

شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل تئوری جریان نانوسیال بر پایه روغن ترانسفورماتورهای قدرت به منظور بهبود عملکرد خنک‌کاری ترانس

سید امیرحسین زهمیان* (دانشیار)

سهیل رضازاده مفردنیا (کارشناس همکار)

محمدرضا بازوکی (کارشناس همکار)

پژوهشگاه مواد و انرژی، گروه پژوهشی انرژی خورشیدی

محمد بازوکی (استاد)

پژوهشگاه مواد و انرژی، گروه پژوهشی محیط زیست

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۹۳-۱۰۶، (پژوهشی)

در این مقاله، با بررسی‌های جامع کتابخانه‌یی، اطلاعات قابل قبولی در راستای ایجاد ناو روغن بهینه در محدوده عملیاتی به دست آمده است. هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی همزمان پدیده‌های انتقال، شرایط سیالات در حضور نانوذرات و اصول القای الکترومغناطیسی و عایقی الکتریکی در داخل ترانسفورماتورهای توزیع یا قدرت انجام شده است. نتایج نظری مستخرج از مراحل شبیه‌سازی بر روی نمونه‌های طراحی شده و اطلاعات جامع برای نانوذرات هیبریدی و تأثیرپذیری آنها در فرایند آزمایشگاهی و در پایان، ارائه راهکارهای بهبود خواص کاهش یافته در ترانسفورماتورهای روغنی از نوآوری‌های اساسی در مطالعه می‌باشد. به این ترتیب، برای تعیین روش پژوهش، با توجه به بررسی‌های انجام شده، نانوذرات CuO ، TiO_2 ، Al_2O_3 ، SiO_2 و MWCNT به صورت ناو ساختارهای هیبریدی معلق در روغن ترانس در نظر گرفته شده است که در واقع بیشترین کاربرد را در تحقیقات به خود اختصاص داده‌اند. علاوه بر تعیین نوع نانوذرات منتخب، از دیگر دستاوردهای مهم این پژوهش می‌توان به یافتن بهترین ترکیب برای افزایش هدایت حرارتی و اصول هدایت الکتریکی و شاخص‌های استاندارد صنایع تولید ترانسفورماتورها اشاره کرد. برای آغاز مراحل آزمایشگاهی، بهترین و بهینه‌ترین دستورالعمل استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌یی عملکرد ترانسفورماتور در زمان استفاده از نانوروغن‌های مختلف می‌باشد که در گام بعدی، این شبیه‌سازی در نرم‌افزار صورت گرفته است تا بتوان نانو ذرات مختلف را به صورت دقیق اولویت‌بندی کرد.

واژگان کلیدی: روغن ترانسفورماتور، نانوسیال بر پایه روغن، نانوذرات هیبریدی، انتقال حرارت، خنک‌کاری.

azamzamian@merc.ac.ir
srezazadeh69@gmail.com
pazoukim.reza@gmail.com
m.pazouki@merc.ac.ir

۱. مقدمه

باقیمانده و فرکانس آن نیز تغییر نمی‌کند و فقط مقادیر ولتاژ و جریان در اولیه و ثانویه متفاوت خواهد بود. ترانسفورماتورها نه تنها به عنوان اجزاء اصلی سیستم‌های انتقال و پخش حامل‌های انرژی مطرح هستند، بلکه در تغذیه مدارهای الکترونیکی و کنترل، یکسوسازی، اندازه‌گیری و کوره‌های الکتریکی نیز نقش مهمی را ایفا می‌کنند. ترانسفورماتورها یکی از پرکاربردترین ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده در صنعت هستند. ترانسفورماتورها را می‌توان از جهات مختلف دسته‌بندی کرد. یکی از انواع

ترانسفورماتورها تجهیزاتی هستند که انرژی الکتریکی را در یک سیستم جریان متناوب از یک مدار به مدار دیگر منتقل می‌کنند و ولتاژ کم را به ولتاژ زیاد و بالعکس تبدیل می‌نمایند. بر خلاف ماشین‌های الکتریکی که انرژی الکتریکی و مکانیکی را به یکدیگر تبدیل می‌کنند، در ترانسفورماتورها، انرژی به همان شکل الکتریکی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۹/۲۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۴، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

استناد به این مقاله:

زهمیان، سید امیرحسین، رضازاده مفردنیا، سهیل، بازوکی، محمدرضا، و بازوکی، محمد، ۱۴۰۲. شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل تئوری جریان نانوسیال بر پایه روغن ترانسفورماتورهای قدرت به منظور بهبود عملکرد خنک‌کاری ترانس. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۹۳-۱۰۶. DOI:10.24200/J40.2023.61526.1662

این دسته‌بندی‌ها که در واقع موضوع مطالعه حاضر است، نحوه خنک کردن آنها است. بر این اساس، ترانسفورماتورها به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱. ترانس‌های روغنی؛

۲. ترانس‌های هواخنک یا خشک (رزینی).

عواملی مانند مقاومت الکتریکی سیم پیچ‌ها، تلفات پسماند و عوامل متعدد دیگر می‌توانند موجب اتلاف حرارتی در ترانس شوند. در ترانسفورماتورهای روغنی، برای انتقال حرارت ایجاد شده در داخل ترانسفورماتور به محیط اطراف، از روغن به عنوان واسطه حرارتی استفاده می‌شود. در این راستا، حرارت قطعات به روغن منتقل شده و این حرارت از طریق جداره‌های تانک که با محیط پیرامون در ارتباط است، به بیرون انتقال می‌یابد. در طی این فرایند، تا زمانی که مقدار گرمای ایجاد شده برابر با مقدار گرمای انتقالی توسط روغن شود، روغن شروع به گرم شدن می‌کند. در ترانسفورماتورهای قدرت، مسئله انتقال حرارت و خنک نگه داشتن ترانسفورماتور از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر دمای روغن ترانسفورماتور بیش از حد افزایش یابد، علاوه بر اینکه اجزای ترانسفورماتور آسیب می‌بینند و عملکرد آنها کاهش می‌یابد، اگر دمای آن از حد معینی فراتر رود، ترانسفورماتور به‌طور کامل از مدار خارج خواهد شد. بنابراین، تلاش برای بهبود عملکرد حرارتی ترانسفورماتور موجب بالا رفتن بازده، افزایش طول عمر و کوچک شدن آن می‌شود که این مسائل به نوبه خود باعث کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود. یکی از روش‌های اساسی انتقال حرارت، استفاده از نانوسیال بر پایه روغن ترانسفورماتور است که با افزودن نانوذرات به درون روغن ترانسفورماتور و سپس پراکندگی و پایدارسازی نانو روغن حاصل به دست می‌آید. به‌منظور افزایش عملکرد انتقال حرارت در روغن ترانسفورماتور، از افزایش هدایت حرارتی روغن استفاده می‌شود. محیط‌های انتقال حرارت در روغن ترانسفورماتور خالص، از ضریب هدایت حرارتی کمتری نسبت به فلزات پایه، اکسیدهای فلزی و ترکیبات بر پایه کربن برخوردارند. برای افزایش هدایت حرارتی از تعلیق و پراکندگی کامل نانوذرات جامد با اندازه نانومتری در سیال پایه روغن خالص استفاده می‌شود.^[۱]

در دهه‌های گذشته، پژوهش‌هایی در رابطه با انتقال حرارت جابجایی با استفاده از سوسپانسیون پایدار ذرات جامد در ابعاد نانومتری در سیالات پایه خالص صورت گرفته است. بررسی‌های اخیر در رابطه با نانوسیال‌ها، که معمولاً به چنین سوسپانسیون‌هایی گفته می‌شود، نشان می‌دهد که نانوذرات معلق به‌طور قابل توجهی خواص انتقال و ویژگی‌های انتقال حرارت سوسپانسیون را تغییر می‌دهند.^[۲]

به‌عنوان مثال، صادق مقلانو و همکاران ایشان در پژوهشی جدید نشان دادند که پراکنده‌سازی نانوذرات اکسید آلومینیوم با غلظت ۳/۰ درصد وزنی درون روغن عایق و میدان الکتریکی قوی ۵۱/۱۵ kV می‌تواند انتقال حرارت را تا ۵۲ درصد بهبود بخشد که این امر در عملیات خنک‌کاری ترانسفورماتورهای روغنی می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد.^[۳]

قدیمی‌ترین پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، کلاس جدیدی از سیالات دی‌الکتریک کلوتیدی با اصلاح فروسیال‌های مبتنی بر روغن معدنی برای افزایش عملکرد دی‌الکتریک را توسعه داده است. در ترکیب بهینه، عایق کلوتیدی دارای قدرت شکست جریان متناوب AC با فرکانس ۶۰ هرتز نزدیک به روغن سیال حامل^۱ است، در حالی که مقاومت ولتاژ ضربه‌ی آن در هندسه سوزن به کره بهبود یافته است. برای سوزن مثبت، ولتاژ شکست ضربه‌ی آن تا ۵۰ درصد در مقایسه با روغن معدنی خشک و گاززدایی شده توسط اکسون یونیولت ۶۰ افزایش یافته است. برای سوزن منفی، مقدار شکست نزدیک به حامل روغن باقی می‌ماند، به نحوی که این دو

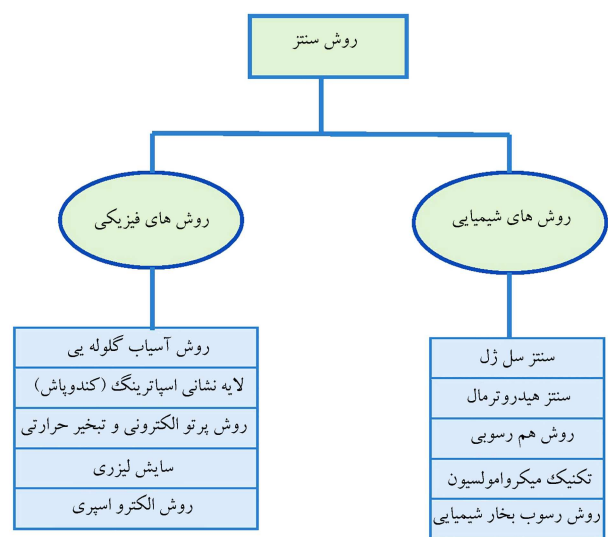
مقدار در واقع برابر هستند. ولتاژ شروع تخلیه جزئی^۲ در جریان متناوب با فرکانس ۶۰ هرتز، ۵۰ ولت بر ثانیه بهبود یافته، است. از سوی دیگر، هندسه سوزن به کره نشان داده که تا ۳۰ درصد افزایش یافته است. به این ترتیب، عایق کلوتیدی جدید، تغییر کمی در مقاومت الکتریکی و ویسکوزیته سینماتیکی پس از پیری سریع در درجه حرارت ۱۸۵ درجه سانتیگراد نشان داده است.^[۴] نانوسیالات به‌عنوان یک جایگزین برجسته و امیدوارکننده دی‌الکتریک مایع در کاربردهای صنعتی ظهور کرده‌اند. برای اولین بار، کاربرد ورق‌های گرافن آمورف^۳ یا نانوسیال‌های تزریق شده صورت پذیرفت که قدرت شکست دی‌الکتریک و خواص حرارتی بسیار تقویت شده‌ی آن ارائه داده است. پراکندگی همگن پایدار، بدون سورفکتانت و رقیق یک نانوماده دی‌الکتریک دو بعدی جدید با ورق‌های گرافن آمورف در روغن ترانسفورماتور توسط نانو پرکننده‌هایی با غلظت کمتر حدود ۰/۱-۰/۱۲ درصد وزنی انجام شده است. این نوع نانوسیالات به‌طور هوشمندانه مدیریت حرارتی و الکتریکی با عملکرد و کارایی مؤثر را با مقاومت بالا و تلفات اندک در مقایسه با روغن پایه تأمین خواهد کرد. هدایت حرارتی بالا، عملکرد دی‌الکتریک برتر، همراه با روش سنتز کم هزینه، باعث شده است تا این نانوسیالات هیبریدی یا ترکیبی را به‌عنوان یک درخواست جدید برای کاربردهای واقعی در ترانسفورماتورهای الکتریکی قدرت و همچنین در سیستم‌های مدیریت انرژی حرارتی معرفی و فعال نماید.^[۵] داده‌های آماری موجود از خرابی ترانسفورماتورها نشان می‌دهد که میانگین عمر ترانسفورماتورها حدود ۱۸ سال است که تقریباً نیمی از عمر برای آنها یعنی ۳۶ الی ۴۴ سال کاملاً قابل پیش بینی است و معادل ۱/۳ ترانسفورماتورهای فشار قوی یا قدرت به دلیل خرابی عایق یا انتقال حرارت از بین رفته است.^[۶] در حال حاضر در نیروگاه‌ها و یا سیستم‌های تأمین برق غالباً از دو نوع ترانسفورماتور استفاده می‌شود که عبارتند از ترانسفورماتورهای نوع خشک و ترانسفورماتورهای نوع روغنی و در میان آنها ترانسفورماتورهای روغنی بیشترین کاربرد را برای سیستم توزیع دارند. مکانیزم شکست پیشنهادی روغن ترانسفورماتور توسط نانو پرکننده‌ها^۴ ارائه شده است. مکانیسم‌های پیشنهادی بر اساس نتایج آجوجاج الکتریسیته ناشی از تجمع بار بر روی سطوح نانوذرات در مواجهه با میدان الکتریکی خارجی است. عوامل مختلف مؤثر بر قدرت شکست روغن ترانسفورماتور توسط نانو پرکننده‌ها در نظر گرفته شده است. این عوامل عبارتند از دمای روغن، نوع، غلظت و اندازه نانو پرکننده‌ها. بنابراین، قدرت شکست روغن ترانسفورماتور نانو پر شده به‌صورت تجربی در دماهای ۳۵، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد ارزیابی می‌شود تا شرایط عملیاتی واقعی از حالت بدون بار تا شرایط بار سنگین شبیه سازی شده است. انواع مواد نانو پرکننده مورد تأیید شامل: SiO_2 ، TiO_2 و ZrO_2 با در نظر گرفتن اندازه ذرات به‌طور یکسان برای هر کدام ۲۵ نانومتر هستند. انواع مواد انتخاب شده دارای ضرایب نسبی متفاوت به میزان ۴/۳، ۷۰ و ۱۰۰ به ترتیب برای SiO_2 ، ZrO_2 و TiO_2 هستند. سطوح غلظت مواد نانو پرکننده مورد مطالعه ۵/۰، ۱۰/۰، ۲۰/۰ و ۴۰/۰ گرم بر لیتر می‌باشد. همچنین، تأثیر اندازه ذرات بر قدرت شکست با در نظر گرفتن نانوذرات TiO_2 با اندازه ذرات ۲۵ نانومتر و ۱۰۰ نانومتر در سطوح غلظت اتخاذ شده مورد مطالعه قرار گرفته است. تست مقاومت شکست بر روی تمام نمونه‌های آماده شده بر اساس روش آزمون استاندارد ASTM D1۶۹۳ برای تمام نمونه‌های آماده شده انجام شده است. به‌طور کلی نکات به شرح توضیحات ذیل نتیجه‌گیری شده است:

- نوع مواد پرکننده نانو تأثیر به‌سزایی بر ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور نانو پر شده دارد. مواد با گذردهی بالاتر منجر به افزایش بیشتر ولتاژ شکست نانوسیالات می‌شوند؛

در روش تک مرحله‌ای، نانوذرات آماده شده و در سیال پایه پراکنده و کاملاً می‌شوند. از مراحل مختلف مانند خشک کردن تبخیری، ذخیره‌سازی و حمل و نقل به منظور افزایش پایداری ذرات و همچنین به حداقل رساندن تجمع یا به هم چسبیدن نانوذرات اجتناب می‌شود. با این حال، این روش بر هزینه است و نمی‌توان آن را در مقیاس بزرگ تولید کرد.^[۱۱] در روش دو مرحله‌ای، ابتدا نانوذرات با استفاده از روش‌های شیمیایی یا فیزیکی با هم یکی می‌شوند. سپس، نانوذرات خشک با کمک روش‌های مختلف مخلوط کردن مانند آسیاب گلوله‌ای، اختلاط با برش بالا،^۶ اختلاط اولتراسونیک یا مغناطیسی به‌طور کامل در سیال حامل معلق و پراکنده می‌شوند. این فرایند شامل مراحل زیادی است، بنابراین شناس چسبیدن ذرات به یکدیگر بیشتر است اما هزینه تولید کاهش می‌یابد و می‌توان در مقیاس بزرگ از آن بهره برد. در همین راستا، محققان مختلف این روش را ترجیح می‌دهند. برای جلوگیری از چسبیدن ذرات به یکدیگر، ته‌نشینی و افزایش پایداری ذرات از انواع مختلفی از سورفکتانت‌ها یا مواد فعال‌کننده سطحی استفاده می‌شود.^[۱۲] یکی از سورفکتانت‌های رایج اسید اولئیک و سایر سورفکتانت‌های مورد استفاده عبارتند از: اسید استئاریک، پروپیلن گلیکول، سوربیتان مونولات، اسپن ۸۰ و سدیم دودسیل بنزن سولفونات. پراکندگی مغناطیسی با زاویه کوچک نوترون‌های غیرقطبی و قطبی شده از فروسیال‌ها (مگنتیت پوشیده شده توسط اسید اولئیک در بنزن) تجزیه و تحلیل می‌شود. در این حالت، یک همبستگی پیچیده در ساختار مغناطیسی مشاهده می‌شود که در اندازه طولی بیش از اندازه ذرات اتفاق می‌افتد و ساختار پوسته ماندی دارد. علاوه بر آن، هیچ همبستگی خاصی بین ذره‌ی فضای در ساختار هسته‌ی تشخیص داده نمی‌شود. ویژگی‌های ساختار مغناطیسی مگنتیت/اسید اولئیک/فروسیال بنزن که با استفاده از پراکندگی زاویه‌ی کوچک نوترون‌های غیرقطبی و قطبی شده تعیین می‌شود، نشان‌دهنده حالت یا شرایط مغناطیسی کردن موضعی پیچیده در سیال است. سه اندازه مغناطیسی مشخصه برای سیالات با غلظت مگنتیت در محدوده ۱ الی ۱۰ درصد حجمی مشاهده شده است. به این ترتیب، آنها با فواصل طولی ۲ الی ۵، ۵ الی ۲۰ و ۲۰ الی ۳۰ نانومتر مطابقت دارند.^[۱۳] از ملاحظات اصلی و اساسی این مطالعه می‌توان به این نکته اشاره کرد که تاکنون چندین پژوهشگر گزارش کرده‌اند که استفاده از نانوذرات مختلف در روغن ترانسفورماتورهای توزیع یا قدرت، موجب بهبود خواص حرارتی و دی‌الکتریک شده و می‌تواند در مقایسه با سیال پایه همزمان به‌عنوان بهترین عایق و خنک‌کننده عمل کند. به‌عنوان مثال، نانوسیال بر پایه روغن ترانسفورماتور شامل نانوذرات اکسید زیرکونیوم^۷ و اکسید سریم^۸ با غلظت نانوذرات ۵/۰ درصد وزنی به روش دو مرحله‌ی سنتز شده و افزایش ولتاژ شکست را نشان داده است.^[۱۴] از طرف دیگر، روش دو مرحله‌ی برای سنتز اکسید تیتانیوم^۹ و اکسید آلومینیوم با آلومینا^{۱۰} با نسبت‌های وزنی مختلف ۰/۱، ۰/۴، ۰/۷ و ۰/۱ گرم بر لیتر و همچنین مواد فعال‌کننده سطحی یا سورفکتانت برای نشان دادن بهبود یا افزایش قدرت شکست استفاده شده است.^[۱۵] نیاریکا بارواه و همکاران، نانوذرات نیتريد بور شش ضلعی لایه لایه شده^{۱۱} را سنتز کرده و در روغن ترانسفورماتور خالص و همچنین روغن گیاهی با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵ و ۰/۱ درصد و همچنین ۰/۱ درصد وزنی پراکنده کرده‌اند که افزایش قدرت دی‌الکتریک را نشان داده است.^[۱۶] محمود حسین و همکاران، از غلظت‌های مختلف فریت نیکل مگنتز نانوکریستالی یعنی نانوکریستال $Mn_{0.7}Ni_{0.8}Fe_{0.2}O_4$ استفاده کرده‌اند و افزایش قدرت دی‌الکتریک را برای تمام غلظت‌ها تعیین کرده‌اند. با این حال، غلظت ۰/۴ گرم بر لیتر افزایش بیشتری در ولتاژ شکست حدود ۴۲/۳ درصد نسبت به سایر غلظت‌ها نشان داده است. به این ترتیب، ارزیابی‌های آزمایشگاهی تأیید کرده است که نانوکریستال فریت

- افزایش دمای روغن منجر به افزایش درصد افزایش ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور نانو پر شده تا دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود. سپس، کاهش ولتاژ شکست رخ می‌دهد؛
- کاهش اندازه نانوذرات منجر به افزایش بیشتر ولتاژ شکست نانوسیال روغن ترانسفورماتور می‌شود؛
- بر اساس ساز و کار پیشنهادی، دو عامل اساسی موثر بر قدرت شکست وجود دارد. این عوامل عبارتند از: ۱. به دام انداختن بار و ۲. اعوجاج میدان الکتریکی. به دام انداختن شارژ، قدرت شکست نانوسیال روغن ترانسفورماتور را افزایش می‌دهد و در سطوح پایین‌تر غلظت نانو پراکنده غالب است؛
- اعوجاج میدان الکتریکی قدرت شکست را کاهش می‌دهد و اثر آن در سطوح غلظت بیشتر ظاهر می‌شود.^[۷]

فاینمن^۵ مفهوم نانوفتواری را در سال ۱۹۵۹ ارائه کرده است.^[۸] تاکنون این مفهوم در چندین شاخه علم و به‌طور خاص در علوم مواد، فیزیک و مهندسی اجرا شده است. نانوفتواری به‌منظور بهبود خاصیت مواد از ایجاد تغییرات در سطح مواد و در مقیاس نانو بهره می‌برد. مفهوم مشابهی در سیالات دی‌الکتریک وجود دارد که به منظور بهبود خواص حرارتی و دی‌الکتریک مایعات از این مواد نانو بهره گرفته می‌شود. نانوسیالات، ذرات با اندازه نانو هستند که به‌طور همگن در سیال پایه معلق هستند و توسط چوبی و ایستمن در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شده است.^[۹] از نظر کاربردی، انواع مختلفی از نانومواد تاکنون به روش‌های سنتزی تولید و مشخصه‌یابی شده‌اند. البته در این میان نانوذرات اکسیدهای فلزی بسیار مهم هستند و می‌توانند در زمینه‌های مختلف مانند سیال‌کاری و به ویژه به‌عنوان فعالیت روغن ترانسفورماتور کاربرد داشته باشند. در بین این نانوذرات اکسیدی نیز CuO ، TiO_2 ، ZnO ، Fe_2O_3 ، SnO_2 جزء برترین‌ها هستند. نسبت مساحت سطح به حجم این نانوساختارها بسیار بزرگ بوده و لذا می‌توانند مورد بهره‌برداری قرار گیرند. تاکنون روش‌های زیادی برای تهیه این نانوذرات اکسیدی گزارش شده است. با این حال، روش رایج در صنعت مواد، سل - ژل یا تکنیک شیمی نرم است. به‌طور کلی، برای دستیابی به این روش نیاز به نیترات یا استات‌های فلزی و چند عامل پوشش دهنده مطابق شکل ۱ است.^[۱۰]



شکل ۱. روش‌های متداول برای تهیه نانوذرات.

نیکل منگنز و یرگی های دی الکتریک روغن ترانسفورماتور را به خوبی بهبود داده است. [۱۷]

با توجه به موارد اشاره شده، در مطالعه دیگری که توسط زینالی هریس و همکاران صورت گرفته است، ابتدا و در گام نخست، نانوذرات حاوی نانولوله های کربنی چنددیواره (MWCNT) که با نانوذرات اکسید تیتانیوم (TiO_2) آغشته شده و تحت تأثیر آن قرار گرفته اند سنتز شده و با اسید اولئیک اصلاح شدند و مواد سنتز شده با استفاده از آنالیزهایی از جمله FTIR, XRD, SEM, EDX تأیید شده اند. سپس، تأثیر نانوسیال های روغن ترانس/نانولوله های کربنی چنددیواره همراه با نانوذرات اکسید تیتانیوم با درصد های جرمی مختلف به صورت نانوذرات هیبریدی و توان های ورودی مختلف شامل: $5/50$ ، $6/75$ ، $10/124$ وات بر حسب انتقال حرارت جابجایی طبیعی، عدد ناسلت، عدد رایلی و عدد گراشوف و در شرایط جریان هوای آزاد ارزیابی شده است. همچنین، تأثیر درصد های جرمی مختلف نانوذرات هیبریدی بر مقدار ولتاژ شکست بر حسب کیلوولت و ویژگی های ترموفیزیکی روغن ترانسفورماتور، مانند ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه حجمی، مقاومت و انتشار مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، اثرات جریان هوای اجباری که با دو دمنده در اطراف سیستم آزمایشگاهی نصب شده، بر روی انتقال حرارت روغن ترانسفورماتور بررسی شده است. [۱۸] در پژوهشی دیگر و به منظور ملاحظه و تأیید موضوع استفاده از نانوذرات پایه کربنی، اثر افزودن نانوذرات حاوی نانولوله های کربنی چنددیواره غیرکووالانسی عامل دار و نانولوله های کربنی چند جداره هیدروکسیله شده با عامل OH (MWCNTs-OH) به عنوان نانو مواد افزودنی برای بهبود خواص حرارتی روغن ترانسفورماتور خالص و نیز بر روی ولتاژ شکست در داخل یک محفظه مستطیلی مطالعه شده است. نکته نوآورانه پژوهش مذکور، استفاده از نانولوله های کربنی چند جداره هیدروکسیله و غیرکووالانسی عامل دار شده کووالانسی در روغن ترانسفورماتور است و دلیل انتخاب این نانوذرات رسانایی حرارتی ذاتی بالا نسبت به سایر نانوذرات می باشد. بین هر دو نانوسیال مورد مطالعه، عملکرد حرارتی و الکتریکی MWCNTs-OH عامل دار کووالانسی به دلیل بیشترین افزایش ضریب انتقال حرارت انتقال آزاد بهتر گزارش شده است و استفاده از تکنیک مربوط به نانولوله های کربنی عامل دار کووالانسی موجب شد که به ترتیب $23/26$ و $8/30$ درصد بهبود در انتقال حرارت حاصل شود. همچنین، با اندازه گیری ولتاژ شکست مشخص شد که نانولوله های کربنی عامل دار کووالانسی با غلظت $1/000$ درصد وزنی کمترین کاهش را نسبت به سیال پایه داشته و برابر با $6/55$ کیلوولت بوده و به دلیل استاندارد مشخص شده برای خاصیت ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور که باید بین 30 الی 70 کیلوولت باشد، عملکرد بسیار مناسبی را نشان می دهد. از طرف دیگر، نتایج نانوسیال روغن ترانسفورماتور با عامل کووالانسی عملکرد حرارتی بهتری نسبت به روغن خالص دارد که از افزایش درجه حرارت ترانسفورماتور جلوگیری می کند و همچنین می تواند به عنوان عایق الکتریکی در ترانسفورماتورها استفاده شود. [۱۹]

لازم به ذکر است که با توجه به پژوهش های صورت گرفته از گذشته تا کنون، مشخص می شود که استفاده از نانوذرات مختلف و ترکیبی در سیال های غیر به طور گسترده ای مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی دیگر، خواص حرارتی و جریان سیالی نانوسیال ترکیبی اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم (پایدار درون آب) جهت مشاهده اثر خنک کنندگی مکانیکی این نانوسیال بررسی شده و نتایج این پژوهش نشان می دهد که به طور کلی استفاده از نانوذرات ترکیبی یا هیبریدی سبب بهبود خواص حرارتی شده و نانوسیال حاوی دو نانوذره هیبریدی خواص حرارتی مطلوب تری را نسبت به نانوسیال تک ذره اکسید تیتانیوم و نانوسیال تک ذره اکسید آلومینیوم داشته است. [۲۰]

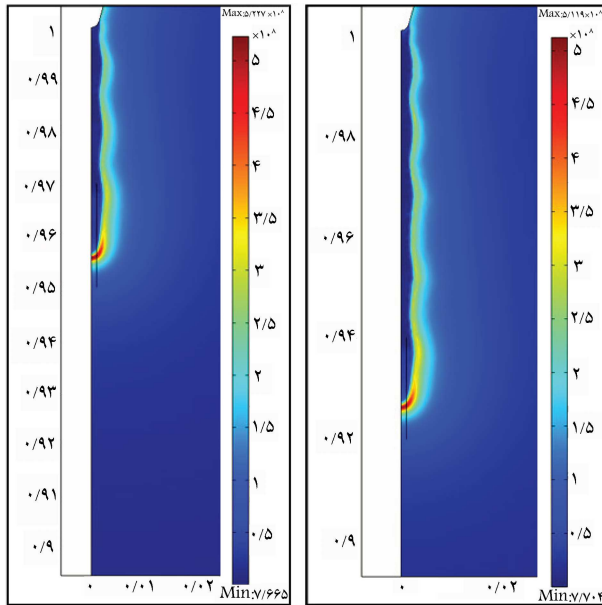
با توجه به شرایط مورد بررسی اولیه، هدف پژوهش حاضر، انتخاب بهترین نوع نانوذره و بهترین غلظت آن برای پایداری در روغن ترانس می باشد که منجر به افزایش بیشتر بازده ترانسفورماتور می گردد. با استناد به بررسی های کتابخانه ای، لیست کاملی از نانوذرات مؤثر که عملکرد عایقی و مشخصه های انتقال حرارت در روغن پایه در شرایط مختلف و در ترانسفورماتورها به طور تجربی گزارش شده اند، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. مسئله پایداری در نانوسیالات هیبریدی بسیار مهم است و باید در نظر گرفته شود. نانوذرات آب دوست یا آب گریز برای انتخاب نانوذرات یکدست حائز اهمیت است. با توجه به هدایت حرارتی بالای نانولوله های کربنی چنددیواره (MWCNT)، یکی از نانوذرات به کار رفته در تهیه نانوسیال هیبریدی نانوروغن ترانس مورد مطالعه می باشد. روش تعیین نانوساختار بهینه هیبریدی نانوذرات به دلیل اهمیت سایر ویژگی ها و بر اساس روش مبتنی بر پنج گام اساسی به منظور دستیابی به بالاترین بازدهی با تهیه سوسپانسیون مختلف از نانوذرات و سیال پایه لحاظ و تعیین شده است. این پنج گام عبارتند از: ۱. احصاء، طبقه بندی شهودی ۲. بررسی معنی دار بودن تغییرات ۳. اصل برهمنهی ۴. تعیین بهترین نوع و ترکیب ۵. ارزیابی بهینه.

۲. مبانی نظری

تاکنون تلاش های گسترده ای در زمینه بهبود عملکرد ترانسفورماتورهای قدرت و بهبود عملکرد حرارتی روغن های ترانسفورماتورها صورت گرفته است و تولیدکنندگان این دست از روغن ها تلاش های زیادی را جهت بهبود خواص عایقی، خنک کاری، ساختاری و سایر خواص روغن انجام داده اند. در همین راستا می توان به مواردی از قبیل ساخت مواد مکمل افزودنی 12 و تولید روغن های دارای مواد آنتی اکسیدان 13 اشاره کرد که همگی برای کاهش رسوب گذاری، تشکیل لجن و افزایش عمر روغن مورد استفاده قرار گرفته اند. از طرف دیگر، همان طور که مطرح شد، تلاش این است تا بر اساس اصول محاسباتی و تکیه به معادلات علمی بتوان راهکاری در بهبود تولید نانوروغن ها پیدا کرد تا اثرگذاری نامواد مختلف را با توجه به صرفه اقتصادی ارائه داد. نکته حائز اهمیت در این مطالعه این است که در ایران تاکنون از روغن های بدون افزودنی و معمولی استفاده می شود که بخصوص در مناطق گرم جنوبی بسیار مشکل زا می باشد و مانع بهره وری بیشتر از ترانسفورماتورها می شود. شرکت های معتبر در ارائه محصولات روغن ترانسفورماتور مانند ایران ترانسفو و شرکت پالایش روغن های صنعتی زنگان نیز تاکنون داده های قابل قبولی برای روغن ترانسفورماتورها با مواد افزودنی ارائه نکرده اند. طبق پژوهش های صورت گرفته، اثرگذاری مواد و نانوذرات مختلف در تحقیقات بر پایه آزمایشگاهی و شبیه سازی های محاسباتی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. این پژوهش ها اولویت نحوه شبیه سازی و انتخاب نانوذرات را به طور مؤثری مورد تأثیر قرارداد و خط مشی عملی را مشخص کرده است. به طور کلی، نانوذرات برای استفاده در روغن های ترانسفورماتور و تأثیرگذاری به دو دسته اصلی نانوذرات پرکاربرد (شامل 12 نانوذره) و نانوذرات تلفیقی/ترکیبی/هیبریدی تقسیم می شوند که به صورت ترکیب دوتایی و سه تایی مورد استفاده قرار می گیرند و باعث بهبود چشمگیر عملکرد روغن (به خصوص شرایط حرارتی و الکتریکی) می شوند. این نانوذرات به صورت تفکیکی در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده اند.

۳. روش تحقیق

همان طور که از مراحل طی شده مشخص است، انتخاب ایده آل ترین نانوذرات بسیار



شکل ۲. توزیع سطح الکتریکی انجام شده توسط معادلات الکترومغناطیس دوفازی.

ایجاد کند. با توجه به بررسی‌ها و مطالعات صورت گرفته و همچنین نیازهای مربوط به فرایند داخل ترانسفورماتورها و تأثیرپذیری نانوروغن مدنظر، این نتیجه حاصل شده است که باید فرایند شبیه‌سازی در سه مرحله هم‌زمان صورت بگیرد که به شرح ذیل می‌باشد:

- بررسی پدیده انتقال (انتقال حرارت و انتقال جرم)؛
- بررسی شرایط سیالات در حضور نانوذرات متفاوت؛
- بررسی اصول القای الکترومغناطیسی و عایقی الکتریکی در داخل ترانسفورماتور.

پس از این سه اصل اساسی، مهم‌ترین مورد در اجرای شبیه‌سازی، ساخت اجزای اصلی سیستم و همچنین شبکه‌بندی (مش‌زنی) دقیق و موثر در فرایند شبیه‌سازی می‌باشد تا در زمان ارائه بهترین نتایج در زمان کوتاه شرایط واقعی فرایند مد نظر را القا کند. پس از بررسی پژوهش‌های صورت گرفته مشخص می‌شود هیچ یک از موارد بالا به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار نگرفته و این تصمیم به‌منظور اجرای همه پارامترها و بررسی تأثیر همه‌جانبه می‌تواند به‌طور کامل به انتخاب صحیح‌ترین نمونه منجر شود. طبق نتایج اولیه به دست آمده، نانوذرات مورد بحث می‌توانند در گام نخست ایده صحیحی را در خصوص فرایند موثر در ترانسفورماتورها فراهم کنند. به‌صورت نمونه الگوهای محاسباتی با توزیع سطح الکتریکی در حالت دوفازی که در شکل ۲ ارائه شده است، می‌توان بررسی کرد که توسط معادلات الکترومغناطیس دوفازی مورد محاسبه و اجرا در نرم‌افزار قرار گرفته است. معادلات حاکم الکترومغناطیس برای این محاسبه شرح زیر می‌باشد: [۲۱]

$$\nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}) = \rho_p + \rho_n + \rho_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_p = G_T H(W) + \left[G_I + \frac{\rho_p \rho_e R_{pe}}{e} + \frac{\rho_p \rho_n R_{pn}}{e} \right] (1 - H(W)) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = \left[\frac{\rho_e}{\tau_e} - \frac{\rho_p \rho_n R_{pn}}{e} \right] \quad (3)$$

جدول ۱. لیست نانوذرات معمولی.

ردیف	نانوذرات	سال تحقیق
۱	TiO ₂	۲۰۱۸ - ۲۰۱۹
۲	Al ₂ O ₃	۲۰۱۸ - ۲۰۱۹
۳	SiO ₂	۲۰۱۹ - ۲۰۲۰
۴	CuO	۲۰۱۸ - ۲۰۱۹
۵	ZnO	۲۰۱۹ - ۲۰۲۰
۶	BN	۲۰۱۸ - ۲۰۱۹
۷	Graphene-CNT-MWCNT	۲۰۱۴ - ۲۰۱۵ - ۲۰۱۶
۸	Nano Diamond	۲۰۱۵
۹	BaTiO ₃	۲۰۱۹
۱۰	NiFe ₂ O ₄	۲۰۱۹
۱۱	MoS ₂	۲۰۱۹

جدول ۲. لیست ترکیب های دوتایی و سه تایی.

ردیف	هیبرید دوتایی و سه تایی	سال تحقیق
۱	WO ₃ - Ag	۲۰۱۶
۲	CaCu ₂ Ti ₂ O ₁₂ (CCTO)	۲۰۱۹
۳	TiO ₂ /Al ₂ O ₃	۲۰۱۹ - ۲۰۲۰
۴	TiO ₂ /SiO ₂	۲۰۱۹ - ۲۰۲۰
۵	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	۲۰۱۹ - ۲۰۲۰
۶	CuO/ZnO	۲۰۱۹ - ۲۰۲۰
۷	Al ₂ O ₃ /MWCNT	۲۰۱۸
۸	ZnO/ZrO ₂ /Al ₂ O ₃	۲۰۱۶
۹	Fe ₂ O ₃ /ZnO/SiO ₂	۲۰۱۷
۱۰	TiO ₂ /Al ₂ O ₃ /MoS ₂	۲۰۱۹
۱۱	Fe ₂ O ₃ /TiO ₂ /Al ₂ O ₃	۲۰۱۸

قابل اهمیت می‌باشد و با توجه به اصول ساخت نانوسیالات و موارد مورد نیاز برای ترانسفورماتورها، اهمیت این انتخاب بیشتر از قبل نیز خواهد بود. طبق پژوهش‌های صورت گرفته و جدول ارائه شده، از نانوذرات موثر منتخب، پنج نانوذره CuO، TiO₂، Al₂O₃، SiO₂ و MWCNT مورد انتخاب نهایی قرار گرفته‌اند. این انتخاب از دو جهت صورت گرفته است که به شرح زیر دسته‌بندی می‌شود:

- شبیه‌سای‌های ابتدایی صورت گرفته با نانوذرات متفاوت در حالت دوتایی؛
- نمونه‌های ساخته شده با غلظت‌های بسیار پایین و کمتر از ۱ درصد حجمی که رفتار نانوسیالات را می‌توان از آنها رصد کرد.

این دو پارامتر دید مناسبی را برای اجرای نهایی فرایند ارائه می‌دهد. شبیه‌سازی‌های مدنظر با استفاده از نرم‌افزار کامسول نسخه ۵/۵ صورت گرفته که هم‌زمان موارد اصلی و پایه یک ترانسفورماتور به‌صورت دو بعدی مورد اجرا قرار می‌گیرد و دید ابتدایی درستی از ساختارهای مجموعه سیستم را ارائه می‌دهد. ذکر این نکته بسیار مهم است که صحت تمامی شبیه‌سازی‌های عددی با فرض عدم چسبندگی ذرات و پایداری نانوسیال قابل قبول می‌باشد، زیرا در عمل ممکن است به علت وجود میدان‌های الکتریکی قوی و خواص دی‌الکتروفورسیس و مگنتوفورسیس ذرات و سیال، نانوذرات اکسید فلزی به یکدیگر جذب شده و رسوب تشکیل می‌دهند و یا به‌صورت زنجیروار به سمت میدان الکتریکی قوی‌تر جذب می‌شوند و در سیستم سیال ناپایداری ایجاد می‌نمایند که می‌تواند چالش بسیار جدی در شرایط مسئله

۴. توصیف شرایط مسئله

ترانسفورماتورهای قدرت یا توزیع از نوع ترانس نرمال ۲۵ kVA ردیف ۳۳ kV ساخت شرکت ایران ترانسفو به عنوان مطالعه موردی در این پژوهش انتخاب شده است که به‌طور گسترده در شبکه برق سراسری استفاده می‌شود. ترانسفورماتور نرمال ۲۵ kVA و ولتاژ ۳۳ kV یا نسبت ولتاژ ۳۳ kV - ۰/۴ ایران ترانسفو در دسته ترانسفورماتورهای توزیع روغنی سه فاز با منبع انبساط قرار دارد. این ترانس از دسته ترانسفورماتورهای کوچک شرکت ایران ترانسفو محسوب می‌شود و جهت برق رسانی در شبکه توزیع و عمدتاً در محل‌های کم‌بار یا چگالی بار پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترانسفورماتور ۲۵ کیلوولت آمپر نرمال مناسب برای نصب روی تیرهای برق و در فضای بسته یا فضای باز است. این ترانس دارای منبع انبساط در سمت طولی (فشار ضعیف)، محفظه رطوبت‌گیر نیم کیلویی، شیر تخلیه و محفظه برای نمونه برداری روغن DIN ۴۲۵۵۱، روغن نمای مغناطیسی و کلید تنظیم ولتاژ سه حالتی می‌باشد.

ابعاد و مشخصات فنی ترانس نرمال ۲۵ kVA ردیف ۳۳ kV ایران ترانسفو:

۱. ترانسفورماتور با توان ۴۰۰ کیلوولت آمپر؛
۲. مطابق با استاندارد ۷۶ - IEC ۶۰۰؛
۳. ترانسفورماتوری از نوع کاهنده ولتاژ؛
۴. دارای فرکانس نامی ۵۰ Hz؛
۵. ارتفاع محل نصب: ۱۰۰۰ متر از سطح دریاهای آزاد؛
۶. سیستم خنک‌کنندگی: ONAN؛
۷. روغن مطابق با استاندارد ۲۹۶ - IEC ۶۰۰؛
۸. افزایش دمای ماکزیمم روغن ۶۰ درجه سانتیگراد و افزایش دمای متوسط سیم‌پیچ ۶۵ درجه سانتیگراد؛
۹. ترانس تلفات و امپدانس اتصال کوتاه مطابق استاندارد ۷۶ - IEC ۶۰۰؛
۱۰. ابعاد ترانس ۲۵ kVA نرمال (ارتفاع × عرض × طول): ۱۳۸۱ × ۶۹۳ × ۹۱۸ سانتیمتر.

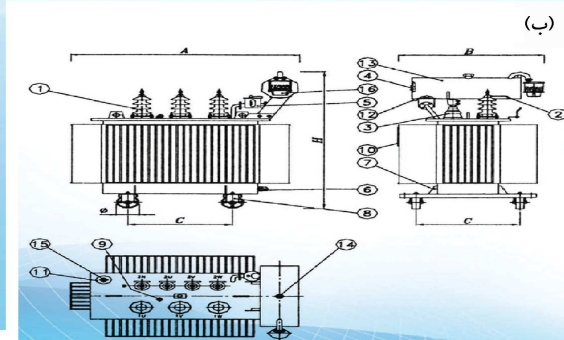
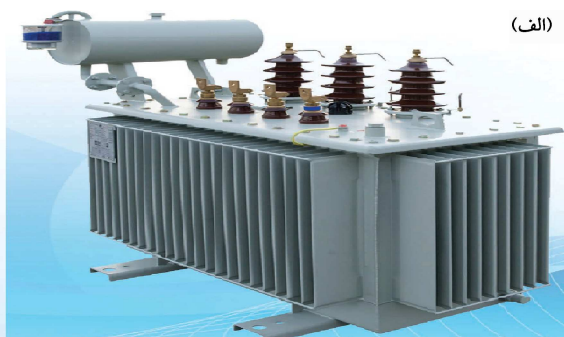
ترانسفورماتور از کویل و مجموعه هسته تشکیل شده است و شامل سه سیم‌پیچ مسی و یک هسته فولادی است که آنها را به یکدیگر متصل می‌کند. تمامی موارد نام برده شده در روغن ترانسفورماتور موجود در بدنه ترانسفورماتور غوطه‌ور می‌شوند که مجهز به پره‌هایی برای افزایش منطقه انتقال حرارت است. روغن ترانسفورماتور دو نقش مهم را ایفا می‌کند که عبارتند از: یک محیط خنک‌کننده که گرمای تولید شده در سیم‌پیچ‌ها و هسته را به دیواره‌های بیرونی منتقل می‌کند و یک عایق الکتریکی. بر اساس داده‌های موجود، گرمای تولید شده در ترانسفورماتور در شرایط بار کامل ۱۰۰۰ وات از هر سیم‌پیچ و ۵۰۰ وات از هسته است. این گرمای تولید شده باید دفع شود تا دمای روغن در سطح قابل قبولی حفظ شود.

تمامی مواد به غیر از روغن ترانسفورماتور، مستقل از درجه حرارت فرض می‌شوند و خواص آنها در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است.^[۲۲] خواص روغن ترانسفورماتور پس از افزودن نانو ذرات اصلاح می‌شود و مدل‌هایی برای پیش‌بینی این خواص برای آماده‌سازی و تجزیه و تحلیل مواد پیشنهاد شده است. چگالی معادل و گرمای ویژه نانو سیال به‌طور مستقیم فرمول‌بندی شده است. خواص روغن ترانسفورماتور در

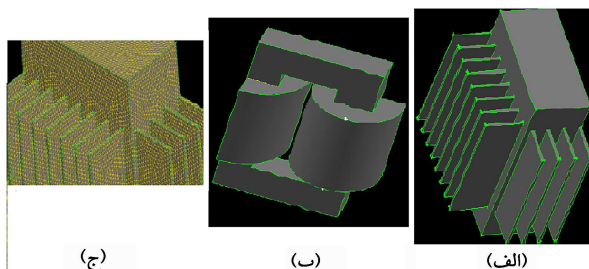
$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{J} = -G_T H(W) + \left[-G_I - \frac{\rho_p \rho_e R_{pe}}{e} - \frac{\rho_e}{\tau_e} \right] (1 - H(W)) \quad (4)$$

شکل ۳ الف، تصویری را برای این ترانسفورماتور نشان می‌دهد، در حالی که شکل ۳ ب یک نقشه شماتیک از نمای بیرونی این ترانسفورماتور را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی عددی ترانسفورماتور کامل نشان داده شده در شکل ۳ پیچیده است و نیاز به زمان پردازش و حافظه زیادی دارد. بنابراین، برای ساده‌سازی حل عددی و به دلیل تقارن هندسی می‌توان از یک چهارم ترانسفورماتور به عنوان مدل محاسباتی استفاده کرد.

ترانسفورماتور کامل را همانطور که در شکل ۴ الف نشان داده شده است که نمای بیرونی مدل محاسباتی (چهارم ترانسفورماتور) را نشان می‌دهد و شکل ۴ ب که نشان‌دهنده مدل محاسباتی برای سیم‌پیچ‌ها و مجموعه هسته (یک چهارم سیم‌پیچ‌ها و مجموعه هسته) است، از آنجایی که سیم‌پیچ‌ها به عنوان یک استوانه جامد در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۳. الف) تصویر برای ترانسفورماتور ۲۵ kVA مورد مطالعه، ب) شکل شماتیک برای ترانسفورماتور ۲۵ kVA مورد مطالعه.



شکل ۴. الف) مدل محاسباتی (نمای بیرونی یک چهارم ترانسفورماتور)، ب) مدل محاسباتی (یک چهارم سیم‌پیچ‌ها و مجموعه هسته)، ج) نمای بیرونی (مش استفاده شده برای مدل محاسباتی).

جدول ۳. مشخصات نانوذرات هیبریدی و روغن ترانسفورماتور. [۲۲]

مواد	دانسیتته (kg/m^3)	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg.K$)	هدایت حرارتی ($W/m.K$)
CuO	۶۳۱۵	۵۳۱	۷۵ - ۲۰
TiO _۲	۴۲۵۰	۶۸۶٫۲	۸٫۹۵۳
Al _۲ O _۳	۳۶۰۰	۷۶۵	۴۰ - ۳۶
SiO _۲	۲۴۰۰	۷۴۱/۸	۱/۴
MW _{CNT}	۱۳۵۰	۷۵۰	۶۰۰۰ - ۳۰۰۰
عایق	۹۳۰	۱۳۴۰	۰/۱۹

جدول ۴. خصوصیات روغن ترانسفورماتور قدرت. [۲۲]

خواص فیزیکی	مقدار
دانسیتته	$۸۸۷ - ۰/۶۵۹T$ (kg/m^3)
ویسکوزیته	$۱/۳۵۷۳ \times ۱۰^{-۶} \left[\exp \left(\frac{۲۳۹۷/T}{T+۲۳۳} \right) \right]$
دینامیکی	($kg/m.s$)
ظرفیت حرارتی ویژه	$۱۹۶۰ + ۴/۰۰۵T$ ($J/kg.K$)
هدایت حرارتی	$۰/۱۲۰۲ (w/m.K) @ ۲۵^\circ C$

جدول ۴ آمده است. [۲۲]

نیز آرام هستند و نیازی به مدل‌های آشفته‌گی نمی‌باشد. برای گسسته‌سازی فضایی اندازه حرکت خطی یا ممتوم و انرژی، طرح مرتبه دوم جهت مخالف استفاده می‌شود و در نهایت مسئله با حلگر مبتنی بر فشار به صورت جفت شده حل می‌شود. معیار همگرایی برای باقیمانده‌های معادله‌های حاکم با $۱۰^{-۶} \times ۱/۰$ تنظیم شده است. تغییرات دما نیز برای تخمین همگرایی پایش می‌شود. هنگامی که سیستم به تعادل حرارتی می‌رسد، دمای قسمت‌های فعال دیگر افزایش نمی‌یابد و گرمای تولید شده به‌طور کامل تلف می‌شود که پس از به دست آوردن نتایج قابل بررسی است. در مدل مخلوط، معادله‌های بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی برای نانوسیال به جای هر فاز فرمول‌بندی می‌شود. تفاوت سرعت بین فازها در معادله‌های حاکم بر اندازه حرکت و انرژی در نظر گرفته می‌شود و یک معادله دیگر برای کسر حجمی نانوذرات فرمول‌بندی می‌شود. به این ترتیب، معادله‌های حاکم به صورت زیر ارائه شده است: [۲۲]

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V_m) = 0 \quad (۱۰)$$

اندازه حرکت خطی:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V_m V_m) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho_{nf} g + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^r \phi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k} \right) \quad (۱۱)$$

انرژی:

$$\nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^r \phi_k V_k (\rho_k E_k + P) \right) = \nabla \cdot (k_{nf} \nabla T) + S_e \quad (۱۲)$$

و رابطه کسر حجمی نانوذرات: [۲۲]

$$\nabla \cdot (\phi_{pp} V_m) = -\nabla \cdot (\phi_{pp} V_{dr,p}) \quad (۱۳)$$

V_m سرعت متوسط جرمی مخلوط به صورت رابطه ذیل خواهد بود: [۲۲]

$$V_m = \frac{\sum_{k=1}^r \phi_k \rho_k V_k}{\rho_{nf}} \quad (۱۴)$$

τ تانسور تنش برشی که به صورت رابطه ذیل تعریف شده است: [۲۲]

$$\tau = \mu_{nf} \nabla V_m \quad (۱۵)$$

سرعت رانش $V_{dr,p}$ و سرعت جریان نسبی V_{pf} فاز دوم با فرمول زیر به هم متصل می‌شوند: [۲۲]

$$V_{dr,p} = V_{pf} - \sum_{k=1}^r \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_{nf}} V_{fk} \quad (۱۶)$$

یک رابطه جبری نیز برای سرعت نسبی که مبتنی بر فرض تعادل موضعی بین فازها در یک مقیاس طولی کوتاه می‌باشد، اتخاذ شده است: [۲۲]

$$V_{pf} = \frac{\rho_p d_p^{\frac{1}{2}} (\rho_p - \rho_{eff}) a}{18 \mu_f f_{drag} \rho_p} \quad (۱۷)$$

که در آن مقدار a شتاب می‌باشد. [۲۲]

$$a = g - (V_m \cdot \nabla) V_m \quad (۱۸)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (۵)$$

$$C_{nf} \rho_{nf} = (1 - \phi) C_f \rho_f + \phi C_p \rho_p \quad (۶)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f \left[1 + 2/5 \phi \left(1 + \frac{1/8 \phi \mu_f}{r} \right) \right] \quad (۷)$$

$$k_{nf} = k_f \left[1 + 4/4 \text{Re}_p^{*2} \frac{\text{Pr}_f^{*0.66}}{r_f} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{1.4} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.73} \phi^{0.66} \right] \quad (۸)$$

که در آن ϕ کسر حجمی نانوذرات است. استخراج مدل‌های دقیق برای ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال تا حدودی دشوار است. به منظور محاسبه تأثیر برهمکنش بین سیال پایه و نانوذرات بر روی خواص روغن، پارامترهای میکروسکوپی در مدل گنجانده شده است. مدل ویسکوزیته بر اساس فرمول ویسکوزیته انیشتین و مدل هدایت حرارتی حاصل از بازسازی داده‌های اندازه‌گیری شده در تحلیل زیر استفاده می‌شوند که در آن، r شعاع نانوذرات، Pr عدد پراتل سیال پایه روغن خالص ترانسفورماتور و T_{fr} نقطه انجماد سیال پایه می‌باشد. عدد رینولدز نانوذرات Re_p به صورت معادله ۹ تعریف می‌شود: [۲۲]

$$\text{Re}_p = \frac{2 \rho_f k_b T}{\pi \mu_f^2 d_p} \quad (۹)$$

برای تعیین الگوی حرکت سیال، جریان نانوسیال در سیم پیچ ترانسفورماتور به عنوان یک جریان تک فاز معمولی در نظر گرفته می‌شود. خواص معادل نانوسیال بر پایه روغن ترانس با غلظت‌های مورد نظر با مدل‌های معرفی شده به دست آمده است. عدد رینولدز محاسبه شده برای این مسئله حدود ۱۰۰۰ است که بسیار کوچکتر از مقدار بحرانی (۲۱۰۰) برای جریان آرام است. علاوه بر این، جریان روغن در این سیم پیچ به صورت آرام پیش‌بینی شده است. از این رو، تمام جریان‌های مورد مطالعه

و همچنین تابع نیروی کششی یا درگ f_{drag} توسط معادله ۱۹ پیشنهاد شده است: [۲۲]

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_p^{0.678} & Re_p \leq 1000 \\ 0.183 Re_p & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (19)$$

به این ترتیب، در مدل مخلوط، معادله‌های حاکم که شامل معادله پیوستگی مخلوط، معادله اندازه حرکت مخلوط، معادله انرژی مخلوط، معادله کسر حجمی فاز ثانویه و عبارات جبری سرعت‌های نسبی هستند، با یکدیگر حل می‌شوند. در نتیجه، تعداد متغیرها در مدل مخلوط بزرگ‌تر از مدل تک فاز و کوچک‌تر از مدل کامل چند فاز است.

شرایط مرزی مورد استفاده برای حل مجموعه معادله‌های فوق عبارتند از: عدم سرعت لغزش در تمام دیوارهای جامد شامل کویل‌ها، هسته‌ها و تمام دیوارهای ترانسفورماتورهای شبکه توزیع. کویل‌ها و هسته‌ها به‌عنوان منبع تولید حرارت ثابت شناخته می‌شوند که تلفات حرارتی واقعی تولید شده در ترانسفورماتور واقعی را محاسبه می‌کنند. مقادیر این تلفات حرارتی از داده‌های موجود برای تلفات الکتریکی در سیم پیچ‌ها و هسته، که برای تبدیل به انرژی حرارتی محاسبه می‌شود، به دست می‌آید. تمام دیواره‌های خارجی ترانسفورماتور از جمله سطوح پره‌ها، تحت جریان جابجایی طبیعی و تشعشع ترکیبی قرار می‌گیرند، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی و تابش خارجی در نظر گرفته شده است. مدل فوق به‌صورت عددی حل شده است. سپس، میانگین و حداکثر دما و سرعت انتقال حرارت روغن قابل محاسبه است. ابتدا ترانسفورماتور با روغن ترانسفورماتور خالص شبیه‌سازی شده و سپس محلول با نانوسیال هیبریدی مبتنی بر روغن ترانسفورماتور و در نظر گرفتن مقادیر غلظت لحاظ شده است.

۵. شبیه‌سازی ترانسفورماتور

شبیه‌سازی ترانسفورماتور توزیع توسط یک هسته E با در نظر گرفتن منحنی BH غیرخطی انجام شده است. مطالعه مشابه برای نانوذرات منفرد در کار بهادری و همکاران ارائه شده است. [۲۳] به‌طور مشابه، برای مقایسه اثرات منفرد چند نانوذره تکی در مطالعه مشتاق اسماعیل حسن، شبیه‌سازی با همین ساختار بکار رفته است. [۲۴] فرضیه‌های زیر به‌منظور بررسی انتقال حرارت در یک ترانسفورماتور روغنی در حضور و عدم حضور نانوذرات هیبریدی مدنظر قرار گرفته است.

نانوذرات تحت میدان مغناطیسی هیدرودینامیکی و میدان الکتریکی:

- این نانوسیالات (نانوروغن) یک‌دست و یکسان تلقی می‌شوند و از اختلاف فاز مداوم روغن و فاز پراکنده نانوذرات صرف نظر شده است؛
 - از رسوب ذرات، گرفتگی معابر میکروکانال و فرسایش لوله صرف نظر شده است؛
 - در شبیه‌سازی ترانسفورماتور، از دست دادن گرداب و اثر هیستریزیس^{۱۴} صرف نظر شده است؛
 - حدود ضریب انتقال حرارت گروه بی‌بعد عدد ناسلت برای هوای مجاور ۵ در نظر گرفته شده است. [۲۵]
- تمامی شبیه‌سازی‌های به قطعات جامد و قطعات مایع تقسیم می‌شوند. بخش‌های جامد شامل هسته و سیم‌پیچ هستند و روغن یا نانوروغن مخلوط بخش جریان مایع یا دو فاز است.

روابط میدان مغناطیسی و الکتریکی: مهمترین اصل در ترانسفورماتورها رعایت اصول الکترومغناطیسی می‌باشد که الویت شرایط فرایند عملیاتی می‌باشد و همواره باید در جهت بهبود رعایت استانداردهای محاسباتی اجرایی شود. معادله‌های مربوط به میدان مغناطیسی و الکتریکی به شرح زیر ارائه داده شده است: [۲۵]

$$\nabla \times H = j \times \frac{\partial D}{\partial t} \quad (20)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (21)$$

$$\nabla D = \rho \quad (22)$$

$$\nabla B = 0 \quad (23)$$

در معادله‌های بالا، H و E به ترتیب شدت یا شار میدان مغناطیسی و الکتریکی می‌باشند. D چگالی جریان، B چگالی شار مغناطیسی، j چگالی جریان و q چگالی بار الکتریکی است. معادله‌های ۲۰ و ۲۱ به‌عنوان قانون آمپر ماکسول^{۱۵} و قانون فارادی^{۱۶} شناخته شده‌اند. معادله‌های ۲۲ و ۲۳ اشکال الکتریکی و مغناطیسی قانون گوس^{۱۷} هستند. معادله پیوستگی، معادله دیگری برای پیش‌بینی میدان الکتریکی و مغناطیسی است که به فرم زیر ارائه می‌شود: [۲۵]

$$\nabla \cdot j = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (24)$$

این مدل برای فرکانس خطی ۵۰ هرتز حل شده است. القاء شده ولتاژ (V_{in}) متناسب با میزان شار مغناطیس (φ) و تعداد سیم پیچ (N) به‌صورت معادله ۲۵ ارائه شده است:

$$V_{in} = -N \frac{d\varphi}{dt} \quad (25)$$

به این ترتیب، ولتاژ ناشی از سیم پیچ‌های ثانویه متناسب با ولتاژ ناشی از سیم پیچ‌های اولیه (V_p) است: [۲۵]

$$\frac{V_S}{V_p} = \frac{V_S}{V_p} \quad (26)$$

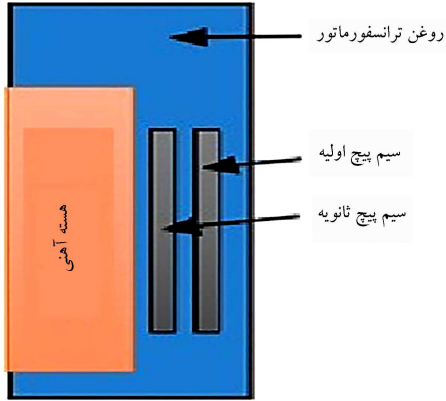
برای ورود اطلاعات به داخل نرم‌افزار بر پایه سلسله مراتب و اصول معادله‌های بالا در بخش الکترومغناطیس اطلاعات اولیه مربوط به پره و هسته نیاز است تا به‌صورت ورودی قطعی برای محاسبات به نرم‌افزار داده شود. هر چند که بسیاری از این مقادیر در نرم‌افزار موجود می‌باشد، اما برای افزایش دقت عمل با استفاده از اسناد مربوط به استانداردها این مقادیر برگرفته شده است که به شرح جدول ۵ و ۶ می‌باشد.

۶. معادلات انتقال حرارت در داخل ترانسفورماتور (نانوروغن)

برای شبیه‌سازی نانوروغن در داخل ترانسفورماتور نیاز به ایجاد تغییر در تعدادی از معادله‌های اشاره شده می‌باشد، زیرا اصول انتقال جرم و انتقال حرارت در نانوسیالات متفاوت بوده و به همین منظور باید شرایط را برای نتیجه‌ی مناسب آماده کرد. در این بخش، نانوذرات مدنظر به روغن پایه اضافه و پراکنده می‌شود تا موارد مربوط به انتقال حرارت در سیستم محاسبه گردد. در این شبیه‌سازی، همان‌طور که پیش‌تر در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد، از مدل مخلوط برای پیش‌بینی رفتار جریان دو فاز استفاده شده است. نانوذرات و روغن به ترتیب مراحل مداوم و پراکنده در نظر

جدول ۷. خواص نانوذره منتخب TiO_2 .

Property	Value
Electrical conductivity	1×10^{-11}
Thermal conductivity (W/m.K)	~ 9
Nanoparticles size (nm)	$1/7$



شکل ۵. شماتیک دو بعدی ترانسفورماتور برای طراحی.

برای ورودی معادله‌ها و نرم‌افزار متفاوت می‌باشد که در جدول ۳ مشخصات نانوذرات برای معلق سازی در روغن ترانسفورماتور به صورت نانوروغن هیبریدی ارائه شده است. به عنوان مثال، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم TiO_2 به شرح اطلاعات جدول ۷ می‌باشد. چگالی نانوذرات و ضریب انبساط حرارتی وابسته به درجه حرارت در معادله‌های زیر نشان داده شده‌اند: [۲۵]

$$\rho_{TiO_2} = 3907/00 - 2/907377 \times 10^{-2} - 7/28 \times 10^{-2} T^2 \quad (28)$$

$$\beta_{TiO_2} = 1/880 \times 10^{-6} + 6/544 \times 10^{-9} T \quad (29)$$

با توجه به محاسبات ارائه شده گروه‌های بدون بعد، عدد ناسلت^{۱۸} و رایلی^{۱۹} به صورت معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند: [۲۵]

$$Ra = \frac{\rho g^{\uparrow} C_P \beta \Delta T x^3}{\alpha \mu} \quad (30)$$

$$Nu = \frac{q \cdot x}{\Delta T \alpha} \quad (31)$$

۷. پیکربندی و شبکه‌بندی

همان‌طور که اشاره شد، شبیه‌سازی به صورت حالت دو بعدی و سه بعدی (فاز بعدی) صورت خواهد گرفت، اما پیکربندی و مش‌بندی هر دو شبکه در این فاز مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفته که می‌تواند نگاه دقیقی در خصوص شرایط پایه را ارائه دهد. در گام اول، پیکربندی دو بعدی که از دو پرده‌بندی اصلی (سیم پیچ‌های اصلی) و مخزن روغن تشکیل شده، انجام شده است که به‌طور شماتیک در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد.

با توجه به اصول طراحی پیکربندی و شماتیک مدنظر، آنچه در نرم‌افزار مورد بررسی و طراحی قرار گرفته است به صورت شکل ۶ می‌باشد که به‌طور کامل مجزا شدن موارد مدنظر مشخص می‌باشد و می‌تواند ساختاری برای ایجاد مش‌بندی و

جدول ۵. اطلاعات ورودی مربوط به پره‌های ترانسفورماتور.

Property	Value	Unit
Electrical conductivity	$5/99 \times 10^7$	S/m
Thermal conductivity	400	W/m.K
Heat capacity	8700	Kg/m ^۳
Density	385	j/kg.K
Surface radiation	$0/5$	-
Relative permeability	1	-
Thermal resistance coefficient	$3/862 \times 10^{-2}$	1/K
Primary windings number (N_p)	756	-
Secondary windings number (N_s)	126	-
Primary windings resistance (R_p)	352	ohm
Secondary windings resistance (R_s)	$7/05$	ohm
Voltage frequency (N_u)	50	Hz
Voltage (V_{ac})	10	Kv

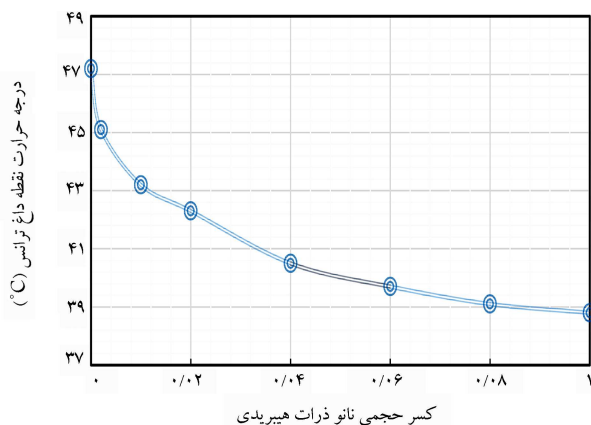
جدول ۶. اطلاعات ورودی مربوط به هسته ترانسفورماتور.

Property	Value	Unit
Electrical conductivity	12×10^7	S/m
Thermal conductivity	80	W/m.K
Density	7850	Kg/m ^۳
Heat capacity	450	j/kg.K

گرفته می‌شوند. خواص نانوسیال به عنوان تابعی از روغن ترانسفورماتور (سیال پایه) و نانوذرات (ذرات جامد) به شرح معادله‌های زیر می‌تواند تعریف شود: [۲۵]

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)\varepsilon}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\varepsilon} \quad (27)$$

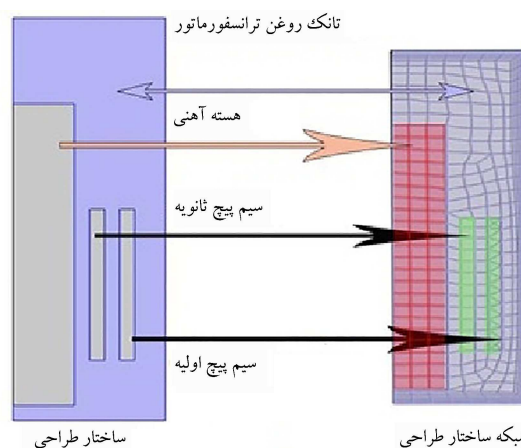
در معادله ۲۷، $\alpha = \frac{k_s}{k_f}$ ترم نسبت هدایت حرارتی نانوذرات به هدایت حرارتی روغن را نشان می‌دهد و φ کسر حجمی نانوذرات است. خواص هر کدام از نانوذرات



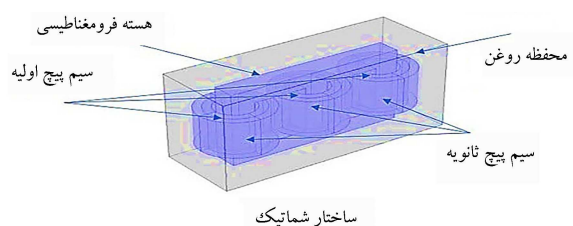
شکل ۸. تأثیر نانوذرات هیبریدی بر دمای نقطه داغ ترانسفورماتور.

صورت گرفته برای نانوذرات CuO و TiO_2 انجام شده و نتایج بهینه نانوذره اکسید تیتانیوم به صورت زیر می‌باشد. دلیل ارائه شبیه‌سازی نمونه بهینه از آن جهت می‌باشد که در نهایت برای انجام فعالیت‌های تجربی، تنها نمونه‌های ایده‌آل و موثر در بهبود فرایند شرایط آزمایشگاهی ارائه شود. البته نمونه‌هایی که بتوانند بهینه بودن نانوذراتی همچون CuO نشان دهد، در بخش آزمایشگاهی ساخته و ارائه خواهد شد تا به این ترتیب صحت فرایند شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گیرد. در این بخش از روغن خالص به عنوان روغن پایه برای بررسی انتقال حرارت در ترانسفورماتور توزیع سه فاز استفاده شده است. روغن وظیفه انتقال طبیعی حرارت تولید شده توسط میدان الکترومغناطیسی ترانسفورماتور را بر عهده دارد. شکل ۸ اثر نانوذرات نانو ساختارهای هیبریدی مورد نظر را بر دمای نقطه داغ ترانسفورماتور نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دمای نقطه داغ برای ترانسفورماتور پراز روغن خالص، $47/2$ درجه سانتیگراد می‌باشد که نشان دهنده تطابق نتایج این پژوهش با یافته‌های دیگر پژوهش‌های صورت گرفته است. [25, 24] برای بررسی اثرات افزودن نانوذرات بر روغن ترانسفورماتور، کسر حجمی $0/02$ ، $0/05$ و $0/1$ از نانوذرات به روغن اضافه شده و از نتایج شبیه‌سازی برای پیش‌بینی اثرات نانوذرات بر روی انتقال حرارت استفاده شده است. همان‌طور که اشاره شد، حداکثر درجه حرارت برای روغن خالص با در نظر گرفتن الکترومغناطیسی تولیدی ترانسفورماتور، $47/2$ درجه سانتیگراد می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، با افزودن نانوذرات هیبریدی به روغن، حداکثر دمای اجزای ترانسفورماتور به دلیل افزایش هدایت حرارتی روغن کاهش می‌یابد. مشخص می‌شود که با افزایش کسر حجمی نانوذرات از صفر به $0/1$ ، حداکثر دمای اجزای ترانسفورماتور از $47/2$ درجه سانتیگراد به $43/05$ درجه سانتیگراد کاهش یافته است. لازم به ذکر است، همان‌طور که پیش‌تر نیز مطرح شد، اثرات تجربی نانوذرات منفرد مختلف در روغن ترانسفورماتور توسط پژوهشگران مطالعه و گزارش شده است. [25-27]

نمودار شکل ۹ نیز عدد ناسلت را در روغن ترانسفورماتور در شرایط حضور و عدم حضور نانوذرات نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد ریلی، مقدار ناسلت افزایش می‌یابد. همان‌طور که نشان داده شده است، روغن با عدد ناسلت نانوذرات تیتانیوم، به ویژه زمانی که از صفر به $0/1$ افزایش می‌یابد، دارای ارتباط است. افزایش غلظت نانوذرات از صفر به $0/1$ افزایش مقدار ناسلت از $1/4$ به $1/9$ را نشان می‌دهد و اهمیت ترکیب نانوذرات با روغن ترانسفورماتور را بیان می‌کند. با این حال، با افزایش غلظت نانوذرات از $0/1$ ، اثرات آن در انتقال حرارت کاهش می‌یابد.



شکل ۶. تصویر شماتیک ساختار شبیه سازی شده دو بعدی و ساختار مش زده شده داخل نرم افزار.



شکل ۷. نمایی ساختار شماتیک و شبیه‌سازی شده سه بعدی.

شروع محاسبات براساس معادله‌های ذکر شده باشد. نکته حائز اهمیتی که باید به آن توجه شود این است که، از آنجا که ترانسفورماتور و تجهیزات آن به صورت متقارن می‌باشند، شبیه‌سازی را نیز به همین صورت باید انجام داد تا از مقدار محاسبات کاسته شود، اما در شبیه‌سازی سه بعدی به صورت یکپارچه انجام شده است. برای اجرای شبیه‌سازی نیاز به شبکه بندی (مش‌زنی) ساختار طراحی شده می‌باشد و از آنجا که ساختاری دو بعدی به صورت یک مستطیل می‌باشد، بهترین انتخاب برای هر فاز مش مربعی می‌باشد تا بتواند بیشترین تأثیرگذاری را در محاسبات داشته باشد. در دیواره نیز به دلیل احتمال انباشت نانوروغن لایه مرزی برای جریان در نظر گرفته شده است. تعداد مجموع مش‌های اجرایی در داخل فاز دو بعدی 18134 می‌باشد که از این تعداد، 17228 برای دامنه اصلی و 906 مش برای لایه مرزی می‌باشد. در شبیه‌سازی سه بعدی نیز همین روند اجرایی می‌باشد و تفاوت خاصی در سلسله مراتب و انتخاب معادله‌ها ندارد، اما از آنجا که به صورت کامل مد نظر نمی‌باشد، تصویر طراحی شده آن در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد که در فاز بعدی تمامی جزئیات مش‌زنی، تعداد و نتایج تفصیلی آن ارائه شده است.

۸. نتایج اجرای مدل شبیه‌سازی دو بعدی

با توجه به هدف‌مندی و انتخاب بین نانوذرت هیبریدی مطابق جدول ۳، شبیه‌سازی

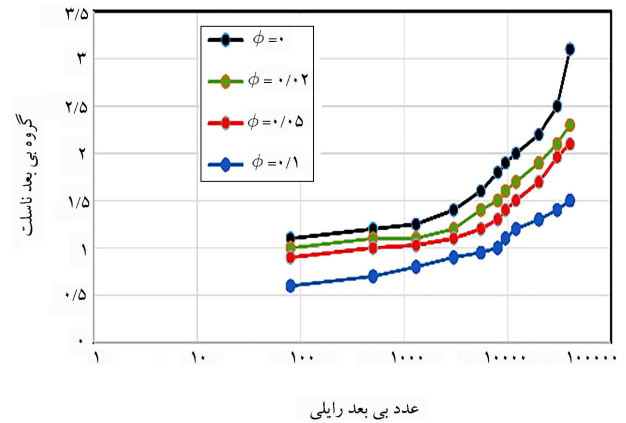


شکل ۱۱. دستگاه اندازه‌گیری رسانایی و مقاومت حرارتی KD2 Pro.

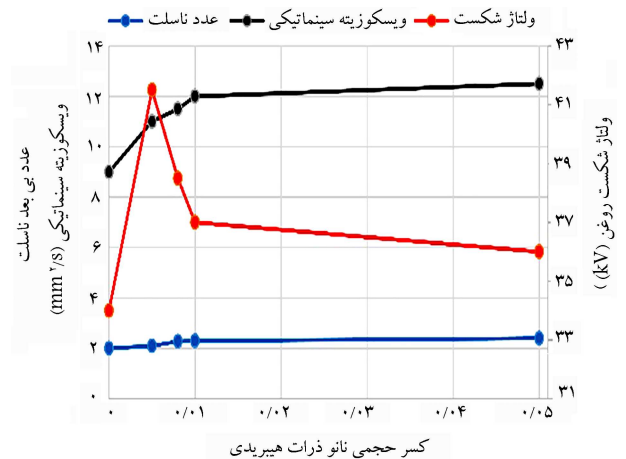
بهبود انتقال حرارت و کاهش درجه حرارت نقاط داغ در حدود ۱/۰٪ می‌تواند تعیین شود.

۹. نتیجه‌گیری نهایی

با توجه به انتخاب نانوذرات در مرحله شبیه‌سازی، همان نمونه‌ها به صورت هدف اصلی برای طراحی تجربی و شرایط آزمایشگاهی مدنظر قرار گرفته خواهد شد. نتایج آزمایشگاهی در ابتدا به جهت آشنایی با خصوصیات رفتاری نانوذرات و عوامل تأثیرگذار در پایداری ذرات در محیط روغنی و همچنین جلوگیری از هدر رفت ذرات در ساخت نمونه‌های اولیه، ابتدا در حجم کوچک (۵-۱۰ میلی‌لیتر) تهیه شده و پس از شناسایی نمونه‌های مطلوب، در حجم‌های بزرگتر (۱-۲ لیتر) تهیه و آزمایش می‌شود. بنابراین، مطابق جدول ۳، نمونه‌های نانوروغن CuO ، TiO_2 ، Al_2O_3 و SiO_2 و MWCNT تهیه خواهد شد. با وجود اینکه نتایج شبیه‌سازی بر روی نانوذره CuO مطلوب نبود، در نمونه‌سازی‌های آزمایشگاهی تهیه گردید تا بتوان به وسیله مشاهده‌های آزمایشگاهی نیز داده‌های تجربی استخراج گردد. در نمونه‌های آزمایشگاهی، دو ماده Tween ۸۰ و اولئک اسید به‌عنوان ماده پایدارکننده مدنظر قرار گرفت که ماده Tween ۸۰ به دلیل خواص آب‌دوستی ($\text{HLB} < 9$)، حلالیت در روغن نداشته و از بین دو گزینه مد نظر حذف گردید و تنها از ماده پایدارکننده اولئیک اسید که به‌طورکامل در محلول‌های روغنی پخش می‌شود، استفاده شده است. به این ترتیب، از خواص مهم و نیازمند اندازه‌گیری در این مطالعه که خود از مشخصه‌های اصلی روغن‌های ترانسفورماتور نبوده اما از مشخصه‌های بسیار با اهمیت جهت خنک‌سازی ترانسفورماتورها، رسانایی حرارتی و مقاومت حرارتی می‌باشد. این مشخصه از آن جهت با اهمیت است که یکی از اهداف اصلی وجود روغن درون محفظه ترانسفورماتور، علاوه بر ایجاد خاصیت عایقی، هدایت حرارت ایجاد شده درون هسته به صفحات فلزی اطراف ترانس و انتقال آن به بیرون می‌باشد. افزایش خاصیت رسانایی حرارتی روغن و کاهش مقاومت حرارتی آن می‌تواند وظیفه خنک‌کاری سیستم را به خصوص در فصول گرم سال به خوبی انجام دهد. برای بررسی خواص حرارتی نانوروغن‌های تولیدی از دستگاه KD2 Pro و سنسور ۱-KS که مخصوص اندازه‌گیری خواص حرارتی سیال‌های روغنی می‌باشد، مطابق شکل ۱۱، استفاده شده است.



شکل ۹. تغییرات مقدار ناسلت به‌عنوان تابعی از عدد ریلی و غلظت حجمی نانوذرات.



شکل ۱۰. عدد نسلت، ویسکوزیته سینماتیکی و ولتاژ شکست برحسب کسر حجمی نانوذرات در روغن ترانسفورماتور.

شکل ۱۰ مقدار عدد ناسلت، ویسکوزیته سینماتیکی و ولتاژ شکست را با توجه به کسری حجمی از نانوذرات هیبریدی در روغن ترانسفورماتور نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ناسلت برای روغن خالص ۲/۱۷ حاصل شده است (منحنی آبی رنگ). در ابتدا و با افزودن نانوذرات، ناسلت به‌سرعت افزایش می‌یابد. با این وجود، با افزایش غلظت نانوذرات، از سرعت افزایش کاسته می‌شود. علاوه بر این، منحنی ولتاژ خرابی دارای حداکثر نقطه در غلظت نزدیک به ۰/۴۵٪ است. با توجه به ملاحظات موجود، این نمونه شبیه‌سازی شده در شرایط میدانی و عملیاتی قابل پیاده‌سازی بوده که باید بررسی‌های آزمایشگاهی و تکمیلی تری بر روی آن صورت گیرد اما به‌طور معمول، نانوذرات هیبریدی می‌تواند در نمونه‌های نهایی بسیار تأثیرگذار باشد. در این امر که ممکن است موثر نباشد، می‌توان به این صورت بیان کرد که پس از این مرحله منحنی ولتاژ شکست کاهش می‌یابد. از آنجا که حداقل ولتاژی که باعث می‌شود قسمتی از عایق رسانای الکتریکی شده و جریان الکتریکی از آن عبور نماید، کاهش ولتاژ شکست روغن مطلوب نیست. به‌عبارت دیگر، ولتاژ شکست، حداکثر اختلاف ولتاژی است که می‌تواند قبل از انجام عایق در تمام مواد اعمال شود. بنابراین، با کاهش ولتاژ خرابی، احتمال شکست روغن ترانسفورماتور و در نتیجه احتمال ایجاد آسیب در ترانسفورماتور افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش نانوذرات باعث افزایش ویسکوزیته سینماتیکی روغن می‌شود که در شرایط سیال تا حدودی مؤثر است. بنابراین، غلظت بهینه نانوذرات در روغن ترانسفورماتور برای

• از میان مهم‌ترین دلایل بهبود عملکرد شبیه‌سازی می‌توان به بهبود شرایط گردش نانوروغن در سیستم و بین پره‌ها اشاره کرد که موجب بهبود خنک‌سازی سیستم می‌شود؛

• نکته مهم دیگری که در ترانسفورماتورها باید مد نظر قرارگیرد، موضوع نقطه و با نقاط داخل مابین هسته‌ها می‌باشد که نانوذرات موجود در روغن به علت بهبود گردش در سیستم باعث افت درجه حرارت محسوس آن خواهد شد و هم‌زمان تغییر غلظت و تغییر عدد ناسلت بر افزایش عدد ریلی تأثیر دارد که این امر در بهبود عملکرد ترانسفورماتور به صورت بهینه بسیار موثر خواهد بود؛

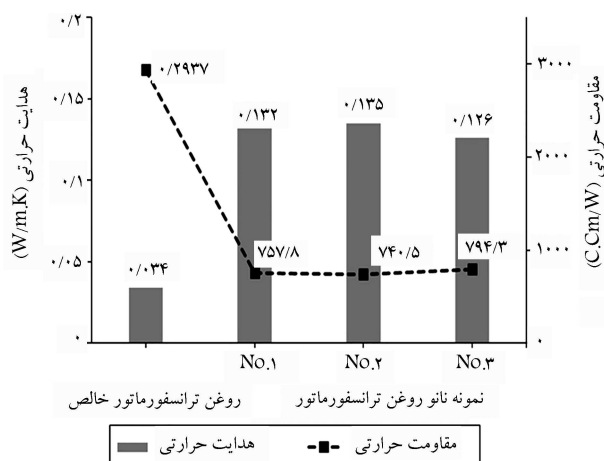
• به‌طور کلی، با توجه به ملاحظات شبیه‌سازی در مطالعات دیده می‌شود که نانوذرات باعث بهبود عملکرد تقریباً بالای ۶۰٪ ترانسفورماتورها می‌شوند و در صورت استفاده از نانوروغن‌ها در محیط‌های تحت بار، عملکرد بهینه و پایداری بیشتر عملیاتی به‌خصوص در بحث خنک‌سازی ترانس و در نتیجه سلامت طولانی مدت ترانسفورماتور حاصل می‌شود.

تقدیر و تشکر

این مطالعه بر اساس قرارداد پژوهشی به شماره ۹۹/۹۰۶۴۰۰۹ با شرکت سهامی برق منطقه‌ای خوزستان انجام شده است لذا بدین وسیله از حمایت‌های مالی شرکت سهامی برق منطقه‌ای خوزستان برای انجام این پروژه قدردانی می‌گردد.

فهرست علائم

- a : شتاب $\frac{m}{s^2}$ ؛
- B : چگالی شار مغناطیسی $\frac{wb}{m^2}$ ؛
- D : ضریب نفوذ مولکولی، $\frac{m^2}{s}$ ؛
- d : قطر نانوذرات nm ؛
- Cp : ظرفیت گرمایی ویژه، $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ ؛
- f_{drag} : تابع نیروی کششی یا درگ N ؛
- \vec{E} : بردار شدت میدان الکتریکی $\frac{N}{C}$ ؛
- GI : منبع نرخ چگالی بار یونی‌رئاسیون؛
- g : شتاب جاذبه $\frac{m}{s^2}$ ؛
- \vec{H} : بردار شدت میدان مغناطیسی؛
- J : چگالی جریان الکتریکی $\frac{A}{m^2}$ ؛
- k : ضریب هدایت حرارتی، $\frac{w}{m \cdot K}$ ؛
- N : تعداد سیم‌پیچ ترانسفورماتور؛
- Nu : عدد بی‌بعد ناسلت؛
- P : فشار Pa ؛
- Pr : عدد بی‌بعد پرانتل؛
- q : شار حرارتی $\frac{w}{m^2}$ ؛
- Ra : عدد بی‌بعد رایلی؛
- Re : عدد بی‌بعد رینولدز؛
- T : درجه حرارت $^\circ C$ ؛
- V : سرعت $\frac{m}{s}$ ؛
- V_{in} : ولتاژ القاء شده؛



شکل ۱۲. نتایج مربوط به آزمون اندازه‌گیری رسانایی و مقاومت حرارتی نمونه‌های منتخب.

نتایج آنالیزهای حرارتی حاکی از بهبود قابل توجه خاصیت رسانایی حرارتی و مقاومت حرارتی برای نانوروغن‌های تولیدی است. با مشاهده نتایج ارائه شده در شکل ۱۲، مشخص می‌گردد که رسانایی حرارتی و مقاومت حرارتی تمام نانوروغن‌های تولیدی به‌طور تقریبی به ترتیب ۲۸۵٪ افزایش و ۷۵٪ کاهش داشته است.

۱۰. جمع‌بندی نتایج نهایی مطالعات شبیه‌سازی

- بر اساس نتایج به دست آمده از مراحل شبیه‌سازی اولیه و مطالعات انجام شده، همچنین با توجه به مشاهده نتایج اولیه، نکات مهمی در زمینه‌های جهت‌گیری تحقیقات در فرایند تجربی و اجرای نمونه بهبود یافته نهایی در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. این نتایج بهبود مراحل اجرایی و نمونه‌های آزمایشگاهی را تسهیل داده و امکان ارائه نمونه‌های کامل‌تر با توجه به تست‌های آزمایشگاهی را فراهم کرده است. این کارها به‌منظور بررسی و رصد کامل خواص پایه نمونه‌های قطعی انجام می‌شود؛
- ملاحظات انجام شده بر روی نمونه‌های طراحی شده و همچنین شبیه‌سازی‌های انجام شده، اطلاعات جامع در مورد نانوذرات هیبریدی و تأثیر آنها به دست آمده است. همچنین، در فرایند آزمایشگاهی، نانوذرات به‌طور کامل مورد آزمایش قرار می‌گیرند و آزمون‌های تکمیلی نیز انجام می‌شود. این کارها به‌منظور ارائه راه‌حل‌های جهت بهبود برخی از ویژگی‌هایی که کاهش یافته، مانند ولتاژ شکست، انجام می‌شوند؛
- بررسی‌های پایه‌ی شبیه‌سازی محاسباتی با آنچه در نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شده و در بحث‌های حرارتی کاملاً یکسان بوده و لذا نشان از بهبود عملکرد خنک‌کاری ترانسفورماتور توسط نانوروغن است؛
- شبیه‌سازی نانوذرات در داخل ترانسفورماتور بر اساس اصول و سلسله مراتب معادله‌های ارائه شده در جهت تشخیص عملکرد نانوذرات، کمک شایانی کرده است. با رعایت ملاحظات می‌توان به‌طور کامل فرایند آزمایشگاهی را طی کرده و نمونه‌های اصلی را تهیه کرد؛
- همان‌طور که ملاحظه شد، شبیه‌سازی نشان داد که حرارت داخل ترانسفورماتور در حضور نانوذرات موثر مانند اکسید تیتانیوم کاهش یافته و تبادل حرارتی داخل با بیرون به کمترین حد خود رسیده است؛

• زیرنویس‌ها

- $diff$: عامل نفوذی؛
 b : توده یا بالک سیال؛
 e : ذرات الکترون‌ها؛
 fr : نقطه انجماد سیال پایه روغن؛
 rh : اتلاف مغناطیسی هسته؛
 m : مقدار متوسط یا میانگین؛
 n : یون‌های بار الکتریکی منفی؛
 nf : نانو سیال روغن ترانسفورماتور؛
 p : نانو ذرات جامد؛
 P : یون‌های بار الکتریکی مثبت؛
 f : سیال پایه روغن ترانسفورماتور؛
 r : شعاع نانو ذرات.

t : زمان S ؛

x : طول مشخصه اعداد رایلی و ناسلت m .

• علائم یونانی

- α : نسبت هدایت حرارتی نانو ذرات به روغن؛
 ρ : چگالی $\frac{kg}{m^3}$ ؛
 τ : تنش برشی Pa؛
 μ : ویسکوزیته، $\frac{kg}{m.s}$ ؛
 ϕ : کسر حجمی نانو ذرات؛
 φ : شار مغناطیسی wb؛
 β : ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{^\circ C}$ ؛
 ϵ : ثابت دی الکتریک؛
 ω : سرعت زاویه‌یی $\frac{Rad}{s}$ ؛
 ∇ : عامل دیفرانسیلی Del؛
 Δ : عامل دلتا.

پانویس‌ها

- The Carrier Oil
- The Partial Discharge Inception Voltage (PDVI)
- Amorphous Graphene Sheets (a-GS)
- Nanofilled
- Feynman
- High-Shear Mixer
- دی اکسید زیرکونیوم به انگلیسی Zirconium Dioxide با نام زیرکونیا و فرمول مولکولی ZrO_2
- اکسید سریم (IV) به انگلیسی Cerium(IV) Oxide با فرمول شیمیایی CeO_2
- دی اکسید تیتانیوم به انگلیسی Titanium Dioxide همچنین به عنوان تیتانیوم ۴ اکسید یا تیتانیا با فرمول شیمیایی TiO_2
- Al_2O_3
- Exfoliated Hexagonal-Boron Nitride (Eh-BN)
- Additive
- Inhibited
- Hysteresis
- Maxwell-Ampere's law
- Faraday's law
- Gause's law
- Nusselt number
- Rayleigh number

منابع (References)

- Maxwell, J.C., 1873. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford: Clarendon Press. 1. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511709333>.
- Wang, X.Q. and Mujumdar, A.S., 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids: A review. *Int. J. Therm. Sci.*, 46, pp.1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>.
- Moghanlou, F.S., Khorrami, A.S., Esmailzadeh, E. and Vajdi, M., 2021. Effect of strong electric field on heat transfer enhancement in a mini channel containing Al_2O_3 /oil nanofluid. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43:149, pp.1-13. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02869-x>.
- Choi, S.U.S. and Eastman, J.A., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles argonne national lab. IL (United States).
- Bhumia, M.M., Panigrahi, K., Das, S., Chattopadhyay, K.K. and Chattopadhyay, P., 2018. Amorphous graphene - Transformer oil nanofluids with superior thermal and insulating properties. *Carbon*, 139, pp.1010-1019. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.012>.
- EPRI Portfolio., 2007. Transmission reliability and performance:37.002, transformer life extension, <http://www.epri.com/portfolio>.
- Samy, A.M., Ibrahim, M.E., Abd-Elhady, A.M., Izzularabb, M.A., 2020. On electric field distortion for breakdown mechanism of nanofilled transformer oil. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 117, pp.1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105632>.
- Dean, S.W., Mansoori, G.A. and Fauzi Soelaiman, T.A., 2005. Nanotechnology 2014 an introduction for the standards community. *J. ASTM Int*, 2(6), pp.13110-13122. <https://doi.org/10.1520/JAI13110>.
- Choi, S.U.S. and Eastman, J.A., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 66, Washington, DC, USA, pp.99-105, 199.
- Rajnak, M., Timko, M., Kopcansky, P., Paulovicova, K., Kuchta, J., Franko, M., Kurimsky, J., Dolnik, B. and Cimbala, R., 2019. Transformer

- oil-based magnetic nanofluid with high dielectric losses tested for cooling of a model transformer, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 26, pp.1343-1349. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008047>.
11. Yu, W. and Xie, H., 2011. A review on nanouids: Preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012, pp.1-17. <https://doi.org/10.1155/2012/435873>.
 12. Dombek, G., Nadolny, Z. and Przybytek, P., 2014. The study of thermal properties of mineral oil and synthetic ester modified by nanoparticles TiO₂ and C60. ICHVE, pp.1-4.
 13. Avdeev, M.V., Balasoju, M., Aksenov, V.L. Garamus, V.M., Kohlbrecher, J., Bica, D. and Vekas, L., 2004. On the magnetic structure of magnetite/oleic acid/benzene ferrofluids by small-angle neutron scattering. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 270(3), pp.371-379. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.08.032>.
 14. Suri Babu, G. and Chiranjeevi, T., 2019. Synthesis and application of CeO₂ and ZrO₂ nanoparticles for enhancement of dielectric strength of transformer oil. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng. (IJITEE)*, 8(9), ISSN:2278-3075. <http://dx.doi.org/10.35940/ijitee.H7408.078919>.
 15. Diao-Eldin, A.M., Elaseed, A.M. and Izzularab, M.A., 2016. The role of interfacial zone in dielectric properties of transformer oil-based nanofluid. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 23(6), <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005697>.
 16. Baruah, N., Maharana, M. and Dey, S.S., 2019. Nanoparticle polarization effect on the permittivity of the dielectric liquid. In: *IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Roma, Italy. pp.23-27.
 17. Hessien, M.M., Sabiha, N.A., Ghoneim, S.S.M. and Alahmadi, A.A., 2017. Enhancement of dielectric characteristics of transformer oils with nanoparticles. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 12(24), ISSN 0973-4562, pp.15668-15673. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.16376.34565>.
 18. Pourpasha, H., Zeinali Heris, S. and Mohammadpourfard, M., 2023. The effect of TiO₂ doped multi-walled carbon nanotubes synthesis on the thermophysical and heat transfer properties of transformer oil: A comprehensive experimental study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 41, pp.1-19. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102607>.
 19. Alizadeh, H., Pourpasha, H., Zeinali Heris, S. and Estell', P., 2022. Experimental investigation on thermal performance of covalently functionalized hydroxylated and non-covalently functionalized multi-walled carbon nanotubes/transformer oil nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering*. 31, pp.1-16. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101713>.
 20. Ataei, M., Moghanlou, F.S., Noorzadeh, S., Vajdi, M. and Shahedi Asl, M., 2020. Heat transfer and flow characteristics of hybrid Al₂O₃/TiO₂-water nanofluid in a minichannel heat sink. *Heat Mass Transfer*, 56, pp.2757-2767. <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-020-02896-9>.
 21. O'Sullivan F., Hwang, J.G., Zahn, M., Olof Hjortstam, O., Pettersson, L., Liu, R. and Biller, P., 2008. A model for the initiation and propagation of positive streamers in transformer oil. In: *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp.210-214. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4570312_authors#authors.
 22. Hasan M.I., 2017. Using the transformer oil-based nanofluid for cooling of power distribution transformer. *Int. J. Energy Environ*, 8(3), pp.229-238.
 23. Zhang, Y., Ho, S.L., Fu, W., Yang, X., Wu, H., Yang, H. and Jie, Y., 2019. Numerical study on nanofluids natural convection heat transfer inside power transformer windings. *AIP Advances*, 9, pp.1-5. <https://doi.org/10.1063/1.5130146>.
 24. Zhang, Y., Ho, S.L., Fu, W., Yang, X. and Wu, H., 2019. Numerical study on natural convective heat transfer of nanofluids in disc-type transformer windings. *IEEE Access, Multidisciplinary Rapid Review Open Access Journal*, 7, pp.51267-51275. <http://hdl.handle.net/10397/87623>. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911712>.
 25. Mehrvarz, B., Bahadori, F. and Zolfaghari Moghadam, S., 2019. Heat transfer enhancement in distribution transformers using TiO₂ nanoparticles. *Advanced Powder Technology*, 30(2), pp.221-226. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.10.026>.
 26. Taghikhani, M.A., 2012. Power transformer winding thermal analysis considering load conditions and type of oil. *International Journal of Material and Mechanical Engineering*, 1(6), pp.108-113.
 27. Guan, W., Jin, M., Fan, Y., Chen, J., Xin, P., Li, Y., Dai, K., Zhang, H., Huang, T. and Ruan, J., 2014. Finite element modeling of heat transfer in a nanofluid filled transformer. *IEEE Trans. Magn*, 50, pp.3-4. doi: 10.1109/TMAG.2013.2279479.