و عدد رینولدز را در نظر گرفتند و در حالت‌های مختلف با هم مقایسه کردند. آنها پی بردند همواره یک سرعت بهینه وجود دارد که دما را در حد مجاز نگه می‌دارد. آنها از یک مدل عددی به‌منظور به‌دست‌آوردن بهترین سرعت ورودی برای خنک‌کاری ترانسفورماتور بهره گرفتند. در هر مورد، یک تجزیه و تحلیل پارامتری برای درک بهتر ساختار جریان و توزیع دما در داخل ترانسفورماتور انجام داده‌اند. ملاحظه می‌شود که در این مدل نیز به‌دلیل احتراز از هزینه محاسباتی بالا از ساده‌سازی‌های گسترده‌ای مانند همگن‌بودن سیم‌پیچ‌ها و عدم وابستگی خواص به دما استفاده شده است.

در این مقاله روی سیم‌پیچ‌های دیسکی با خنک‌کننده روغن تمرکز شده است. از آنجایی که تعیین چگونگی خنک‌کاری کلی، تعیین دمای نقطه داغ، موقعیت آن و توزیع روغن در ترانس‌هایی با ابعاد بزرگ، با روابط نیمه‌تجربی و مهندسی قابل پیش‌بینی نیست، لذا بایستی برای تخمین دقیق از ابزارهای قدرتمند CFD استفاده کرد. به‌عبارت دیگر، موضوع اصلی این مقاله، توسعه مدل محاسباتی برای تحلیل پدیده‌های انتقال حرارت و جرم در کانال‌های خنک‌کاری ترانسفورماتورهای قدرت است.

نکته مهم در توسعه مدل‌های محاسباتی به‌عنوان ابزاری برای مطالعات پارامتری و بهینه‌سازی، هزینه محاسباتی کم با وجود دقت قابل قبول و نتایج معتبر آنها است. به نظر می‌رسد که مدل‌های ارایه‌شده تا حال حاضر یا هزینه‌های محاسباتی قابل توجهی داشته‌اند یا از مدل‌های نیمه‌تجربی که وابستگی بالایی به داده‌های آزمایشگاهی دارند، استفاده شده است یا علی‌رغم استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی از جزئیات موثری در نتایج صرف نظر کرده‌اند. در پژوهش حاضر، هدف اصلی توسعه مدلی با هر دو ویژگی فوق‌الذکر و انجام یک مطالعه پارامتری اتوماتیک نمونه بر پایه مدل توسعه‌یافته بوده است. در این تحقیق، مدلی براساس دینامیک سیالات محاسباتی توسعه یافته است که به لحاظ هندسی، متقارن محوری است که در نتیجه صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه محاسباتی نسبت به مدل‌های سه‌بُعدی کامل دارد. همچنین تمام خواص سیال تابع دما فرض شده‌اند و ناهمگنی دیسک‌های متشکل از سیم مسی و عایق کاغذی لحاظ شده است. البته این ناهمگنی به‌نحوی مدل شده است که اثرات قابل توجهی بر هزینه محاسباتی نداشته باشد.

۲- شرح پژوهش

ترانسفورماتور قدرت وسیله‌ای الکتریکی است که به‌منظور تغییر ولتاژ متناوب در سیستم انتقال قدرت استفاده می‌شود. ترانسفورماتور، انرژی الکتریکی را در یک سیستم جریان متناوب از یک مدار به مدار دیگر انتقال می‌دهد و می‌تواند ولتاژ کم را به ولتاژ زیاد و بالعکس تبدیل نماید. ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ و متوسط شامل مخزن روغن، تجهیزات خنک‌کننده روی دیوار مخزن و بخش فعال در داخل مخزن هستند.

بر خلاف ماشین‌های الکتریکی که انرژی الکتریکی و مکانیکی را به یکدیگر تبدیل می‌کنند، در ترانسفورماتور، انرژی به همان شکل الکتریکی باقی می‌ماند، فرکانس آن نیز تغییر نمی‌کند و فقط مقادیر ولتاژ و جریان در سیم‌پیچ اولیه و ثانویه متفاوت خواهد بود.

همچنین در تبدیل ولتاژ در ترانسفورماتور، مقداری اتلاف انرژی وجود دارد که به‌صورت گرما به داخل ترانسفورماتور انتقال می‌یابد. با توجه به نوع، سطح انرژی انتقالی و اجزای ترانسفورماتور، دمای ترانس همواره باید پایین‌تر از حد مشخصی باقی بماند. تحت این شرایط، ترانسفورماتور می‌تواند به‌درستی کار کند. لذا از دیدگاه اقتصادی و ایمنی، برای حفظ ترانسفورماتور، لازم است که خنک‌کاری انجام شود.

برای خنک‌کاری، سیم‌پیچ و هسته را در مخزن پُر از روغن معدنی که یک مایع رسانای گرمای دی‌الکتریک است، قرار می‌دهند تا در تبادل حرارتی با روغن، گرمای آنها گرفته و توسط دیواره‌های مخزن به بیرون از ترانسفورماتور هدایت شود. عمر ترانسفورماتورها

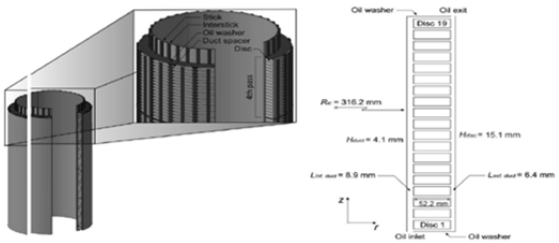
شدیداً تابع دمای هسته و سیم‌پیچ است. بنابراین پیش‌بینی رفتار دمایی یک ترانسفورماتور طی شرایط عملیاتی نرمال و به‌ویژه با وجود شرایط افزایش بار، حیاتی است. علاوه بر این، افزایش آگاهی از توزیع دما در ترانسفورماتورها که سازندگان علاقه‌مند به پیش‌بینی دقیق آن هستند، می‌تواند به طراحان ترانسفورماتور امکان دهد که طراحی‌های بهتری داشته باشند.

۳- دینامیک سیالات محاسباتی

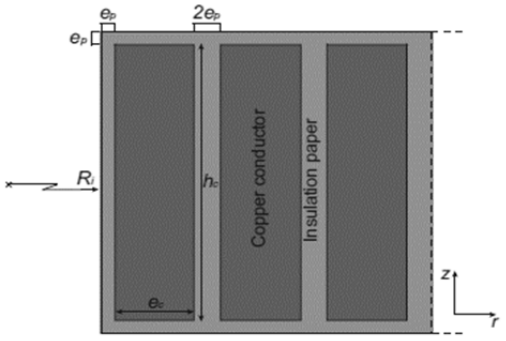
۳-۱- مدل‌سازی هندسی

ناحیه محاسباتی که برای این مطالعه استفاده می‌شود، در شکل ۱ نشان داده شده که این مدل شامل سیم‌پیچ‌های مدل دیسکی با کانال خنک‌کاری توسط روغن است. با وجود اینکه مدل سه‌بُعدی کامل از چندین گذرگاه ساخته شده که روغن به‌صورت زیگزاگی از آنها می‌گذرد، مدل مورد بررسی در این مقاله، برای کاهش حجم محاسبات، تنها یک گذرگاه بررسی شده است.

سطح مقطع دوبُعدی این مدل در شکل ۱ مشاهده می‌شود که شامل ۲۰ کانال افقی و ۱۹ دیسک است. روغن از کف کانال وارد و از بالای آن خارج می‌شود. واشرها در بالا و کف کانال به‌منظور هدایت روغن برای حرکت زیگزاگی بین کویل‌ها قرار گرفته‌اند. هر یک از سیم‌پیچ‌های دیسکی در مساله حاضر از هادی مس تشکیل شده‌اند که با عایق‌های کاغذی پوشیده شده است. هر دیسک شامل ۱۸ هادی مس بوده که در شکل ۲ نشان داده شده است. بنابراین ناحیه محاسباتی شامل دو ناحیه جامد (مس و عایق‌های کاغذی) و سیال (شامل کانال‌های خنک‌کاری با روغن) است.



شکل ۱) هندسه سیم‌پیچ‌های ولتاژ پایین؛ نمای ایزومتریک (سمت چپ)؛ نمای برش‌خورده از گذرگاه چهارم (سمت راست)

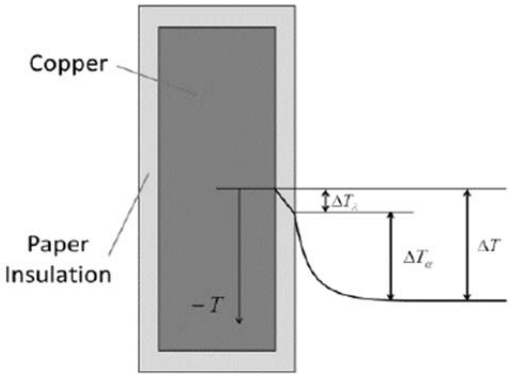


شکل ۲) نمای برش‌خورده از دیسک‌ها

۳-۲- انتخاب و تنظیم مدل فیزیکی

مساله انتقال گرما در سیم‌پیچ‌های دیسکی ترکیبی از مسایل انتقال گرما و انتقال جرم است. در داخل سیم‌پیچ‌های دیسکی هر دو، انتقال گرمای جابه‌جایی و هدایت وجود دارد. انتقال گرمای جابه‌جایی توسط روغن، انتقال گرمای غالب در مجموعه است. انتقال گرمای هدایتی در داخل سیم‌پیچ‌های دیسکی از لایه‌های داخلی که هادی هستند، به سمت لایه‌های عایق اطراف آن اتفاق می‌افتد. جریان روغن از فضاهای بین هر دیسک مجاور و فاصله‌های بین سیم‌پیچ‌های دیسکی و مقوای عایق استوانه‌ای اطراف سیم‌پیچ‌ها عبور می‌کند. برای حل این مساله می‌توان از یک مدل هیدرودینامیک با عدد پرانتل بالا و عدد رینولدز پایین (جریان آرام) استفاده کرد.

مدل حرارتی این مساله در شکل ۳ نشان داده شده است. سیم‌های موجود داخل دیسک‌ها از مواد رسانا، معمولاً مس ساخته شده است که این امر موجب ایجاد تلفات حرارتی در زمان کارکرد ترانسفورماتور می‌شود. دما در داخل دیسک‌ها بیشتر از دمای سیال روغن اطراف آن است. حرارت به‌وسیله هدایت از رشته‌های مس به لایه‌های عایق در اطراف آن منتقل می‌شود. جریان روغن اطراف سیم‌پیچ‌ها، گرمای منتقل‌شده را از طریق انتقال حرارت طبیعی از سیستم خارج می‌کند.



شکل ۳) گرادیان دما در داخل دیسک

مطابق با شکل ۳، دمای مجراها یکنواخت فرض می‌شود، ΔT گرادیان دما بین هادی مس و مجرا، ΔT_λ گرادیان دما بین هادی مس و لایه‌های عایق (هدایت حرارتی) و ΔT_α گرادیان دما از لایه‌های عایق به جریان روغن (جابه‌جایی طبیعی) است. رابطه بین گرادیان‌های فوق به‌صورت زیر بیان می‌شود[10].

$$\Delta T = \Delta T_\alpha + \Delta T_\lambda \quad (۱)$$

۳-۲-۱- معادلات حاکم

به‌منظور مدل‌سازی دقیق توزیع دما در داخل سیم‌پیچ‌ها بایستی ناحیه سیال و جامد به‌صورت کوپل حل شود. جریان سیال در کانال‌های خنک‌کاری با استفاده از معادلات ناویر- استوکس و پیوستگی حل خواهد شد که برای سیال تراکم‌ناپذیر به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla.\left(\rho\vec{U}\right) = 0 \quad (۲)$$

که همان معادله بقای جرم است. همچنین در جریان جابه‌جایی آزاد یک سیال‌تراکم‌ناپذیر با فرض بوزینسک، معادلات ناویر- استوکس و انرژی می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla.(\rho U \times U) = -\nabla p + \mu(\nabla^2 U) + g\left(\rho - \rho_{ref}\right) \quad (۳)$$

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla.\left(\rho c_p U T\right) = \nabla.(k\nabla T) + S_E \quad (۴)$$

توزیع دما در سیم‌پیچ‌ها نیز با حل معادله هدایت گرما در ناحیه جامد به دست می‌آید.

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = -\nabla.(k\nabla T) + S_E \quad (۵)$$

این مجموعه معادلات، ارتباطی بین مدل‌های هیدرولیک و حرارتی ایجاد می‌کند که می‌توان مشخصه‌های این سیستم کوپل را توسط روابط اعداد بدون بعد توصیف کرد[3].

عدد رینولدز نسبت بین نیروهای اینرسی به نیروهای لزج را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی با توجه به اینکه عدد رینولدز پایین بوده، نیروی ویسکوز نیروی غالب بوده و جریان آرام است. رینولدز طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (۶)$$

عدد ناسلت به‌عنوان شاخصی از نسبت انتقال گرمای جابه‌جایی به انتقال گرمای هدایتی در مرز یک سیال نزدیک دیواره بیان می‌شود. برای یک جریان آرام، مقدار عدد ناسلت نزدیک یک است و طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$Nu = \frac{hl}{k} \quad (۷)$$

عدد گراشف در مساله حاضر معمولاً برای توصیف رفتار روغن ترانسفورماتور در شرایط دمایی معین استفاده می‌شود. این عدد را می‌توان شاخصی از نسبت نیروهای شناوری به نیروی لزجت محسوب کرد و به همین دلیل برای توصیف جابه‌جایی آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

معمولاً عدد گراشف بالا، ظرفیت زیاد سیال برای شکل‌گیری جابه‌جایی آزاد را نشان می‌دهد. از آنجایی که جریان روغن بین دیسک‌های ترانسفورماتور را می‌توان به‌صورت جریان آزاد بین صفحات قلمداد کرد، برای به‌دست‌آوردن عدد گراشف می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T.L^2}{\nu^2} \quad (۸)$$

عدد پرانتل، نسبت بین لزجت سیال به نفوذ حرارتی است. روغن ترانسفورماتور، سیالی با عدد پرانتل بالا است. این امر بدان معناست که لزجت روغن بر نفوذ حرارتی تاثیر زیادی می‌گذارد. عدد پرانتل به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$Pr = \frac{c_p.\mu}{k} \quad (۹)$$

عدد پرانتل سیال روغن بیشتر از ۵۰ است. عدد رایلی نشان‌دهنده رابطه بین عدد گراشف و عدد پرانتل است و برای توصیف مد انتقال گرما برای یک نیروی شناوری معین که جریان را به حرکت در می‌آورد، استفاده می‌شود. در بیشتر موقعیت‌ها، مقدار عدد رایلی حدود 10^7 تا 10^8 است و معادله‌ای که برای محاسبه عدد رایلی استفاده می‌شود، به‌صورت زیر بیان می‌شود[8]:

$$\mathrm{Ra} = \mathrm{Gr.pr} \quad (۱۰)$$

با توجه به تجزیه و تحلیل‌های تئوری انجام‌گرفته، مقدار عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰ است. روغن معدنی مورد استفاده به‌عنوان سیال با عدد پرانتل بالا حدود ۷۰ بوده، بنابراین می‌توان گفت فرض جریانی آرام با لایه مرزی حرارتی آرام قابل قبول است.

۳-۳- انتخاب مدل عددی

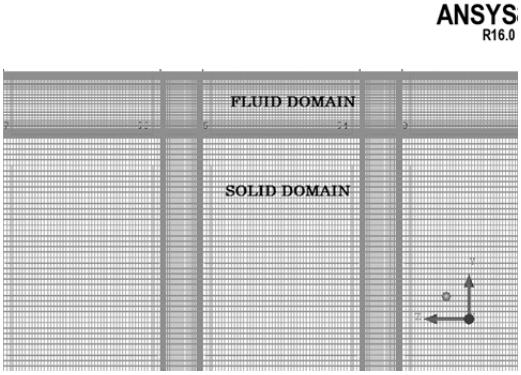
به‌منظور حل معادلاتی که در بخش قبلی توضیح داده شده، از نرم‌افزار CFX استفاده شده است که از روش حجم محدود برای حل مسایل بهره می‌برد. روش حجم محدود در واقع نوعی از روش اجزای محدود است که در آن از معادلات عمومی بقا (بقای جرم، بقای اندازه حرکت و بقای انرژی) در شکل انتگرالی استفاده می‌شود. محدوده حل به تعداد معینی حجم کنترل مجاور هم، تقسیم و معادلات در آن محدوده حل می‌شوند. روش حجم محدود برای تمام هندسه‌ها از جمله هندسه‌های پیچیده کاربرد دارد[11].

۳-۴- تولید شبکه

در این مدل، شبکه توسط نرم‌افزار ICM-CFD تولید شده است. این نرم‌افزار در تولید انواع شبکه بسیار قدرتمند است که با استفاده از آن می‌توان یک شبکه با کیفیت بالا تولید کرد. معمولاً بایستی مصالحه‌ای بین دقت شبکه و هزینه انجام گیرد. برای این مساله، یک پیشنهاد مناسب استفاده از شبکه سازمان‌یافته به‌جای شبکه بی‌سازمان است. هر چند که با این کار، زمان تنظیمات شبکه بالا می‌رود، ولی زمان محاسبه و حجم شبکه به‌مراتب پایین‌تر خواهد بود. همچنین برای کاهش بیشتر تعداد المان‌ها از روش سازمان‌یافته بلوکی استفاده شده است. این تکنیک، قابلیت استفاده از متراکم‌سازی شبکه در نقاط حساس مثل لایه‌های مرزی را بدون ریزشدن غیرضروری شبکه در کلیه نواحی حل ایجاد می‌نماید.

برای ناحیه سیال با توجه به ضرورت درنظرگرفتن لایه مرزی در نزدیکی دیواره جامد، شبکه در این نواحی باید ریزتر شود و در ناحیه دور از دیواره می‌توان شبکه درشت‌تری تولید کرد. در حدود ده لایه در نزدیکی سطح جامد به‌منظور حل دقیق لایه مرزی حرارتی در نظر گرفته شده است. همچنین در ورودی و خروجی هر کانال افقی نیز شبکه به‌خاطر وجود گرادیان زیاد در این نواحی، ریزتر شده است. در ناحیه سیال حدود ۵۰۵۰۰۰ المان وجود دارد و در جهت زاویه‌ای نیز تنها یک المان در نظر گرفته شده است.

در ناحیه جامد، به‌دلیل اینکه تنها مکانیزم انتقال گرما، هدایت حرارتی است، نیازی به لایه مرزی وجود ندارد، لذا به‌صورت یکنواخت از المان‌های مربعی استفاده شده است که در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



شکل ٤) شبکه محاسباتی ناحیه‌های سیال و جامد

همان طور که در شکل ۲ مشاهده شد، داخل هر دیسک، ۱۸ هادی مس قرار دارد که عایقی کاغذی اطراف آنها را پوشانده است. یک روش عددی می‌تواند این باشد که در هر دیسک، بین عایق و هادی مس یک ارتباط GGI برقرار باشد که در این حالت، تعداد زیادی از این سطوح ارتباطی در ناحیه جامد ایجاد می‌شود.

لذا در این مقاله، به‌منظور کاهش حجم محاسبات، روشی پیشنهاد شده است که براساس آن، خواص دیسک‌ها به‌صورت تابعی تحلیلی برحسب دو متغیر مکانی محور و شعاعی محاسبه می‌شوند. با توجه به نوع تعریف این توابع، باید تعداد المان کافی در ناحیه جامد در نظر گرفته شود تا این توابع با دقتی مناسب فراخوانی شوند. در غیر این صورت، مرز ناحیه عایق کاغذی و رسانای مس به‌درستی تشخیص داده نمی‌شود. برای این حالت در جهت ضخامت عایق، حداقل چهار المان در نظر گرفته شده است. تعداد کل المان در

ناحیه جامد حدود ۷۶۰۰۰۰ بوده که تنها یک المان در جهت زاویه‌ای در نظر گرفته شده است.

۳-۴-۱- بررسی کیفیت شبکه

برخی از پارامترهای کلیدی برای ارزیابی کیفیت شبکه در این بخش بررسی شده‌اند. در جدول ۱ نتایج آماری کیفیت المان‌ها ارایه شده است. همچنین به‌منظور بررسی استقلال از شبکه برای مدل مورد بررسی، تعداد المان‌ها تا ۱/۵برابر افزایش داده شده که با توجه به نتایج به‌دست‌آمده میزان تغییرات دمای ماکزیمم کمتر از یک‌درصد است.

جدول ۱) آنالیز کیفیت از المان‌های شبکه

حل شبکه	حالت بهینه	بهترین مصالحه
تعداد کل المان‌ها	–	۱۲۶۵۰۰۰
نوع المان	چهارگوش	چهارگوش
کیفیت المان	(۱, ۱)	(۰/۹۸, ۱)
ضریب انحراف	(۰, ۰)	(۰, ۳/۳۸)
ماکزیمم زاویه گوشه	(۹۰, ۹۰)	(۹۰, ۹۳/۳۸)

۳-۵- تعیین خواص ناحیه حل

با توجه به آنکه سیال مورد، یک نوع روغن معدنی بوده که خواص آن وابسته به دما است، توابع خواص آن به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$k_f = 0.1509 - 7.101 \times 10^{-5} T_{oil} \ (w\, m^{-1} k^{-1}) \quad (۱۱)$$

$$\rho_f = 1098.72 - 0.712\, T_{oil} \ (kg\, m^{-3}) \quad (۱۲)$$

$$\mu_f = 0.08467 - 4.0 \times 10^{-4} T_{oil} + 5.0 \times 10^{-7} T_{oil}^2 \quad (۱۳)$$

$$c_{pf} = 807.163 + 358 T_{oil} \ (w\, kg^{-1} K^{-1}) \quad (۱۴)$$

تمام خواص سیال غیر از لزجت دینامیکی با دما به‌صورت خطی تغییر می‌کند. گرمای ویژه تنها خاصیتی است که با افزایش دما افزایش می‌یابد. دیسک‌ها از هادی مس که حول آن با عایق کاغذی پوشیده شده، ساخته شده‌اند که خواص این دو ماده به‌ترتیب در جدول ۲ ارایه شده است[7].

جدول ۲) خواص مس و عایق‌ها در دیسک

خواص	مقدار
$cp_p \ (W\, kg^{-1} k^{-1})$	۱۳۴۰
$cp_c \ (W\, kg^{-1} k^{-1})$	۳۸۵
$k_p (\mathrm{W}\, m^{-1} k^{-1})$	۰/۱۹
$k_c (\mathrm{W}\, m^{-1} k^{-1})$	۴۰۱
$\rho_c (\mathrm{kg}\, m^{-3})$	۸۹۳۳
$\rho_p (\mathrm{kg}\, m^{-3})$	۹۳۰

همان‌طور که بیان آن گذشت، به‌منظور ساده‌سازی و کاهش حجم محاسبات از توابعی تحلیلی برای محاسبه خواص در داخل دیسک‌ها استفاده می‌شود. فرم این تابع به‌صورت زیر است:

$$\boldsymbol{\rho = \rho_p + (\rho_c - \rho_p)(step(r - (Ri + ep)) - step(r - (Ri + ep + ec)) + step(r - (Ri + 3ep + ec)) - step(r - (Ri + 3ep + 2ec)) + \ldots + step(r - (Ri + 35ep + 17 * ec)) - step(r - (Ri + 35ep + 18ec)))(step(z - ep) - step(z - (ep + hc)))} \quad (۱۵)$$

این معادله تغییرات چگالی در جهت r و z و سایر پارامترها براساس هندسه میدان قابل محاسبه‌اند که مقادیر آنها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳) پارامترهای هندسه توابع خواص

Ri	ep	ec	hc
۳۲۵/۱mm	۰/٤mm	۲/۱mm	۱۴/۱mm

خواص دیگر مانند ضریب انتقال حرارت ویژه و ضریب هدایت گرما به‌صورت مشابه با چگالی تعریف شده‌اند که در تمام آنها تابع پله به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$step[x] = \begin{cases} 0 & if\ x < 0 \\ 1 & if\ x = 0 \\ 0.5 & if\ x > 0 \end{cases} \quad (۱۶)$$

۳-۶- تعیین شرایط مرزی

در ناحیه سیال، یک شرط مرزی ورودی وجود دارد که در آن سیال با یک دبی و دمای مشخص وارد کانال می‌شود و مقدار دبی جریان برابر ۰/۰۰۲۱۶۷kg/s (برای مدل ۳۶۰درجه برابر ۰/۷۸kg/s) و دمای روغن، ۴۶/۷°C در نظر گرفته می‌شود. در مرز خروجی سیال نیز شرط مرزی فشار ثابت، اعمال شده است که فشار نسبی در این مرز برابر با صفرپاسکال در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اینکه سیلندر داخلی و خارجی از مقوای نازکی ساخته شده‌اند، هدایت گرما در آن بسیار ضعیف است. بنابراین تمام دیوارها به‌جز دیواره دیسک‌ها، آدیاباتیک فرض می‌شود. همین شرایط برای واشرهای روغن نیز در نظر گرفته می‌شود. همچنین یک سطح مشترک بین سطح دیسک و سیال در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، ناحیه جامد به‌عنوان منبعی حرارتی با تولید ۱/۸۸ گرما فرض شده و شرط مرزی تقارن برای تمامی سطوح در جهت زاویه اعمال‌شده است.

۳-۶-۱- ساده‌سازی و فرضیات

در این مقاله برای بهینه‌سازی زمان حل از فرضیات ساده‌کننده‌ای استفاده شده که برخی از این فرضیات به‌صورت زیر است:

۱- مواد داخل دیسک‌ها مس و اطراف آن لایه‌های کاغذ به‌عنوان عایق در نظر گرفته شده است.

۲- مدل هندسی بدون لایه عایق جامد در نظر گرفته شده است. به‌منظور کاهش پیچیدگی و تضمین کیفیت شبکه، لایه‌های عایق جامد در هندسه مدل ایجاد نمی‌شود. در عوض، خاصیت عایق است که روی سطح داخلی بین دیسک‌ها و روغن تعریف می‌شود.

۳- به‌منظور شبیه‌سازی سیستم خنک‌کاری جریان روغن طبیعی- هوای طبیعی انتخاب شده است. دمای کاری به‌عنوان دمای میانگین روغن، حول سیم‌پیچ‌های دیسکی تعریف می‌شود.

۴- دبی جرمی در ورودی، توزیع یکنواختی دارد. در واقع، با توجه به شرایط مرزی و توزیع جرم محلی باید یک پروفیل سرعت در ورودی وجود داشته باشد که به‌عنوان ثابت در نظر گرفته می‌شود.

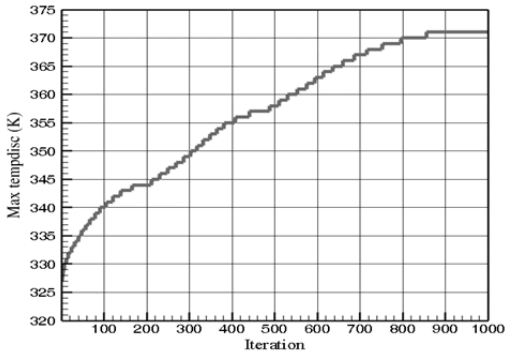
۵- تلفات حرارتی، ثابت فرض می‌شود. همه انواع تلفات گرما با هم ترکیب و ساده می‌شوند که به‌عنوان تلفات گرمای کلی به‌طور مساوی روی دیسک‌ها تقسیم می‌شوند.

۶- تمام دیوارها به‌جز دیوارهای حول دیسک، آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شود. این فرض برای رسیدن به یک حالت ایده‌آل بدون اتلاف گرما ایجاد شده است.

۳-۷- تنظیم مدل خروجی و حلگر

در یک حالت پایدار به‌منظور نشان‌دادن همگرایی حل، علاوه بر بررسی نمودار، باقیمانده‌های معادلات حاکم از روند همگرایی دمای نقطه داغ در سطح دیسک‌ها نیز استفاده شده است. همان‌طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، بعد از حدود ۱۰۰۰ تکرار، دمای نقطه داغ به مقدار ثابتی می‌رسد.

پردازنده مورد استفاده برای مساله حاضر Intel(R) core(TM) i5-4200U و زمان حل حدود ۶ ساعت و ۲۰دقیقه بوده است.



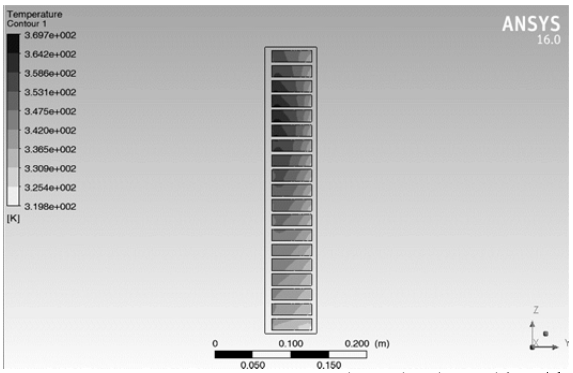
نمودار ۱) همگرایی دمای ماکزیمم دیسک‌ها

۴- نتایج شبیه‌سازی

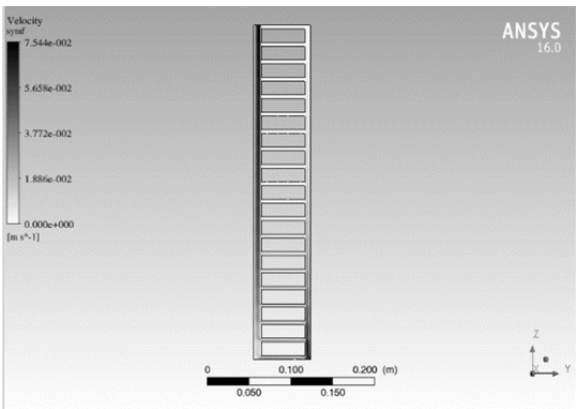
۴-۱- اعتبارسنجی نتایج

کانتور سرعت از سیال روغن در داخل کانال و کانتور دما روی سیم‌پیچ‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. کانتور دمای حاصل با کانتور دمای به‌دست‌آمده توسط *توریانو* و همکاران[7] مقایسه شده است و توافق خوبی بین دو کانتور به‌دست‌آمده وجود دارد.

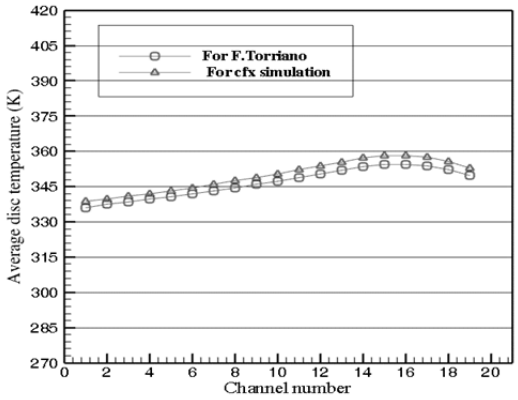
همچنین به‌منظور بررسی دقیق‌تر، مقایسه‌ای بین دمای نقطه داغ دمای میانگین و موقعیت نقطه داغ بین دو روش صورت گرفته است. همان‌طور که در نمودار ۲ نشان داده شده، مقایسه‌ای بین دمای میانگین از سطح دیسک‌ها صورت گرفته که در این حالت نیز خطا کمتر از یک‌درصد است.



شکل ۵) کانتور دما در ناحیه جامد



شکل ٦) میدان سرعت در ناحیه سیال



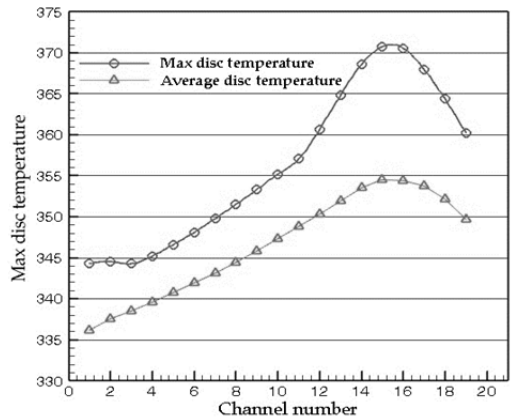
نمودار ۲) مقایسه دمای میانگین دیسک‌ها با کارهای گذشته

با توجه به کانتور دما روی سیم‌پیچ‌ها که در شکل ۵ نشان داده شده است، دما از سیم‌پیچ‌های پایین به سیم‌پیچ‌های بالایی افزایش می‌یابد. چرا که دمای روغن به‌دلیل تلفات حرارتی در داخل سیم‌پیچ‌ها از پایین به بالا افزایش می‌یابد و در قسمت‌های بالایی توانایی روغن برای خنک‌سازی کاهش می‌یابد. اما مشاهده می‌شود که گرم‌ترین سیم‌پیچ بالاترین و به‌عبارتی داغ‌ترین نقطه در دیسک اخر نیست که این امر به‌خاطر حرکت سیال در داخل کانال است.

روغن از ورودی کف وارد کانال می‌شود و از کانال عمودی خارجی بالا می‌رود. اما روغن بعد از فاصله مشخص، وارد مجرای افقی می‌شود و به سمت کانال عمودی داخلی حرکت می‌کند و در ادامه از کانال عمودی داخلی بالا می‌رود. سپس بعد از فاصله مشخص از طریق مجرای افقی به سمت کانال عمودی خارجی حرکت می‌کند. این جابه‌جایی تکرار می‌شود تا اینکه روغن به خروجی می‌رسد که به اصطلاح روغن در داخل کانال، حرکت زیگزاگی خواهد داشت.

عموماً فرض بر این است که ماکزیمم دمای دیسک از کف کانال تا بالای آن افزایش می‌یابد، هر چند که توزیع سراسری از دما روی توزیع جریان روغن تاثیر می‌گذارد. توزیعی از دمای ماکزیمم دیسک‌ها در نمودار ۳ نشان داده شده است.

در نمودار ۳، دمای میانگین سطح هر دیسک نیز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه این دما در کانال ۱۵ رخ داده که نشانگر کمترین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و کمترین اثر جریان خنک‌کننده است. علت اینکه این بیشینه در کانال آخر روی نداده است، می‌تواند ناشی از سرعت بیشتر جریان در کانال‌های نزدیک به خروجی باشد که باعث افزایش ضریب انتقال حرارت در آن نواحی شده است.



نمودار ۳) ماکزیمم و میانگین دمای دیسک‌ها

۴-۲- تحلیل پارامتریک

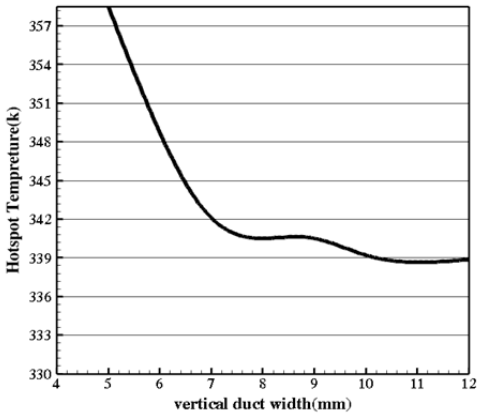
در این مقاله برای تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی از قابلیت محیط نرم‌افزاری ANSYS Workbench برای تحلیل پارامتریک اتوماتیک استفاده شده است. با استفاده از این قابلیت می‌توان برخی از ابعاد مدل هندسی را به‌صورت پارامتر تعریف کرد. با لینک‌کردن مدل هندسی و محیط تولید شبکه در محیط Workbench و ویرایش کدهای متنی مرتبط می‌توان زمینه تولید شبکه اتوماتیک برای هندسه‌های مختلف ایجادشده با تغییر پارامترها را فراهم کرد. از طریق کدهای متنی مذکور می‌توان قیود لازم برای شبکه مانند اندازه شبکه در لایه مرزی و نظایر آن را کنترل کرد. در همین محیط، ماژول حلگر هم با دو ماژول قبلی لینک می‌شود و نهایتاً نتایج تعیین‌شده برای تحلیل به‌صورت اتوماتیک در جدولی در محیط Workbench ذخیره می‌شود.

۴-۲-۱- تحلیل حساسیت عرض کانال عمودی

عرض کانال عمودی در واقع فاصله بین سطح عمودی از دیسک‌ها و دیواره عایق است. این پارامتر هندسی روی توزیع جریان روغن تاثیر می‌گذارد. در این بررسی، عرض کانال عمودی داخلی و خارجی یکسان فرض نشده است. شرایط مرزی دیگر همانند دبی جریان ورودی، چگالی گرما از سیم‌پیچ‌ها و سایر پارامترها ثابت فرض شده است. در جدول ۴ و همچنین نمودار ۴، تغییرات دمای نقطه داغ و موقعیت این نقطه با تغییرات این پارامتر نشان داده شده است.

جدول ۴) نتایج تحلیل حساسیت عرض کانال عمودی

عرض کانال عمودی (میلی‌متر)	دمای نقطه داغ (کلوین)	موقعیت نقطه داغ (برحسب تعداد دیسک)
۵	۳۵۸/۵	۱۱
۷	۳۴۲/۰۸۹	۱۲
۸/۹	۳۴۰/۵۷	۱۳
۱۰	۳۳۹/۲	۱۴
۱۲	۳۳۸/۸۶۷	۱۴



نمودار ٤) دمای نقطه داغ در عرض‌های متفاوت کانال عمودی

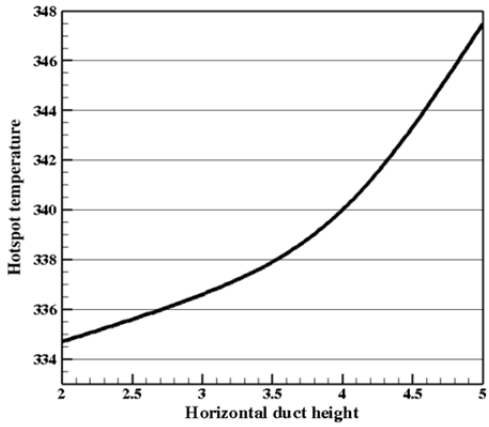
۴-۲-۲- تحلیل حساسیت تغییر ارتفاع مجرای افقی

ارتفاع مجرای افقی در واقع فاصله بین دو دیسک متوالی است. در هندسه دوبُعدی در شکل ۲ این فاصله نشان داده شده است. مطابق با کارهایی که در گذشته انجام گرفته[8]، این پارامتر روی نتایج نهایی تاثیرگذار است. همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده، در این بررسی ۵ نقطه طراحی از فاصله ۲ تا ۷میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

در جدول ۵، دمای نقطه داغ و موقعیت نقطه داغ به‌عنوان تابعی از ارتفاع مجرای افقی محاسبه شده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شده است که وقتی این فاصله از ۲ به ۳میلی‌متر تغییر می‌کند، دمای نقطه داغ تغییرات زیادی ندارد، ولی بعد از آن با تغییرات زیادی مواجه می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ارتفاع مجرای افقی باعث کاهش سرعت سیال و بنابراین باعث کاهش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه باعث افزایش دمای سیم‌پیچ‌ها می‌شود (نمودار ۵).

جدول ۵) نتایج تحلیل حساسیت ارتفاع مجرای افقی

عرض کانال عمودی (میلی‌متر)	دمای نقطه داغ (کلوین)	موقعیت نقطه داغ (برحسب تعداد دیسک)
۲	۳۳۴/۷	۲
۳	۳۳۶/۶	۱۱
۴/۱	۳۴۰/۵۷	۱۳
۵	۳۴۷/۵	۱



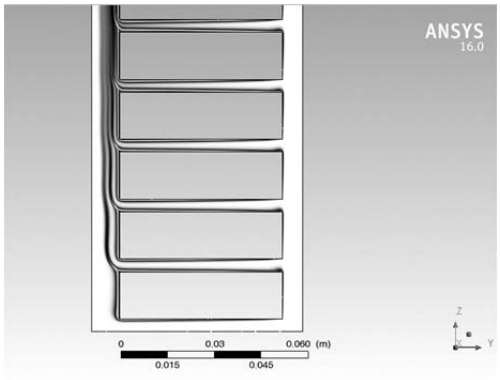
نمودار ۵) دمای نقطه داغ با تغییر عرض کانال عمودی

۴-۳- شکل‌گیری رگه‌های داغ و تاثیر آن در توزیع دما و جریان

از پدیده‌های قابل توجه دیگری که با ملاحظه کانتورهای دما در ناحیه سیال میدان قابل تشخیص بوده، شکل‌گیری رگه‌هایی از جریان با دمای بالا در میدان بوده و این رگه‌های داغ در شکل ۷ قابل مشاهده است.

شکل‌گیری رگه‌های داغ در گذرگاه‌ها به‌دلیل کاهش سرعت جریان در کانال‌های افقی و در نتیجه افت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است. رگه‌های داغ تولیدشده در کانال خارجی (کانال دورتر از مرکز) از طریق گذرگاه افقی وارد کانال عمودی داخلی (کانال نزدیک‌تر به مرکز) می‌شوند که باعث ایجاد گرادیان دمای منفی در جهت شعاعی (معادل y در شکل ۷) می‌شود. همان‌طور که در شکل هم قابل مشاهده است، رگه‌های داغ از گذرگاه‌های افقی عبور می‌کنند و در کانال عمودی داخلی به یکدیگر می‌پیوندند که در نتیجه، یک گرادیان دمای مثبت در جهت ارتفاع ترانس (معادل z در شکل ۷) ایجاد می‌شود. این افزایش دما، نیروی شناوری را نیز در جهت ارتفاع افزایش می‌دهد.

افزایش نیروی شناوری در جهت افزایش ارتفاع در کانال داخلی باعث افزایش سرعت جریان در گذرگاه‌های بالاتر می‌شود که به‌نوبه خود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش می‌دهد. لذا در تعیین نقطه داغ، دو عامل موثر هستند که در تقابل با یکدیگر عمل می‌کنند. افزایش دمای سیال در جهت افزایش ارتفاع و افزایش ضریب انتقال حرارت در گذرگاه‌های افقی بالاتر است و به همین دلیل نقطه داغ در بالاترین گذرگاه رخ نمی‌دهد.



شکل ۷) کانتور دما سیال در گذرگاه‌ها

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدلی عددی براساس روش حجم محدود برای شبیه‌سازی همزمان جریان سیال و انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در ناحیه سیال و هدایت حرارتی در ناحیه جامد یک ترانسفورماتور روغنی توسعه یافت. این ترانس دارای سیم‌پیچ‌های مدل دیسکی است و خنک‌کاری آن توسط یک سیستم خنک‌کاری طبیعی زیگزاگ (دارای واشرهای مسدودکننده جریان) انجام می‌پذیرد.

هدف اول از انجام این کار، ارایه مدلی با دقت مناسب و حجم محاسبات متناسب برای مطالعات پارامتری و بهینه‌سازی بوده است. در این مقاله نشان داده شد که استفاده از مدل متقارن-محوری در هر بخش از ترانس، با فرض وابستگی خواص روغن به دما و همچنین استفاده از توابعی برای ایجاد خواص ناهمگن در سیم‌پیچ‌ها به‌خاطر تغییر جنس، می‌تواند منجر به توسعه مدلی با دقت بسیار خوب و هم‌ارز با مدل‌های ارایه‌شده در ادبیات فنی موجود شود که البته از حجم محاسباتی بسیار متعادلی نیز برخوردار است.

هدف دوم، ایجاد بستری برای مطالعات اتوماتیک پارامتری براساس محیط نرم‌افزاری ANSYS Workbench بوده است. نتایج ارایه‌شده نشان می‌دهد که محیط مذکور دارای قابلیت مناسبی برای انجام این گونه تحلیل‌ها است و با نوشتن کدهای متنی مختصری می‌توان کل فرآیند را به‌صورت اتوماتیک انجام داد که برای مطالعات بهینه‌سازی از مزیت قابل توجهی برخوردار است.

مطالعه پارامتری انجام‌شده برای دو پارامتر پیشنهادی در این مقاله، اثرات قابل توجه تغییرات آنها بر دما و موقعیت نقاط داغ را نشان می‌دهد که براساس آن می‌توان راهکارهایی برای طراحی بهینه این خانواده از ترانس‌ها پیشنهاد نمود. البته در قدم‌های بعد بایستی اثر برخی از محدودیت‌های این مطالعه مانند موقعیت و هندسه واشرها و نگهدارنده‌ها بررسی شود. همچنین برای رسیدن به معیارهایی برای طراحی لازم است که مطالعات پارامتری روی پارامترهایی مستقل از ابعاد ترانس انجام پذیرد تا نتایج آن برای اندازه‌های مختلف قابل استفاده باشد. این موضوعات، محور پژوهش‌های در حال انجام نویسندگان است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان لازم می‌دانند از دانشکده فنی دانشگاه الزهرا(س) که منابع محاسباتی لازم را در اختیار این پژوهش قرار دادند، قدردانی نمایند.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: نویسندگان بدین‌وسیله اعلام می‌دارند که در خصوص انتشار نتایج حاصل از این پژوهش هیچ تعارض منافعی با هیچ طرف سومی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: فهیمه حامدی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۸۰%)؛ حامد مقتدری (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۰%)

منابع مالی: از منابع مالی خاصی استفاده نشده است.

۶- پی‌نوشت

T_{max}	ماکزیمم دمای سیم‌پیچ (K)
T_{oil}	دمای روغن (K)
R_i	شعاع داخلی دیسک (m)
R_{ic}	شعاع داخلی سیلندر (m)
e	ضخامت (m)
H_{duct}	طول محوری از کانال افقی (m)
H_{disc}	طول محوری از دیسک (m)
$L_{ext.duct}$	طول شعاعی از کانال خارجی (m)
$L_{int.duct}$	طول شعاعی از کانال داخلی (m)
hc	طول محوری از هادی مس (m)
h	ضریب انتقال گرما ($W\ m^{-2}K^{-1}$)
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت ($J\ kg^{-1}K^{-1}$)
k	ضریب هدایت گرما ($W\ m^{-1}K^{-1}$)
Pr	عدد پرانتل
Gr	عدد گراشف
m	دبی جریان ($kg\ s^{-1}$)
r	مختصات شعاعی (m)
z	مختصات محوری (m)
p	فشار (pa)
T	دما (℃)
L	طول مشخصه (m)

علایم یونانی

μ	لزجت دینامیک ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ν	ویسکوزیته سینماتیک (m^2s^{-1})
ρ_{ref}	چگالی مرجع (kgm^{-3})

زیرنویس‌ها

P	کاغذ
c	مس
f	سیال

منابع

1- Jiao Y. CFD study on the thermal performance of transformer disc windings without oil guides [Dissertation]. Stockholm: KTH vetenskap och konst; 2012.

2 Sturday A, Peter EA, Omokwudu OB, Chukwujekwu AD, Olumayowa IS, Patricks FO. Thermal investigation and heat flux analysis of a cascaded transformer in the tropics. Scholars Journal of Engineering and Technology. 2017;5(7):317-328.

3- Lecuna R, Delgado F, Castro P, Ortiz A, Fernández I, Renedo CJ. Thermal-fluid characterization of alternative liquids of power transformers: A numerical approach. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015;22(5):2522-2529.

4- Coddé J, Van der Veken W, Baelmans M. Assessment of a hydraulic network model for zig-zag cooled power transformer windings. Applied Thermal Engineering, 2015;80:220-228.

5- Marko RM. Thermal modelling of a natural-convection-cooled, oil-immersed distribution transformer [Dissertation]. Winnipeg: University of Manitoba; 1997.

6- Rahimpour E, Barati M, Schäfer M. An investigation of parameters affecting the temperature rise in windings with zigzag cooling flow path. Applied Thermal Engineering. 2007;27(11-12):1923-1930.
7- Torriano F, Chaaban M, Picher P. Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type transformer winding. Applied Thermal Engineering. 2010;30(14-15):2034-2044.
8- Torriano F, Picher P, Chaaban M. Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding. Applied Thermal Engineering. 2012;40:121-131.
9- Chereches NC, Chereches M, Miron L, Hudisteanu S. Numerical study of cooling solutions inside a power transformer. Energy Procedia. 2017;112:314-321.
10-Zhang J, Li X. Oil cooling for disk-type transformer windings-part 1: Theory and model development. IEEE Transactions on Power Delivery. 2006;21(3):1318-1325.
11- Ferziger JH, Peric M. Computational methods for fluid dynamics. 2nd Edition. Heidelberg; Springer; 2003.