



کاهش دمای نقطه داغ یک ترانسفورماتور روغنی با استفاده از لوله های حرارتی

محمد مصطفی غفوریان^۱، نیکان صلاحی^۲ و حمید نیازمند^{۳*}

^۱استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

^۲دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

^۳استاد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

چکیده

ترانسفورماتورها یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین تجهیزات در شبکه قدرت هستند. طول عمر و کارکرد مطلوب آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. دمای نقطه داغ این تجهیز در مقدار طول عمر ترانس نقشی کلیدی ایفا می‌کند. افزایش بیش از حد دمای نقطه داغ باعث کاهش کیفیت روغن و پیری عایق و در نتیجه کاهش طول عمر ترانسفورماتور می‌شود. روش‌های مختلفی برای کاهش دمای نقطه داغ وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از روش غیر فعال لوله حرارتی است که نقش موثری در کاهش دمای نقطه داغ داشته است. با این حال استفاده از لوله حرارتی در فضای درون ترانسفورماتور مشکلاتی از جمله ایجاد اختلال در عملکرد الکتریکی آن به وجود می‌آورد؛ لذا در این پژوهش به بررسی تجربی اثرات حرارتی لوله حرارتی در داخل و خارج از تانک روغن بر عملکرد حرارتی ترانسفورماتور به صورت تجربی پرداخته می‌شود و در نهایت به قیاس نتایج بدست آمده پرداخته خواهد شد. نتایج نشان داد که می‌توان با نصب لوله حرارتی در خارج از ترانسفورماتور بر روی رادیاتورها، دمای نقطه داغ را حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد کاهش داد که نرخ پیری متناظر با آن تا ۰/۱۷ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور؛ دمای نقطه داغ؛ لوله حرارتی.

Reduce the hot-spot temperature of an oil transformer using a heat pipe

Mohammad Mustafa Ghafurian¹, Nikan Salahi² and Hamid Niazmand^{3,*}

¹Assist. Prof., Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

²B.Sc. Student, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

³Prof, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Abstract

Transformers are one of the most significant and sensitive tools in the electrical grid. Their life and optimal operations are very imperative. The hot-spot temperature of this equipment plays a crucial role in the life of the transformer. Increasing hot spot temperature reduces the oil quality and aging of the insulation, ultimately, the life of the transformer. There are several ways to reduce the hot-spot temperature. One of these techniques is the passive cooling system via heat pipe, which has played an effective role in reducing the hot-spot temperature. However, using heat pipes in the space inside the transformer causes problems, including disruption of its electrical performance. Therefore, in this research, the thermal effects of the heat pipe inside and outside the oil tank on the thermal performance of the transformer are investigated experimentally, and finally the obtained results are compared. The results showed that by installing the heat pipe outside the transformer on the radiators, the temperature reduction of the hot spot reached 12 degrees Celsius, which reduces the corresponding aging rate to 0.17.

Keywords: Transformer, Hot-spot temperature; Heat pipe

* نویسنده مسئول؛ تلفن: فکس:

آدرس پست الکترونیک: hniazmand@yahoo.com

۱- مقدمه

ترانسفورماتور یکی از مهم ترین اجزای شبکه ی قدرت است. کارکرد صحیح و مطلوب این شبکه تا حدود زیادی به عملکرد و طول عمر ترانسفورماتور بستگی دارد [۱، ۲]. افزایش دمای ترانسفورماتور تا دمای بحرانی (T_{st}) یا بیشتر از آن موجب آسیب رساندن به عایق سیم پیچ و کاهش کیفیت روغن ترانس می شود که در نهایت منجر به کاهش طول عمر ترانسفورماتور می شود. ظرفیت بارگزاری یک ترانسفورماتور رابطه ی مستقیم با عملکرد خنک کاری یک ترانسفورماتور دارد، زیرا با افزایش بارگزاری، تلفات ترانسفورماتور (تلفات هیستریزس، تلفات فوکو و تلفات جریان سیم پیچ) افزایش یافته و دمای نقطه داغ ترانسفورماتور (T_{ht}) افزایش می یابد، در نتیجه ترانس نیاز به خنک کاری بیشتری خواهد داشت [۳، ۴].

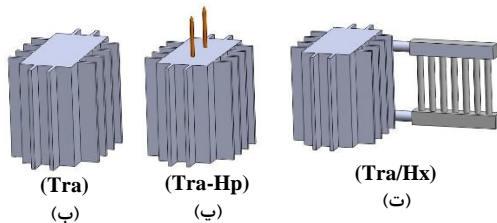
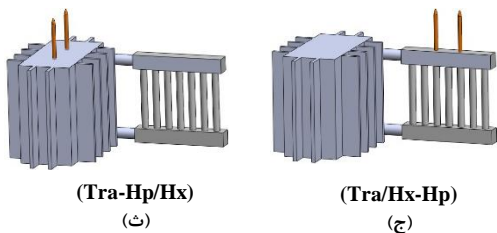
تاکنون مطالعات زیادی به منظور خنک کاری این تجهیز در شرایط مختلف [۵-۷] به همراه مکانیسم های مختلف انتقال حرارت [۸-۱۰] انجام گرفته است، به عنوان مثال روش هایی نظیر استفاده از میدل حرارتی هوایی [۱۱]، رادیاتور [۱۲]، فن [۱۳، ۱۴]، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده میکروکپسول [۱۵]، سیالات مغناطیسی [۱۶]، تغییر هندسه پره ها [۱۷] و روغن های ضایعاتی [۱۸] در خنک کاری ترانسفورماتور مطالعه شده اند؛ اما توجه کمتری بر استفاده از روش های غیرفعال به خصوص استفاده از لوله های حرارتی [۱۹، ۲۰] در کاهش دمای نقطه داغ ترانسفورماتورها شده است. به عنوان نمونه روساز و همکارانش [۲۱] در پژوهشی دمای نقطه داغ در ترانسفورماتور ONAN را همراه با لوله حرارتی بررسی کردند. نتایج آن ها پس از نصب دو عدد لوله حرارتی ترموسیفونی در بالای ترانس نشان داد که تا ۲۰٪ گرمای تولید شده (اتلافات ترانس) را می توان منتقل کرد. دوتا و همکاران [۲۲] با استفاده از حرارت تولید شده توسط یک المان حرارتی ۲۵ کیلوواتی در اطراف یک لوله ی حرارتی ترموسیفونی، اتلافات یک ترانسفورماتور قدرت را مدل کردند. لوله ی حرارتی دارای قطر خارجی ۱۶ میلی متر، طول اواپراتور ۲۱۰ میلی متر و طول کندانسور ۷۵۰ میلی متر بود که از دو جنس آلومینیوم و استیل با سیال کاری استون استفاده شد. نتایج آن ها نشان داد که لوله ی حرارتی با جنس آلومینیوم دارای عملکرد بهتری است. در حقیقت آن ها در این پژوهش تنها به بررسی عملکرد لوله ی حرارتی پرداخته و هیچ گونه مطالعه حرارتی بر روی ترانسفورماتور انجام ندادند. در

پژوهشی دیگر نیو و همکاران [۲۳] عملکرد لوله ی حرارتی ترموسیفونی را در دفع حرارت اتلافی از یک ترانسفورماتور خشک آزمایشگاهی، به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش از ۲۴ لوله ی حرارتی ترموسیفونی مسی با سیال کاری آب، در درون ترانسفورماتور و دو لوله ی حرارتی حلقه ای با سیال فلئوئورکربن در خارج آن استفاده شد. نتایج آن ها نشان داد، سیستم طراحی شده قادر بود افزایش دمای هوا در لایه های بالایی تانک را تا حد موثری کاهش دهد؛ اما از مشکلات این سیستم می توان به پیچیدگی نصب لوله های حرارتی در میان اجزاء فعال در این سیستم اشاره نمود؛ زیرا که از دو نوع سیستم انتقال حرارت استفاده شده بود. در پژوهش دیگر این گروه [۲۴] عملکرد حرارتی یک ترانسفورماتور روغنی مدل شده با توان ۲۵۰۰ وات را با استفاده از لوله ی حرارتی ساده مورد ارزیابی قرار دادند. حرارت اتلافی توسط ۳ گرمکن با توان ۸۵۰ وات تامین و دفع آن از طریق یک حلقه ی حرارتی با سیال کاری فلئوئورکربن انجام شد. اواپراتور حلقه ی حرارتی یک لوله به قطر ۱۶ و طول ۵۰۰ میلی متر بود که در درون روغن و نزدیک دیواره های تانک قرار می گرفت و عمل خنک کاری کندانسور لوله حرارتی ها توسط رادیاتور انجام می شد. هدف از این پژوهش، بررسی اثر تعداد کانال های رادیاتور در دمای روغن و یافتن تعداد بهینه ی آنها در کاهش دمای لایه های بالایی روغن بود. نتایج آن ها نشان داد که برای ترانسفورماتور مورد بررسی، تعداد بهینه کانال های رادیاتور ۶ عدد است. از پژوهش های دیگر مربوط به استفاده از تکنولوژی لوله ی حرارتی در خنک کاری ترانس می توان به نیو و همکاران [۲۵] و لخمانتس و همکاران [۲۶] اشاره کرد. نتایج این دو پژوهش نشان داد که با کمک خنک کاری جابجایی اجباری در کندانسور لوله های حرارتی در بهترین حالت می توان دمای نقطه داغ را تا حدود ۹ [۲۵] و ۱۱ [۲۶] درجه ی سانتی گراد کاهش داد.

همانطور که از پژوهش های پیشین مشاهده می شود، لوله های حرارتی ساده در بهبود سیستم خنک کنندگی ترانسفورماتور نقش موثری دارند، اما هیچ کدام از این پژوهش ها به محل قرارگیری این تجهیز دقت نداشته اند، زیرا که یکی از مشکلات این مکانیزم محل قرارگیری آن نزدیک اجزای فعال است. نصب لوله های حرارتی درون محفظه ترانسفورماتور مشکلاتی نظیر تخلیه الکتریکی و اختلال در میدان های



(الف)

(Tra)
(ب)(Tra-Hp)
(ب)(Tra/Hx)
(ت)(Tra-Hp/Hx)
(ث)(Tra/Hx-Hp)
(ج)

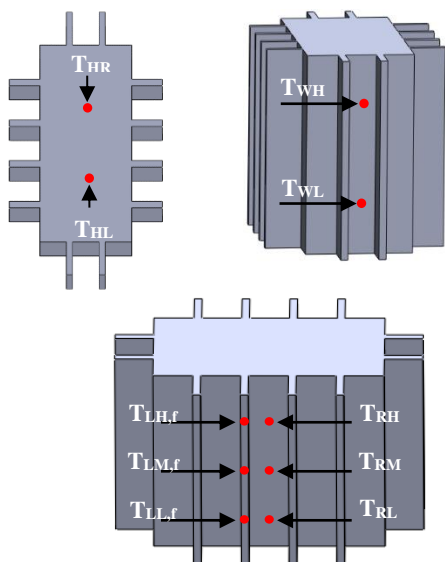
شکل ۱- (الف) تصویر واقعی و شماتیک مختلف ترانسفورماتور از جمله (ب) ترانس تنها (Tra)، (پ) با لوله حرارتی بر روی ترانس (Tra-Hp)، (ت) با رادیاتور (Tra/Hx)، (ث) با لوله حرارتی بر روی ترانس با وجود رادیاتور متصل به آن (Tra-Hp/Hx)، (ج) با لوله حرارتی بر روی رادیاتور متصل به ترانس (Tra/Hx-Hp)

الکتریکی و مغناطیسی ایجاد می‌کند که عملکرد مناسب ترانسفورماتور را در دراز مدت کاهش خواهد داد. از طرفی دیگر بررسی تکنولوژی اخیر لوله‌های حرارتی به ویژه لوله‌های حرارتی و یک دار (Sintered) در سیستم خنک‌کنندگی ترانسفورماتور با حفظ عملکرد از خلاء های دیگر این حوزه به حساب می‌آید. از این رو در این پژوهش به مطالعات تجربی عملکرد یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی و اثر حرارتی لوله‌های حرارتی در داخل و خارج از تانک روغن پرداخته می‌شود. برای این منظور عملکرد یک ترانسفورماتور تنها (Tra) با دو عدد لوله حرارتی مدل و یک‌دار در حالات مختلف شامل ترانس با لوله حرارتی بر روی آن (Tra-Hp)، ترانس با رادیاتور (Tra/Hx)، ترانس با لوله حرارتی بر روی آن با وجود رادیاتور (Tra-Hp/Hx)، ترانس با لوله حرارتی بر روی رادیاتور متصل به آن (Tra/Hx-Hp) مطالعه می‌شوند و در نهایت به مقایسه عملکردی سیستم پرداخته می‌شود تا بهترین روش معرفی گردد.

۲- مجموعه آزمایشگاهی، تجهیزات و مواد

مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش شامل یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی با ظرفیت تانک روغن ۵ لیتری است که شرایط عملکرد حرارتی یک ترانسفورماتور واقعی در بار کامل و جزئی را می‌تواند مهیا نماید؛ همچنین مجموعه آزمایشگاهی شامل یک رادیاتور هفت لوله‌ای با حجم ۱/۵ لیتری است که جهت قرارگیری لوله‌های حرارتی در داخل آن مشابه رادیاتورهای ترانس واقعی طراحی شده است [۲۷]. شکل ۱ شماتیک این مجموعه را همراه با محل قرارگیری لوله های حرارتی نشان می‌دهد. این مجموعه قابلیت قرارگیری تحت بارهای مختلف با تنظیم ولتاژ را دارد که در این مقاله کلیه تست‌ها تحت شار حرارتی یکسان در همه تست‌ها انجام شده است که نمودار توان آن در شکل ۲ برای مدت زمان تست نشان داده شده است.

۴۰ سانتی متری از ترانس قرار گرفته تا اثرات انتقال حرارت ترانس بر آن کاهش یابد.



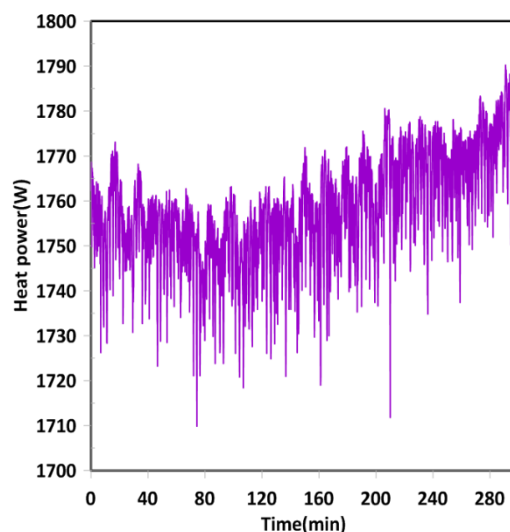
شکل ۳- محل قرارگیری سنسورها در تانک ترانسفورماتور

۳- روش انجام آزمایش

به منظور ثبات تقریبی روند دمای محیط و همچنین وزش باد و شدت نور خورشید، همه ی تست ها در روزهای متوالی و ساعات مشخص انجام شده است. برای این هدف، کلیه اندازه گیری ها بین ساعت ۱۰ صبح تا ۱۵ عصر به مدت ۵ ساعت انجام گرفته است. تست ها با قرار دادن ترانسفورماتور در شرایط مختلف از جمله ترانس تنها (Tra)، استفاده از لوله حرارتی بر روی ترانس (Tra-Hp)، استفاده از رادیاتور (Tra/Hx)، استفاده از لوله حرارتی بر روی ترانس با وجود رادیاتور متصل به آن (Tra-Hp/Hx)، استفاده از لوله حرارتی بر روی رادیاتور متصل به ترانس (Tra/Hx-Hp) انجام شده اند. همه آزمایش ها در محیط بسته آزمایشگاه انجام گرفته تا اثرات محیطی به حداقل کاهش یابد.

۴- بحث و نتایج

به منظور بررسی روش های خنک کاری غیر فعال که در بخش روش انجام آزمایش ذکر شد، ابتدا مجموعه آزمایشگاهی در

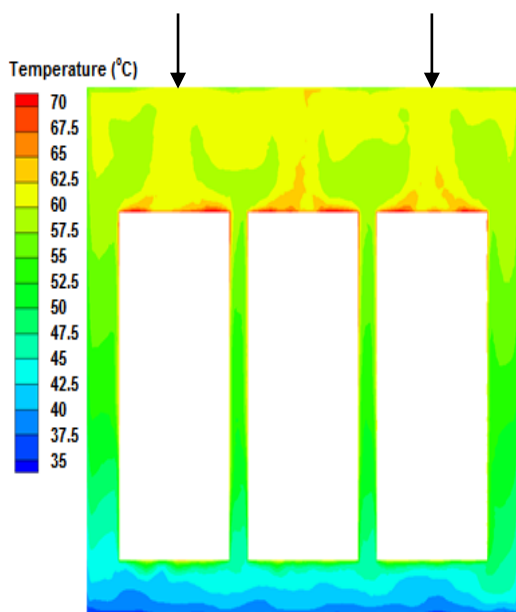
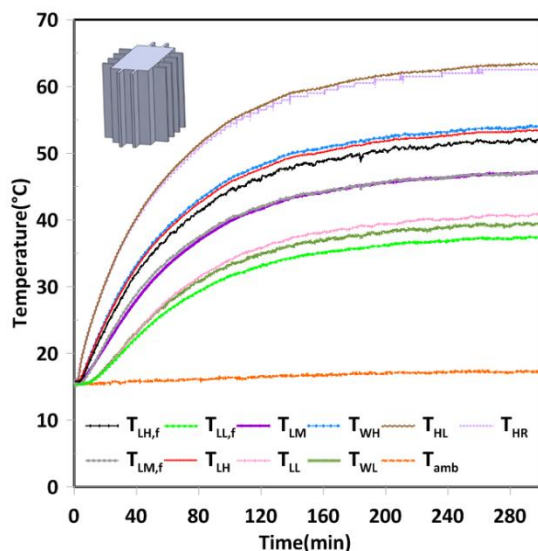


شکل ۲- نمودار تغییر توان اعمال شده بر ترانس در هر تست

در کلیه تست ها سیستم در ارتفاع ۱/۵ متری از سطح زمین توسط یک پایه فلزی قرار گرفته تا شرایطی مشابه عملکرد یک ترانسفورماتور واقعی برای انجام آزمایش ها فراهم شود. روغن به کار رفته در ترانسفورماتور، روغن معدنی (MO) معمولی است که در ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ نیز استفاده می شود. دو عدد لوله حرارتی صاف با ساختار و یکدار، با سیال عامل آب و ۶۰ درصد پرشدگی به طول و قطر ۳۰ و ۱۰ میلی متر ساخت کشور چین جهت بررسی عملکرد در خنک کاری ترانس استفاده شده است. طول بخش اواپراتور ۸۰ میلی متر، طول بخش عایق ۱۲۰ میلی متر و طول بخش کندانسور ۱۰۰ میلی متر است.

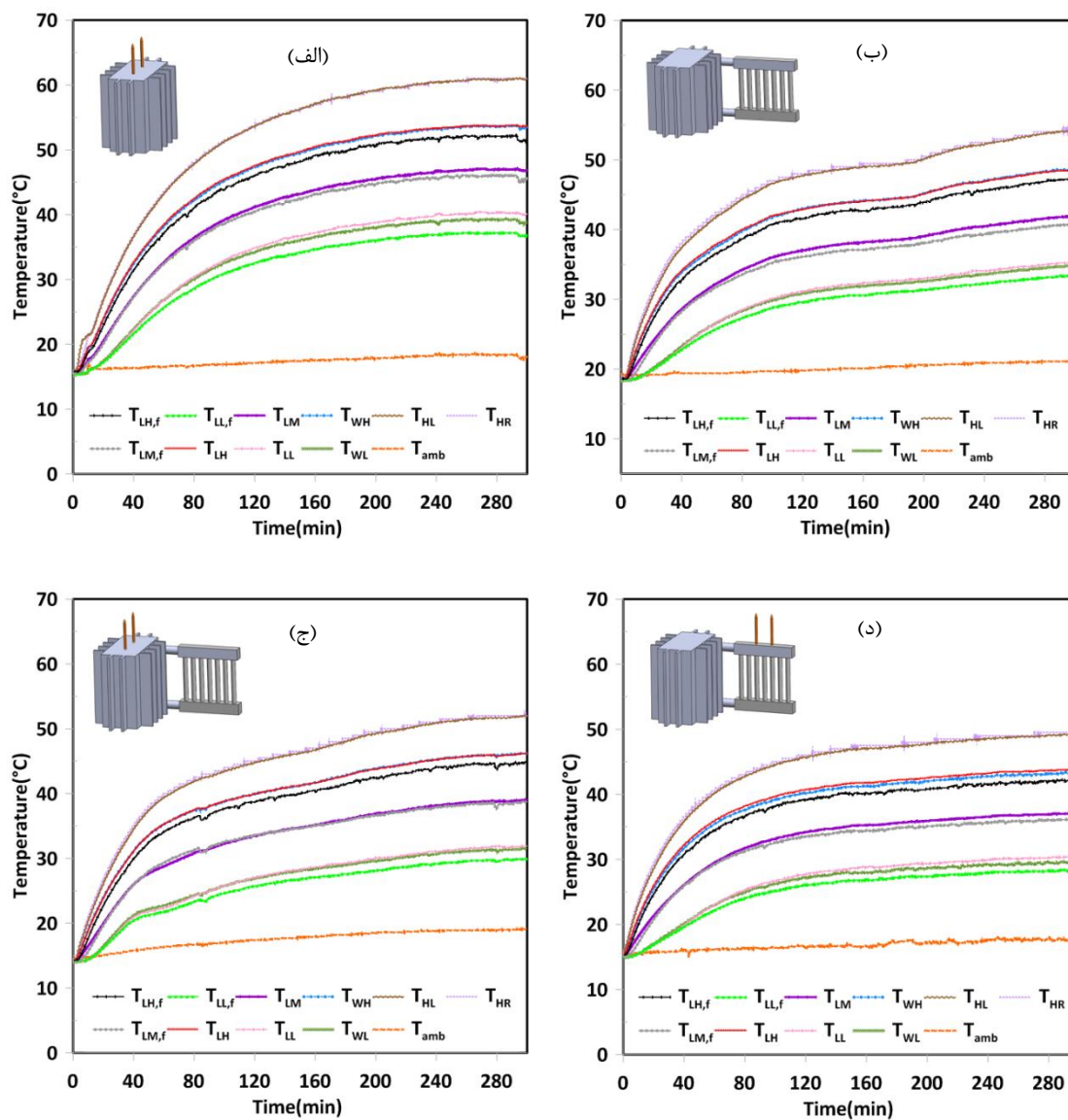
مطابق با شکل ۳ ده عدد سنسور دمایی مدل Ds18b20 با دقت ۰/۵ درجه سلسیوس به منظور گزارش دمای نقاط مختلف روغن ترانسفورماتور در پره ها، پایه آن ها و همچنین یک سنسور به منظور گزارش دمای محیط ترانسفورماتور در نظر گرفته شده است. به طوری که سنسورهای $T_{LH,f}$ و $T_{LM,f}$ و $T_{LL,f}$ دمای روغن در پره های ترانس در قسمت طولی، سنسورهای T_{RH} ، T_{RM} و T_{RL} دمای روغن تانک در ارتفاعات مختلف در قسمت طولی و سنسورهای T_{WH} و T_{WL} دمای روغن تانک در قسمت عرضی ترانسفورماتور را اندازه گیری می کنند؛ همچنین دو سنسور T_{HR} و T_{HL} در قسمت فوقانی تانک ترانسفورماتور قرار گرفته و دمای نقطه داغ را اندازه گیری می کنند. سنسور T_{amb} نیز برای دمای محیط در نظر گرفته شده است که در فاصله

نامنظم در نرم افزار کامسول، در حالت عملکرد پایا با انتقال حرارت طبیعی و جریان آرام بعد از اعتبار سنجی با مرجع [۲۸] (برای یک ترانسفورماتور روغنی ۲۰۰ کیلو ولت آمپر) صورت گرفته است. برای مدل کردن نیروی شناوری و اثرات آن از رابطه تغییرات چگالی بر حسب دما و از نتایج مرجع [۲۸] استفاده شده است.



شکل ۴ - (الف) دمای مطلق نقاط مختلف ترانسفورماتور در حالت تست پایه (ب) کانتور دمای مربوط به مدل سازی عددی ترانس آزمایشگاهی در حالت پایه

حالت پایه (Tra) در محیط آزمایشگاه تحت بار مطابق شکل ۲ تست شد. این تست بعنوان تست مرجع استفاده شده و تاثیرات روش‌های مختلف بر دمای نقطه داغ ترانسفورماتور مورد بررسی و مقایسه قرار خواهد گرفت. داده‌های دمایی مربوط تست پایه در شکل ۴ (الف) ارائه شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، دمای نشان داده شده در نمودار، دمای مطلق است و پس از گذشت ۵ ساعت دمای نقاط مختلف ترانسفورماتور پایدار شده و تغییرات دمایی به سمت صفر میل کرده است. با توجه به نتایج بدست آمده در این تست و مدت زمان مورد نیاز برای پایداری دمای نقاط مختلف ترانسفورماتور، مابقی تست‌ها با این مدت زمان انجام می‌شوند. شایان به ذکر است که سنسورهای $T_{LL,f}$ و $T_{LM,f}$ ، $T_{LH,f}$ به ترتیب با فواصل برابر از بالا تا پایین سطح پره در سمت طولی ترانسفورماتور قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل ۴ (الف) مشاهده می‌شود، روند افزایش دمای سنسور $T_{LH,f}$ از دو سنسور دیگر بیشتر و همچنین افزایش دمای سنسور $T_{LM,f}$ از سنسور $T_{LL,f}$ بیشتر است که با توجه به روند انتقال حرارت همرفت طبیعی در روغن داخل ترانسفورماتور انتظار می‌رفت که دمای ترانسفورماتور از کف به سمت سقف آن افزایش یابد. این روند در مابقی سنسورها نیز مشاهده می‌شود. به طوری که سنسورهای T_{RH} ، T_{RM} و T_{RL} نیز که در ارتفاع یکسان با سه سنسور $T_{LH,f}$ ، $T_{LM,f}$ ، $T_{LL,f}$ در پایه پره‌ها قرار گرفته‌اند، روندی مشابه خواهند داشت؛ اما دمای ثبت شده‌ی آن‌ها کمتر از دمای متناظر در پایه پره است که این نشان از اهمیت پره در خنک کاری و کاهش دمای روغن ترانسفورماتور است. سنسورهای T_{WH} و T_{WL} که به ترتیب در فواصل برابر از سطح و کف ترانسفورماتور قرار گرفته‌اند، دمای پایه پره‌ها در قسمت عرضی ترانسفورماتور را نشان می‌دهند. همانطور که مشهود است، روند دمایی ثبت شده توسط این دو سنسور با سنسورهای $T_{LL,f}$ و $T_{LH,f}$ که در ارتفاع برابر این سنسورها و در قسمت طولی ترانسفورماتور قرار گرفته‌اند، تقریباً مشابه است. با توجه به شکل ۴ (الف) سنسورهای T_{HL} و T_{HR} که در قسمت فوقانی (سقف) ترانسفورماتور قرار گرفته‌اند، به عنوان دمای نقطه داغ ترانسفورماتور در نظر گرفته خواهند شد؛ زیرا که مطابق بررسی‌های عددی انجام شده در شکل ۴ (ب) این نقاط بیشترین دما را به خود اختصاص داده‌اند. شایان به ذکر است که مدل سازی عددی ترانس آزمایشگاهی با پیش فرض مش



شکل ۵ - دمای مطلق نقاط مختلف ثبت شده از ترانسفورماتور در حالت های (الف) Tra-Hp، (ب) Tra/Hx، (ج) Tra-Hp/Hx (د)

Tra/Hx-Hp

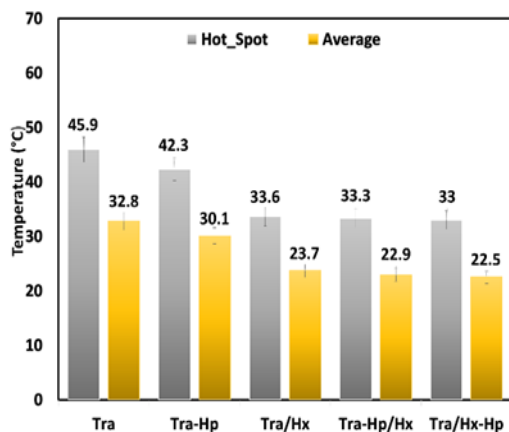
درجه سانتیگراد متغیر است. با توجه به اینکه تمامی تست ها در روزهای متوالی انجام شده و دمای هوا تقریباً ثابت بوده، این بازه دمایی برای محیط قابل تعمیم به تمامی تست ها است.

شکل ۵ (الف تا د) به ترتیب نتایج دمای مطلق تست های ترانسفورماتور با لوله حرارتی نصب شده (Tra-Hp)، به همراه

از مقایسه شکل ۴ (الف) و (ب) مشاهده می شود، بیشترین دما با مقدار ۶۳/۴ درجه سانتیگراد توسط سنسور T_{HL} ثبت شده است که در حقیقت دمای نقطه داغ را حدود ۴۵/۹ درجه سانتیگراد نسبت به لحظه شروع تست تا زمان پایداری افزایش داده است؛ همچنین سنسور T_{amb} که دمای محیط را نشان می دهد، در بازه زمانی تست از ۱۵/۴ تا ۱۷/۵

برای دمای هات اسپات و میانگین دمای بالک سیال روغن ترانس نسبت به تست پایه نشان می‌دهد. می‌توان دریافت که تغییرات دمای بالک سیال با تغییرات دمای نسبی نقطه داغ متناظر است و این تغییرات با حدود یک درصد کمتر به علت احتساب میانگین دمای بالک روغن محاسبه شده است. از طرفی از این دو شکل به راحتی می‌توان مشاهده کرد که نصب لوله حرارتی بر روی رادیاتور (Tra/Hx-Hp) و به دور از اجزای فعال نه تنها کارکرد لوله حرارتی را نسبت به نصب لوله حرارتی روی ترانسفورماتور (Tra-Hp/Hx) کاهش نمی‌دهد، بلکه می‌تواند باعث بهبود جزئی در خنک‌کاری شود که دلیل این اتفاق پایین‌تر بودن دمای کندانسور لوله‌های حرارتی است که در فاصله دورتر از نقاط داغ ترانسفورماتور قرار دارند. مراجع [۲۶، ۲۵] مویید این موضوع هستند؛ زیرا که از این روش در بهبود عملکرد لوله حرارتی استفاده شده است. شکل ۷ نرخ پیری کاغذ عایق ترانسفورماتور مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد. نتایج مربوط به این شکل توسط رابطه (۱) بر اساس استاندارد ۶۰۰۷۶ [۲۹] IEC محاسبه شده است؛ زیرا که این پارامتر رابطه مستقیمی با عمر ترانسفورماتورها دارد.

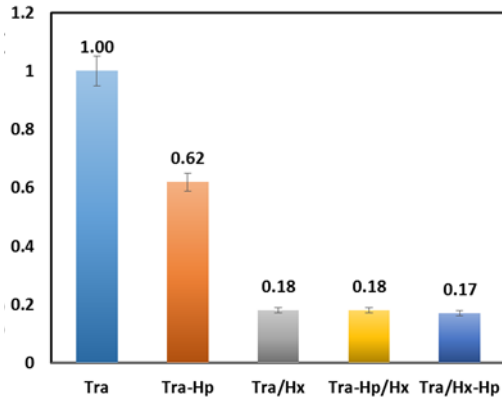
$$F_{AAT}(t) = e^{\left(\frac{15,000}{T_{st}+273} - \frac{15,000}{T_{hs}(t)+273}\right)} \quad (1)$$



رادیاتور (Tra/Hx)، رادیاتور با لوله حرارتی (Tra-Hp/Hx) و ترانسفورماتور به همراه رادیاتور با لوله حرارتی نصب شده بر روی رادیاتور (Tra/Hx-Hp) را نشان می‌دهد. هر چند آزمایش‌ها در محیط کنترل شده آزمایشگاه صورت گرفته است، اما به منظور مقایسه منطقی‌تر نتایج، دماها بر حسب اختلاف دمای سنسورها از محیط (سنسور دمای محیط Tamb) گزارش شده‌اند.

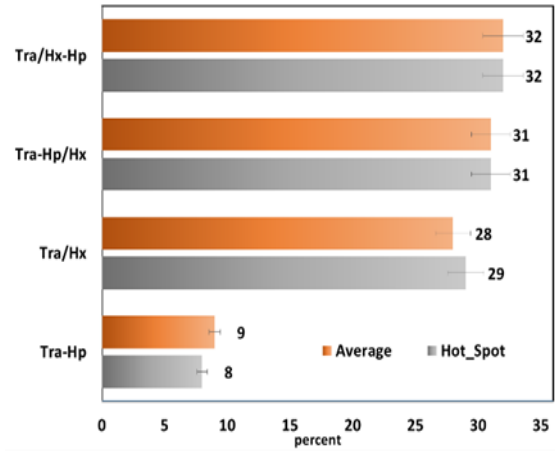
همانطور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، دمای نقاط داغ به طور میانگین در تست‌های Tra-Hp، Tra/Hx، Tra-Hp/Hx و Hp/Hx به ترتیب ۶۱/۲، ۵۴/۷، ۵۲/۳ و ۵۴/۷ درجه سانتی‌گراد ثبت شد. در حالی که در حالت پایه (شکل ۴ (الف)) ۶۳/۴ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد؛ بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری نمود که با افزایش ۳۰ درصدی حجم روغن تانک با استفاده از رادیاتور به عنوان یک روش غیر فعال می‌توان دمای نقطه داغ را حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد کاهش داد. هر چند که این روش می‌تواند به عنوان یک روش غیر فعال دیگر معرفی شود، اما هدف این پژوهش مقایسه اثر لوله حرارتی در کاهش دمای نقطه داغ در داخل و خارج ترانسفورماتور است؛ لذا بررسی این موضوع در پژوهشی دیگر ارائه خواهد شد.

در ادامه به منظور مقایسه بهتر اثر دمای نقطه داغ در کاربردهای مختلف مکان لوله حرارتی در ترانسفورماتور شکل ۶ (الف) و (ب) میانگین دمای بالک روغن ترانسفورماتور و درصد تاثیر هر روش خنک‌کاری تست شده بر کاهش دمای نقطه داغ نسبت به حالت پایه را نشان می‌دهد. با بررسی دقیق‌تر شکل ۶ (الف) مشاهده می‌شود که نصب لوله حرارتی بر روی ترانس تنها (Tra)، دمای نسبی نقطه داغ را ۳/۶ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد. این نتیجه مویید نتایج دیگر محققان [۲۱، ۲۲] است که لوله حرارتی به عنوان یک تجهیز خنک‌کاری غیر خودکار در ترانسفورماتورها می‌تواند معرفی شود. از طرفی با مقایسه نتایج برای دو حالت نصب لوله حرارتی بر روی ترانس با رادیاتور (Tra-Hp/Hx) و نصب لوله حرارتی بر روی رادیاتور (Tra/Hx-Hp) با حالت بدون لوله حرارتی آن (Tra/Hx)، مشاهده می‌شود که با قرار دادن لوله حرارتی در رادیاتور می‌توان حدود ۰/۳ درجه سانتی‌گراد نسبت به لوله حرارتی در ترانس با رادیاتور کاهش دما ایجاد نمود. با بررسی شکل ۶ (ب) که درصد بهبود هر روش را



شکل ۷- نرخ پیری عایق ترانسفورماتور در حالات مختلف

از عوامل مهم دیگری که در بررسی خنک‌کاری ترانسفورماتورها باید مورد بررسی قرار بگیرد، نگاه اقتصادی به روش استفاده شده در مدیریت حرارتی سیستم است. از آنجایی که در مقایسه روش‌های خنک‌کاری مختلف، مشکلات متعددی به علت تفاوت در ظرفیت سیستم‌ها و شرایط محیطی مختلف وجود دارد، لازم است مبنای قیاس به درستی انتخاب شود؛ زیرا این تفاوت‌ها منجر به دماهای نقطه داغ متفاوت و در نتیجه بر اساس ظرفیت سیستم، قیمت تمام شده برای هر روش خنک‌کاری بسیار متفاوت خواهند شد که دور از انتظار است. راه حل این موضوع بررسی همه روش‌ها در یک ترانسفورماتور با ظرفیت ثابت و تحت شرایط محیطی ثابت است. برای این منظور برخی از روش‌ها در مجموعه آزمایشگاهی این پژوهش بررسی و قیاس بر مبنای قیمت تمام شده به ازای یک درجه کاهش دمای نقطه داغ نسبی انجام شد. این هزینه شامل قیمت اجزای بکار رفته در خنک‌کاری است که در جدول ۱ بر حسب دلار آمریکا (USD) تخمین زده شده است. این پارامتر از تقسیم هزینه انجام شده برای هر روش بر مقدار افزایش دمای نقطه داغ نسبت به حالت پایه بدست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، روش‌های استفاده شده در این پژوهش هزینه کمتری نسبت به روش نانو سیال و حتی مرجع [۲۳] داشته است که دلیل این امر انتخاب تعداد، نوع و مکان مناسب لوله‌های حرارتی در ترانسفورماتور مورد مطالعه است؛ بنابراین روش پیشنهادی این پژوهش می‌تواند جز روش‌های اقتصادی و موثر در مدیریت حرارتی ترانسفورماتورها پیشنهاد شود، زیرا که با کمترین فضای اشغالی، در



شکل ۶- الف) دمای نسبی نقطه داغ و میانگین نقاط مختلف ترانسفورماتور (ب) درصد تاثیر روش‌های مختلف خنک‌کاری تست شده بر دمای نسبی نقطه داغ و دمای نسبی بالک نسبت به حالت پایه (ترانسفورماتور تنها).

در این رابطه T_{SE} با مقدار $63/4$ درجه سانتی‌گراد مربوط به دمای استاندارد نقطه داغ که متناسب با عمر مفید کاغذهای عایق ترانسفورماتور است و T_{HS} دمای نقطه داغ مربوط به نتایج تجربی تست ترانسفورماتور است که در این پژوهش معادل دماهای THL و THR است. همانطور که مشاهده می‌شود بر این اساس، نرخ پیری ترانسفورماتور در حالت تست پایه یک است. این بدین معنی است که دمای نقطه داغ ترانس با عمر در نظر گرفته شده برای آن متناسب است. مقادیر متناسب با این پارامتر برای ترانسفورماتور با لوله حرارتی نصب شده (Tra-Hp)، با رادیاتور (Tra/Hx)، همراه با لوله حرارتی بر روی آن با رادیاتور (Tra-Hp/Hx) و با لوله حرارتی نصب شده بر روی رادیاتور (Tra/Hx-Hp) به ترتیب $0/62$ ، $0/18$ ، $0/17$ و $0/18$ محاسبه شده است. این نشان می‌دهد که بیشترین افزایش عمر در روش همراه با رادیاتور و لوله حرارتی نصب شده بر روی رادیاتور (Tra/Hx-Hp) رخ خواهد داد؛ زیرا که بیشترین کاهش دمای بالک و نقطه داغ را به خود اختصاص داده است.

شرایط آزمایشگاهی و تحت بار یکسان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش‌های ترانسفورماتور با لوله حرارتی (Tra-Hp)، رادیاتور (Tra/Hx)، رادیاتور با لوله حرارتی نصب شده بر روی ترانسفورماتور (Tra-Hp/Hx) و رادیاتور با لوله حرارتی نصب شده بر روی رادیاتور (Tra/Hx-Hp) به ترتیب $7/1\%$ ، $26/8\%$ ، $27/5\%$ ، $28/1\%$ درصد دمای نسبی نقطه داغ نسبت به حالت پایه ترانس تنها (Tra) کاهش خواهند داد. به طوری که با کم اثرترین روش (T-Heat Pipe) حداقل می‌توان عمر ترانسفورماتور را حدود ۳۸ درصد مطابق با افزایش عمر کاغذهای عایق افزایش داد؛ همچنین با مقایسه نتایج مشاهده شد که با خروج لوله حرارتی از محفظه ترانسفورماتور و نصب آن بر روی رادیاتور، نه تنها از عملکرد لوله حرارتی کاسته نمی‌شود، بلکه منجر به بهبود خنک‌کاری ترانسفورماتور خواهد شد.

۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) سپاسگزارند. (INSF/Grant no. 99022029)

۷- علائم انگلیسی

$T_{LH,f}$	سنسور بالای پره در قسمت طولی ترانس
$T_{LM,f}$	سنسور وسط پره در قسمت طولی ترانس
$T_{LL,f}$	سنسور پایین پره در قسمت طولی ترانس
T_{RH}	سنسور بالای پایه در قسمت طولی ترانس
T_{RM}	سنسور وسط پایه پره در قسمت طولی ترانس
T_{RL}	سنسور پایین پایه پره در قسمت طولی ترانس
T_{WH}	سنسور بالای پایه پره در قسمت عرضی ترانس
T_{WL}	سنسور پایین پایه پره در قسمت عرضی ترانس
T_{HL}	سنسور سمت چپ بالای ترانس
T_{amb}	سنسور دمای محیط
T_{HR}	سنسور سمت راست بالای ترانس
Tra	ترانسفورماتور

نزدیکترین محل تولید حرارت اتلافی، قابل نصب بوده و قادر است این حرارت را با حداکثر سرعت و به صورت خودکار به محیط بیرون منتقل کند. هرچند که همانند سایر روش‌ها چالش‌هایی در این روش وجود دارد، نظیر حضور جسم فلزی در نزدیکی سیم پیچ‌ها که آن را می‌توان با ساخت لوله حرارتی‌های سرامیکی و نیز نصب در خارج محدوده‌ی نا امن (هدف این پژوهش) رفع کرد.

جدول ۱- تخمین هزینه تمام شده به ازای هر درجه کاهش دمای نسبی نقطه داغ نسبت به حالت پایه بر

حسب دلار آمریکا (USD)

مرجع	روش خنک کاری	تجهیزات مورد استفاده	هزینه انجام شده به ازای هر درجه کاهش ($^{\circ}\text{C}/\text{\$}$)
مطالعه حاضر	Tra-Hp	۲ عدد لوله حرارتی	۲/۴۲
مطالعه حاضر	Tra/Hx	رادیاتور و اتصالات	۱/۷۳
مطالعه حاضر	Tra-Hp/Hx	رادیاتور و ۲ عدد لوله حرارتی	۲/۱۷
مطالعه حاضر	Tra/Hx-Hp	رادیاتور و ۲ عدد لوله حرارتی	۲/۱۲
مطالعه حاضر	نانوسیال حاوری نانوذرات MWCNT	۰/۰۵ گرم به ازای هر لیتر نانوذره و خدمات آلتراسونیک	۵/۳
[۲۳]	۲۴ لوله‌ی حرارتی ترموسیفونی مسی با سیال کاری آب	۲۴ لوله‌ی حرارتی ترموسیفونی و ...	۴/۸

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تجربی روش‌های غیر فعال ترانسفورماتور با لوله حرارتی (Tra-Hp)، ترانسفورماتور به همراه رادیاتور (Tra/Hx)، ترانسفورماتور به همراه رادیاتور با لوله حرارتی نصب شده بر روی ترانسفورماتور (Tra-Hp/Hx) و ترانسفورماتور به همراه رادیاتور با نصب لوله حرارتی بر روی رادیاتور (Tra/Hx-Hp) پرداخته شد. کلیه‌ی تست‌ها در

- [10] M. Rahman, H. F. Öztop, A. Ahsan, M. Kalam, and Y. Varol (2012) "Double-diffusive natural convection in a triangular solar collector," *Int. com. in Heat and Mass Tra.*, vol. 39, no. 2, pp. 264-269.
- [11] R. M. Hannun, S. H. Hammadi, and M. H. Khalaf (2019) "Heat transfer enhancement from power transformer immersed in oil by earth air heat exchanger," *Thermal Science*, vol. 23, no. 6 Part A, pp. 3591-3602.
- [12] Y. J. Kim and M. Y. Ha (2017) "A study on the performance of different radiator cooling systems in large-scale electric power transformer," *Mech. Science and Tech.*, vol. 31, no. 7, pp. 3317-3328.
- [13] M. A. Taghikhani and M. R. Afshar (2021) "Fans arrangement analysis in oil forced air natural cooling method of power transformer radiator," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power and Energy*, vol. 235, no. 4, pp. 904-913.
- [14] Y. J. Kim, M. Jeong, Y. G. Park, and M. Y. Ha (2018) "A numerical study of the effect of a hybrid cooling system on the cooling performance of a large power transformer," *App. Thermal Eng.*, vol. 136, pp. 275-286.
- [15] K. KASZA and L. T. MATYSIAK (2014) "STUDY ON IMPROVEMENT OF PASSIVE COOLING IN DISTRIBUTION TRANSFORMERS." In 6th European Con. on Computational Fluid Dynamics.
- [16] V. Segal and K. Raj (1998) "An investigation of power transformer cooling with magnetic fluids,".
- [17] J. Gastelurrutia, J. C. Ramos, G. S. Larraona, A. Rivas, J. Izagirre, and L. Del Río (2011) "Numerical modelling of natural convection of oil inside distribution transformers," *App thermal eng*, vol. 31, no. 4, pp. 493-505.
- [18] E. Ebrahimnia-Bajestan, M. Arjmand, and H. Tiznobaik (2020) "Effect of Waste Vegetable Oil on Cooling Performance and Lifetime of Power Transformers," in *Energy Sustainability*, vol. 83631: American Society of Mech Eng, p. V001T01A003.
- Tra-Hp استفاده از لوله حرارتی در ترانسفورماتور
Tra/Hx ترانسفورماتور همراه با رادیاتور
Tra-Hp/Hx استفاده از لوله حرارتی در ترانسفورماتور همراه با رادیاتور
Tra/Hx-Hp استفاده از لوله حرارتی در رادیاتور ترانسفورماتور

۸- مراجع

- [1] Kulkarni SV, Khaparde SA. (2017) *Tran eng design tec & diagnostics: CRC press.*
- [2] Sefidgaran M, Mirzaie M, Ebrahimzadeh A. Reliability model of the power transformer with ONAF cooling. *Elec Power & Energy Sys*. 2012;35:97-104.
- [3] S. Anishek, R. Sony, J. J. Kumar, and P. M. Kamath (2016) "Performance analysis and optimisation of an oil natural air natural power transformer radiator," *Procedia Tec.*, vol. 24, pp. 428-435.
- [4] M. Pradhan and T. Ramu (2003) "Prediction of hottest spot temperature (HST) in power and station transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 4, pp. 1275-1283.
- [5] M. Afrand, A. Behzadmehr, and A. Karimipour, (2010) "A Numerical simulation of solar distillation for installation in Chabahar-Iran," *World Academy of Science, Eng. & Tech.*, vol. 47, pp. 469-474.
- [6] G. Ahmadi, D. Toghraie, A. Azimian, and O. A. Akbari (2017) "Evaluation of synchronous execution of full repowering and solar assisting in a 200 MW steam power plant, a case study," *App. Thermal Eng.*, vol. 112, pp. 111-123.
- [7] M. M. Ghafurian et al. (2021) "Low-cost zinc-oxide nanoparticles for solar-powered steam production: superficial and volumetric approaches," *Cleaner Pro.*, vol. 280, p. 124261.
- [8] A. Koca, H. F. Oztop, Y. Varol, and G. O. Koca (2011) "Estimation of solar radiation using artificial neural networks with different input parameters for Mediterranean region of Anatolia in Turkey," *Exp. Sys. with App.*, vol. 38, no. 7, pp. 8756-8762.
- [9] K. Kumar, K. Raghunwaiya, B. Sharma, and M. Dakuidreketi (2020) "Factors that influence academics' intention to use mobile-based assessment in Higher Education in South Pacific," in *2020 IEEE Frontiers in Educ Conf (FIE): IEEE*, pp. 1-8
- [۱۹] شجاعی فرد م، زارع ج، طحانی م (۲۰۱۳) بررسی و مقایسه اثر نانو سیالات مختلف بر عملکرد گرمایی لوله حرارتی. مکانیک سازه ها و شماره ها، دوره ۳، شماره ۳، ۸۳-۹۵.
- [۲۰] ک.ش.آباد ه، شفيعی م، ط.رهنی م، عباسپور م (۲۰۱۳) بررسی تجربی استفاده از لوله های حرارتی نوسانی در مقیاس بزرگ بر عملکرد حرارتی آبگرمکن

- [25] W. Niu, G. Zhang, Y. Jiang, R. Lu, X. Wang, and J. Wang (2010) "The experimental study of a novel cooling system of a power transformer in an urban underground substation," in 2010 Int. Conf. on Power Sys Tech: IEEE, pp. 1-6.
- [26] I. Likhmanets and B. R. Baliga (2017) "Experimental Investigation of a Simplified Model of a Transformer Cooling System," in ASME Power Conference, vol. 57618: American Society of Mech Eng, p. V002T12A004.
- [27] w. address. <https://globecore.com/degassing-thermal-vacuum-drying-oil/3-4-liquid-immersed-transformers/> (accessed web:2022).
- [28] L. Raeisian, H. Niazmand, E. Ebrahimnia-Bajestan, P. Werle (2019) "Thermal management of a distribution transformer: an optimization study of the cooling system using CFD and response surface methodology," Int. J. of Elec. Power & Energy Sys., vol 104, pp.443-455.
- [29] T. Weekes, T. Molinski, X. Li, and G. Swift (2004) "Risk assessment using transformer loss of life data," IEEE elec insulation magazine, vol. 20, no. 2, pp. 27-31.
- خورشیدی صفحه تخت. مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۲، شماره ۱، ۶۶-۵۷.
- [21] C. Rosas, N. Moraga, V. Bubnovich, and R. Fischer (2005) "Improvement of the cooling process of oil-immersed electrical transformers using heat pipes," IEEE transactions on power delivery, vol. 20, no. 3, pp. 1955-1961.
- [22] M. Dutai, D. Popescui, and D. Fetcu (2016) "Cooling equipment with heat pipes for power transformers reliability improvement," in Int. Conf. on Hyd. and Pneumatics.
- [23] W. Niu, G. Zhang, and H. Zhong (2014) "Preliminary study of a relay transmitted cooling system with heat pipes and LHP system in large capacity gas insulated transformers," in 2014 17th Int. Conf. on Elec. Machines and Syss (ICEMS): IEEE, pp. 2332-2335.
- [24] W. Niu et al. (2012) "Experimental study of the evaporative cooling system in a low-noise power transformer," in 2012 China Int. Conf. on Elec Dist: IEEE, pp. 1-4.