



Experimental Study of Nano-Oils Containing Iron Oxide, multi-walled carbon nanotubes, and Aluminum Oxide in Reducing the Hot Spot Temperature of Transformers

Fateme Tavakoli Dastjerd, Amirhossein Joveini , Mohammad Derayatifar, Hamid Niazmand*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT: In tropical regions, particularly during the summer, the rise in ambient temperature causes a significant increase in the hot spot temperature of transformers, which can result in the early failure of transformers and cause irreparable damage to the power grid. Therefore, efforts to reduce the hot spot temperature of transformers are of great importance. One method of thermal management for oil-immersed transformers is to enhance the heat transfer properties of the oil with additives, allowing for the effective and rapid dissipation of heat from the windings and core to the surrounding environment. In this study, the experimental performance of three nano-oil aluminium oxide, iron oxide, and multi-walled carbon nanotubes was evaluated in a laboratory-scale oil-immersed transformer with a maximum rated power of 150 watts. To this end, the aforementioned nanoparticles were mixed with transformer mineral oil at a concentration of 0.5 g/L and tested in the transformer. The results showed that adding nanoparticles to the oil, within the permissible range for various parameters, improved the physical properties of the nano-oil, which could play a significant role in the thermal management of transformer oil. For example, at 100% of the transformer's full power, the aluminium oxide, iron oxide, and multi-walled carbon nanotube nano-oils reduced the hot spot temperature by 2.1°C, 1.3°C, and 5.4°C, respectively, compared to the baseline test with mineral oil. The primary reason for this improvement is the enhanced thermal conductivity of the nano-oil.

Review History:

Received: Feb. 09, 2024

Revised: Aug. 20, 2024

Accepted: Oct. 06, 2024

Available Online: Oct. 16, 2024

Keywords:

Transformer

Oil

Nanoparticle

Hot Spot Temperature

1- Introduction

Research on nano-oils is relatively new but shows promise for improving transformer performance due to the high insulating strength of the oil, which is influenced by moisture levels [1]. Several studies have examined how adding nanoparticles affects the breakdown voltage of transformer oil. For example, Jin et al. [2] found that silicon oxide nanoparticles increased breakdown voltage with specific moisture levels.

In general, the studies conducted on the addition of nanoparticles to transformer oil [3], along with the type of nanoparticle, concentration, and parameters examined, indicate that most of the previous research in this field has primarily focused on the dielectric properties of the oils. In contrast, less attention has been given to the thermal and cooling properties of nanofluids in transformers. For example, in the most important related study [4], the effect of using four nanofluids containing Cu, Al₂O₃, TiO₂, and SiC nanoparticles with different volume fractions was investigated on the average temperature of a 250 kVA transformer. However, the designed geometry of the active components of the transformer was assumed to be rigid,

which is entirely different from the real geometry. Therefore, the thermal modeling results are not reliable. The lack of fins in the housing geometry or merely conducting numerical studies with unreasonable assumptions (such as in two-dimensional thermal modeling of the transformer or its active components, etc.) are among the other gaps in the research in this field.

Thus, in this study, as a first step, the key properties (such as viscosity, thermal conductivity, breakdown voltage, loss factor, permittivity, and electrical resistance) of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes, iron oxide, and aluminium oxide will be examined. For this purpose, three nano-oils with concentrations of 0.05 g/L, 0.1 g/L, and 0.5 g/L are prepared, and their stability is evaluated. Subsequently, the best results will be compared for their effect on the properties of transformer oil, and finally, the impact of each nano-oil on the temperature at various points of the transformer will be experimentally studied.

2- Experimental setup

The study involved three nanoparticles:

- Multi-walled Carbon Nanotubes: 0.5 g per liter of

*Corresponding author's email: niazmand@um.ac.ir



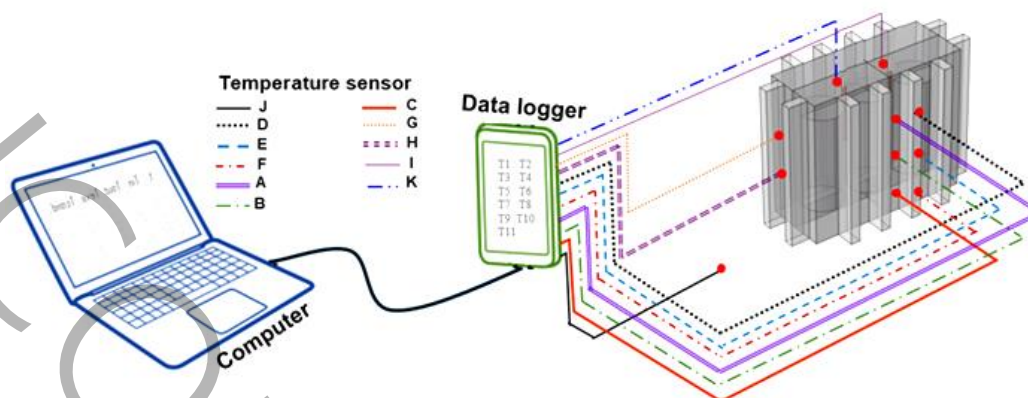


Fig. 1. Overview of the transformer system under test along with the location of the sensors.

transformer oil was ultrasonically treated at 40 kHz and 200 W for 45 minutes.

- Iron Oxide: 2 g mixed with 30 ml ethanol, treated ultrasonically, followed by the addition of oleic acid and centrifugation to separate the particles. Dried nanoparticles were mixed in a 0.5 g/l concentration in oil and treated at 240 kHz and 200 W.
- Aluminium Oxide: Powdered Al₂O₃ (20 nm) was dispersed in oil with oleic acid and treated ultrasonically.

A small laboratory transformer simulated real transformer conditions (150 W load). The tank dimensions were 25 cm x 10 cm x 22.5 cm, with 8 longitudinal and 4 lateral fins. Ten DS18B20 temperature sensors monitored oil temperatures at various points, including fin tips and bases, along with one ambient temperature sensor (Figure 1).

3- Results and Discussion

Stability of Nano-oils: UV-Vis spectrophotometry measured the stability of nano-oils over time. For the first five days, absorbance changes were minimal, but increases were observed after ten days: aluminium oxide (5.68%), multi-walled carbon nanotubes (6.73%), and iron oxide (8.23%). The stability was deemed acceptable for the testing duration, though long-term stability requires further investigation.

Effects on Transformer Oil Properties: Nanoparticles in transformer oil significantly influence key performance metrics such as viscosity, thermal conductivity, and electrical resistance. This study examined nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes, iron oxide, and aluminium oxide at a concentration of 0.5 grams per liter. The addition

of nanoparticles altered these parameters while remaining within acceptable limits; electrical resistance exhibited the most substantial change, while viscosity was least affected. Notably, iron oxide nanofluid increased breakdown voltage, whereas aluminium oxide and carbon nanotubes decreased it due to partial discharge effects. Overall, the presence of multi-walled carbon nanotubes in transformer oil has the most considerable impact on reducing hot spot temperatures.

Thermal Performance: Laboratory tests with 0.5 g/L of multi-walled carbon nanotubes dispersed in oil revealed a hot spot temperature of 75 °C, significantly lower than the 80.4 °C recorded for standard oil. This improvement can be attributed to the higher thermal conductivity of the nanotubes (approximately 175 W/m·K). In contrast, iron oxide nano-oil demonstrated only minimal enhancement in heat transfer compared to base oil, with just a 1.3°C reduction in hot spot temperature. This limited performance may result from either its lower thermal conductivity or increased sedimentation. For aluminium oxide nano-oil, the hot spot temperatures measured at 100% full power were 78.3°C. The tests indicated varying temperatures across different loads, reflecting moderate heat dissipation effectiveness. Figure 2 illustrates the best results obtained in this study for all three nano-oils in comparison to findings from other research.

As can be seen, the best result is from titanium oxide nanoparticles, reducing the hotspot temperature by about 8°C. However, they are costly and have a high volume percentage. Additionally, high-weight metallic nanoparticles can cause electrical discharge, affecting system efficiency. In conclusion, multi-walled carbon nanotubes, with a suitable percentage, are a more compatible and affordable option for transformers.

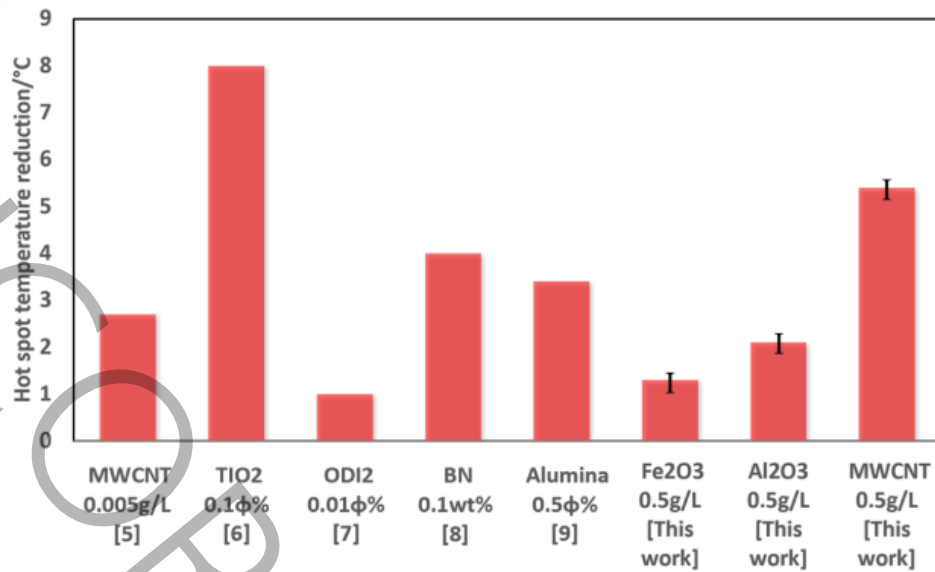


Fig. 2. Comparison Chart of Hot Spot Temperature Reduction in Various Studies[5-9].

4- Conclusions

This research investigated the experimental effect of adding three nanoparticles iron oxide, aluminium oxide, and multi-walled carbon nanotubes on reducing the hot spot temperature of a transformer. The study evaluated the properties of mineral oil and three nano-oils with a concentration of 0.5 grams per liter, ensuring all transformer oil characteristics, such as viscosity and thermal conductivity, remained within acceptable limits. The temperatures of the nano-oils were measured in a laboratory transformer at power levels of 38%, 68%, and 100%. The initial hot spot temperature with mineral oil served as a reference. Results indicated that, despite similar thermal conductivities (0.121 W/m·K for iron oxide and 0.120 W/m·K for aluminium oxide), iron oxide did not significantly reduce the hot spot temperature, with only a 1.3 °C decrease compared to the baseline. In contrast, aluminium oxide reduced the temperature by 2.1 °C due to its greater stability. Notably, the addition of multi-walled carbon nanotubes (0.175 W/m·K) led to a significant reduction of 5.4 °C, demonstrating superior effectiveness.

References

- [1] M.M. Ghafurian, A. Joveini, S. Safarzadeh, H. Niazmand, Experimental study of passive cooling techniques in an oil-immersed transformer building, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, (2023) 1-12.
- [2] H. Jin, T. Andritsch, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, AC Breakdown Voltage and Viscosity of Mineral Oil based SiO₂ Nanofluids, in: *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Montreal, QC, Canada 2012, pp. 902-905.
- [3] M. Rizwan, S.A. Khan, M.R. Khan, A.A. Khan, Experimental and statistical investigation on the dielectric breakdown of magneto nanofluids for power applications, *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 19(1) (2024) 5.
- [4] S. Sumathi, R. Rajesh, P. Subburaj, Investigation of dielectric strength of transformer oil based on hybrid TiO₂/Al₂O₃/MoS₂ Nanofluid using taguchi and response surface methodology, *IETE Journal of Research*, 67(6) (2021) 817-825.
- [5] N.S. Suhaimi, M.F. Md Din, C.Y. Tan, M.T. Ishak, A.R.A. Rahman, W.F.H. Wan Zambri, J.L. Wang, Electrical properties and Raman scattering of palm oil based carbon nanotube, *Key Engineering Materials*, 908 (2022) 343-347.
- [6] B. Mehrvarz, F. Bahadori, S.Z. Moghaddam, Heat transfer enhancement in distribution transformers using TiO₂ nanoparticles, *Advanced Powder Technology*, 30(2) (2019) 221-226.
- [7] A.A. Taheri, A. Abdali, M. Taghilou, H.H. Alhelou, K. Mazlumi, Investigation of mineral oil-based nanofluids effect on oil temperature reduction and loading capacity increment of distribution transformers, *Energy Reports*, 7 (2021) 4325-4334.
- [8] Y.Z. Lv, Y.F. Du, J.Q. Zhou, X.X. Li, M.T. Chen, C.R. Li, G.L. Wang, Nanoparticle Effect on Electrical Properties of Aged Mineral Oil Based Nanofluids in: *CIGRE*, Paris, France, 2012, pp. 1-6.
- [9] Z. Taghikhani, M.A. Taghikhani, G. Gharehpetian, A comprehensive investigation on the efficiency of alumina nanoparticles in ONAN and OFAN cooling performance enhancement of transformers, *Powder Technology*, 387 (2021) 466-480.

مطالعه تجربی نانوروغن‌های حاوی اکسید آهن، نانولوله‌های کربنی چند جداره و اکسید آلومینیوم در کاهش دمای نقطه داغ ترانسفورماتورها

فاطمه توکلی دستجرد، امیرحسین جوینی^{۱*}، محمد درایتی فر، حمید نیازمند*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

کلمات کلیدی:

ترانسفورماتور
روغن
نانوذره
دمای نقطه داغ

خلاصه: در مناطق گرمسیر به خصوص در فصل تابستان، بالا رفتن دمای محیط سبب افزایش شدید دمای نقطه داغ ترانسفورماتورها می‌شود که نتیجه آن از کارافتادگی زودهنگام ترانسفورماتورها و بروز خسارات جبران‌ناپذیری در شبکه برق خواهد شد. بنابراین، تلاش برای کاهش دمای نقطه داغ ترانسفورماتور از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های مدیریت حرارتی ترانسفورماتورهای روغنی، افزایش خواص انتقال حرارت روغن با مواد افزودنی است تا بتوان به طور مؤثر و سریع حرارت اتلافی از سیم‌پیچها و هسته را به محیط اطراف منتقل کرد. از اینرو در این پژوهش به مطالعه تجربی عملکرد سه نانوروغن اکسید آلومینیوم، اکسید آهن و نانولوله‌های کربنی چند جداره در یک ترانسفورماتور روغنی آزمایشگاهی با حداکثر توان نامی ۱۵۰ وات پرداخته می‌شود. بدین منظور نانوذره‌های مذکور با غلظت ۰/۵ g/L با روغن معدنی ترانسفورماتور مخلوط شده و در ترانسفورماتور مورد آزمایش قرار می‌گیرند. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات به روغن تا محدوده مجاز برای عامل‌های مختلف، منجر به بهبود خواص فیزیکی نانوروغن می‌شود که می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت حرارتی روغن ترانسفورماتور داشته باشد. به عنوان نمونه در ۱۰۰ درصد توان کامل ترانسفورماتور، نانوروغن‌های اکسید آلومینیوم، اکسید آهن و نانولوله‌های کربنی چند جداره به ترتیب موجب کاهش ۲/۱، ۱/۳ و ۵/۴ درجه سانتی‌گراد در دمای نقطه داغ ترانسفورماتور نسبت به آزمون پایه با روغن معدنی می‌شوند که دلیل اصلی آن بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوروغن است.

۱- مقدمه

به مقدار موثر ولتاژ متناوب که باعث شکست الکتریکی عایق روغن در فاصله مشخص و شکل الکترودهای معین می‌گردد، اطلاق می‌شود. به عنوان نمونه، جین و همکاران [۶] اثر افزودن نانوذرات اکسیدسیلیکون و رطوبت را بر ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور مورد بررسی قرار دادند. از آنجایی که رطوبت روغن به شدت بر روی ولتاژ شکست تأثیر می‌گذارد، آنها ولتاژ شکست نانوسیال ساخته شده را در محدوده رطوبت ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ پی‌پی‌ام مورد آزمایش قرار داده و مشاهده کردند که با افزودن نانوذره، ولتاژ شکست در میزان رطوبت بالاتری رخ می‌دهد. مبارک و همکاران [۷] به بررسی تأثیر ذرات فلزی بر ویژگی‌های ولتاژ شکست و ولتاژ تخلیه نانوسیالات به عنوان مواد عایقی مایع پرداختند. در این مطالعه، نانوروغن‌هایی با نانوذرات Fe_3O_4 در سه غلظت مختلف تهیه شدند. نتایج نشان داد که در غلظت ۰/۰۰۸٪ عملکرد بهتری در ولتاژ شکست نسبت به روغن معدنی بدست می‌آید. رفیق و همکاران [۸] تأثیر دمای آماده‌سازی نانوسیال اکسیدسیلیکون را بر ولتاژ شکست آن بررسی نموده و با روغن پایه مقایسه کردند. به طوری

اگر چه مدت زیادی است که مطالعه و تحقیق در مبحث نانوسیالات آغاز شده، اما کار بر روی نانوسیال روغنی مبحث جدیدتری می‌باشد که به صورت محدودتری گسترش یافته است [۱-۳]. نکته حائز اهمیت در توانایی استفاده از نانوروغن‌ها در تجهیزات الکتریکی و به ویژه ترانسفورماتورها، حفظ عملکرد الکتریکی سیستم است. به طوری که قدرت عایقی بالای روغن یکی از مهمترین علل استفاده از روغن در ترانسفورماتورهای توزیع محسوب می‌شود. با توجه به اینکه قدرت عایقی روغن ترانسفورماتور به شدت به مقدار رطوبت آن بستگی دارد، لذا سنجش این پارامتر از مهمترین فاکتورهای تعیین کننده عمر مفید ترانسفورماتور می‌باشند [۴، ۵]. در این راستا پژوهش‌های گسترده‌ای، بررسی تأثیر افزودن نانوذرات بر روغن ترانسفورماتور را از نقطه نظر ولتاژ شکست مورد بررسی قرار دادند که در ادامه، به صورت دسته بندی شده بیان خواهند شد. در حقیقت، ولتاژ شکست

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: niazmand@um.ac.ir

وزنی بهبود بیشتری در انتقال حرارت نسبت به روغن خالص و نانوسیال‌های نانولوله‌های کربنی چند جداره ارائه داد. همچنین، ولتاژ شکست دی‌الکتریک کاهش یافت و هدایت حرارتی نانوسیال صفحات نانوگرافن/اکسید تولوئن بالاتر از روغن خالص شد. محققانی نظیر دوناپاتی و همکاران [۱۷]، دونگ و همکاران [۱۸] و پرگار و همکاران [۱۹] تاثیر افزودن نانوذرات اکسیدمنگنز [۱۷]، نیتريدآلومینیوم [۱۸] و نانولوله‌های کربنی چند جداره [۱۹] را بر ضریب هدایت حرارتی روغن ترانسفورماتور بررسی کردند و شاهد افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در مقایسه با روغن پایه بودند. نظری و همکاران [۲۰] در پژوهشی به بررسی ولتاژ شکست دی‌الکتریک متناوب و رفتار انتقال حرارت جابجایی نانوروغن برای استفاده در ترانسفورماتورها پرداختند. پایه این نانوروغن، روغن معدنی نیترو لیبرا بود که با نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن ترکیب شده بود. آزمایش‌ها نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوروغن با غلظت ۰/۱٪ نانوذرات اکسید آهن به طور متوسط ۴/۵۱٪ بالاتر از روغن پایه میشود و ولتاژ شکست دی‌الکتریک آن نیز ۲۳/۸٪ بیشتر از روغن پایه گزارش شد. چوی و همکاران [۲۱] تاثیر افزودن نانوذرات نیتريدآلومینیوم و اکسیدآلومینیوم و هندسه آنها را برخواص حرارتی روغن مورد آزمایش قرار دادند. ذرات اکسیدآلومینیوم دارای دو شکل کروی و استوانه‌ای و ذرات نیتريدآلومینیوم دارای شکل کروی بودند. نتایج آزمایش‌ها به ترتیب، افزایش ۸ و ۲۰ درصدی ضریب هدایت حرارتی را برای نیتريدآلومینیوم و اکسیدآلومینیوم کروی نشان داد. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که افزودن پراکنده‌گرها محدودیت دارد و افزایش بیش از حد آنها موجب کاهش در پایداری و دیگر خواص فیزیکی نانوسیال می‌شود. از خلاءهای این پژوهش‌ها عدم بررسی مستقیم تاثیر این نانوذرات بر کاهش دمای نقطه داغ ترانسفورماتور می‌توان نام برد. پاتول و همکاران [۲۲]، جریان نانوروغن‌های هیبریدی کاسون در یک دیسک چرخشی متخلخل را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که نانوروغن هیبریدی کاسون دارای نرخ انتقال حرارت ۱۰/۹۳٪ و ۸/۸۶٪ بالاتر و نرخ انتقال جرم ۳۳/۶۸٪ و ۲۷/۵۲٪ بالاتر نسبت به نانوروغن کاسون و نانوروغن هیبریدی کاسون است. سینگ و کوندان [۲۳] تاثیر افزودن نانو ذرات اکسیدآلومینیوم را بر ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته روغن ترانسفورماتور در محدوده‌ی دمایی ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد بررسی کردند. آزمایش‌ها نشان داد که با زیاد شدن غلظت، ضریب هدایت حرارتی نیز بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش دما در غلظت‌های بالا شاهد کاهش ضریب هدایت حرارتی بودند که ناشی از ته‌نشینی ذرات به علت افزایش

که در مرحله اختلاط، گروهی از نانوذرات (نانوذرات گروه یک) دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و گروهی دیگر (نانوذرات گروه دو) در معرض دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد با روغن مخلوط گشته و تشکیل نانوسیال داده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ولتاژ شکست نانوسیال گروه یک ۱/۰۵ برابر و نانوسیال گروه دو ۱/۱۱ برابر روغن پایه می‌باشد. اگرچه آنها نشان دادند که دمای تهیه نانوسیال تاثیر مستقیم بر میزان ولتاژ شکست دارد، اما دیگر خواص فیزیکی را بررسی نکردند. رضوان و همکاران [۹] تاثیر سه نوع نانوذره ی اکسید آهن، اکسید کبالت، و فسفید آهن را بر ولتاژ شکست دی‌الکتریک روغن‌های عایق بررسی کردند. نتایج نشان داد نانوروغن حاوی نانوذره Fe_3O_4 ۷۰ درصد و Fe_3P ۴۶ درصد ولتاژ شکست را بهبود میدهد. ال‌وی و همکاران [۱۰] سه نوع مختلف نانوذرات شامل نانوذرات هادی، نیمه‌هادی و عایق را به روغن ترانسفورماتور افزوده و تاثیر آنها را نیز بر ولتاژ شکست بررسی کردند. از نتایج کار آنها مشخص گردید که هر سه نوع نانوذره ولتاژ شکست را افزایش می‌دهد. صدیق و همکاران [۱۱] نانوسیالی از روغن‌های گیاهی و نانوذرات سیلیسیم دی‌اکسید برای ترانسفورماتورها تهیه کردند. نتایج نشان داد که این نانوسیال ۲۴٪ عملکرد بهتری نسبت به روغن معدنی دارد و پس از ۶ سال تنها ۱٪ کاهش در ولتاژ شکست داشت، در حالی که این کاهش برای روغن معدنی ۲۰٪ بود. این نانوسیال روغن گیاهی به عنوان جایگزین مناسب برای روغن معدنی معرفی شد. محققان دیگری نظیر لی و همکاران [۱۲]، دو و همکاران [۱۳] و داگلاس فوتنز و همکاران [۱۴] این رویه را برای روغن ترانسفورماتور حاوی نانوذرات اکسیدسریوم [۱۲]، اکسید آهن [۱۳] و نانولوله‌های کربن و الماس [۱۴] بررسی کردند و بهبودی ولتاژ شکست نانوسیال نسبت به روغن پایه را نشان دادند. از دیگر خواص دی‌الکتریک روغن ترانسفورماتور که مورد بررسی قرار گرفته اند، می‌توان به ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی و مقاومت دی‌الکتریک اشاره کرد. به عنوان نمونه، جمشیدی و همکاران [۱۵] تاثیر افزودن نانوذرات اکسیدسیلیکون را بر گرانیوی سیالات مختلف از جمله روغن ترانسفورماتور در محدوده‌ی غلظت صفر تا ۶/۱۲ درصد کسر حجمی مورد آزمون قرار دادند و مشاهده کردند که افزودن نانوذرات موجب افزایش ویسکوزیته روغن می‌شود و همچنین با افزایش غلظت نانوذرات گرانیوی نانوسیال به شکل نمایی افزایش می‌یابد. شنبیدی و همکاران [۱۶] در پژوهش خود نشان دادند که افزودن نانوذرات گرافن و نانولوله‌های کربنی چند جداره به روغن ترانسفورماتور باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و چگالی روغن می‌شود. نانوذرات گرافن با غلظت ۰/۰۵ درصد

فورس تنشومتر K-100) ساخت شرکت کروس آلمان، دستگاه دیفرنشیال اسکینینگ کالری متر ساخت شرکت پرکین المر آمریکا جهت اندازه گیری ظرفیت گرمایی، دستگاه اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی KD2 ساخت شرکت دکاگون آمریکا، ویسکومتر چرخشی مدل LVDV3 (ترا) شرکت بروکفیلد آمریکا) و اسپندل CC4-18 و دستگاه ولتاژ مدل BD100 از شرکت B2 اتریش جهت اندازه گیری ولتاژ شکست استفاده شده است. همچنین از دستگاه BRDTLC برای اندازه گیری فاکتور اتلاف، گذردهی و مقاومت الکتریکی در دماهای ۱۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد استفاده شده است. در کلیه فرایندها، قبل از هر اندازه گیری محفظه روغن با نمونه مشابه حداقل سه بار شستشو داده و پس از پر کردن محفظه با نمونه جدید ۳ بار آزمون انجام می شود.

۲-۲- آماده سازی نانوروغن ها

از آنجایی که پژوهش حاضر، سه نوع نانوذره اکسید آهن، نانولوله های کربنی چند جداره و اکسید آلومینیوم به عنوان افزودنی در روغن مورد مطالعه قرار گرفتند که در ادامه روش تهیه هر کدام شرح داده می شود.

نانوروغن نانولوله های کربنی چند جداره

نانولوله های کربنی چند جداره، با قطر ۲۰-۳۰ نانومتر و طول ۵-۱۰ نانومتر با ۹۵ درصد خلوص ساخت شرکت VCN برای تهیه نانوروغن استفاده شده است. جهت تهیه این محلول به ازای هر لیتر روغن ترانسفورماتور، ۰/۵ گرم نانوذره افزوده و مخلوط شده است. سپس مخلوط تهیه شده در حمام التراسونیک با بسامد ۴۰ kHz و توان ۷۲۰۰ W به مدت ۴۵ دقیقه قرار داده شد.

نانوروغن اکسید آهن

برای آماده سازی نانوروغن اکسید آهن از روش هونگ استفاده شده است [۳۹، ۴۰] که ابتدا دو گرم اکسید آهن خریداری شده از شرکت نانوریسرچ آمریکا با قطر متوسط ۱۵ تا ۲۰ نانومتر با ۳۰ میلی لیتر اتانول با هم مخلوط شده و به مدت ۲۰ دقیقه در حمام التراسونیک قرار گرفت. سپس ۰/۱ گرم اولیک اسید به مخلوط اضافه گشت و مجدد به مدت ۲ ساعت در حمام التراسونیک قرار گرفت. سپس در دو مرحله و در هر مرحله ۲۰ سی سی اتانول به مخلوط اضافه گردید و بعد از هر مرحله، مجدد به مدت ۲۰ دقیقه در حمام التراسونیک قرار می گرفت. در ادامه، به منظور جداسازی اتانول از اکسید آهن، مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت دورانی ۶۰۰۰ دور بر دقیقه در دستگاه

دما و غلظت می باشد. در ادامه سوختی و همکاران [۲۴] به بررسی اثر افزودن نانوذرات هیبریدی دی اکسید تیتانیوم / اکسید آلومینیوم / دی سولفید مولیبدن در غلظت های مختلف بر افزایش مقاومت دی الکتریک ترانسفورماتور، با استفاده از تاگوچی و روش شناسی سطح پاسخ پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که دی اکسید تیتانیوم اثر قابل توجهی بر مقاومت دی الکتریک دارد، اما بررسی اثر آن بر دمای ترانسفورماتور گزارش نشده است.

جدول ۱ خلاصه ای از مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در زمینه افزودن نانوذرات به روغن ترانسفورماتور به همراه نوع نانوذره، غلظت و نیز پارامترهای مورد بررسی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، اکثر پژوهش های پیشین در این حوزه، تمرکز اصلی شان بر روی خواص دی الکتریک روغن ها بوده و به خواص حرارتی و خنک کنندگی نانوروغن ها در ترانسفورماتورها کمتر توجه شده است به عنوان نمونه در مهمترین پژوهش مرتبط [۲۴]، اثر استفاده از ۴ نانو روغن حاوی نانوذرات مس، اکسید آلومینیوم، دی اکسید تیتانیوم و کاربید سیلیسیم با کسر حجمی های مختلف، بر دمای میانگین یک ترانسفورماتور ۲۵۰ کیلوولت آمپر مطالعه شده است. اما هندسه طراحی شده برای اجزاء فعال ترانسفورماتور به صورت صلب فرض شده که کاملاً متفاوت از هندسه واقعی است. بنابراین نتایج مدل سازی حرارتی معتبر نیست. عدم وجود فین در هندسه محفظه و یا تنها مطالعه عددی با فرضیات غیر منطقی (در مدل سازی دو بعدی حرارتی ترانس یا اجزای فعال آن و ...) را می توان از خلاءهای دیگر پژوهش های این حوزه نامبرد. از این رو در این پژوهش در گام نخست به بررسی خواص مهم (مانند لزجت، ضریب هدایت حرارتی، ولتاژ شکست، فاکتور اتلاف، گذردهی و مقاومت الکتریکی) نانوروغن های حاوی نانولوله های کربنی چند جداره، اکسید آهن و اکسید آلومینیوم پرداخته خواهد شد. برای این منظور سه نانوروغن با سه غلظت ۰/۰۵ g/L، ۰/۱ g/L و ۰/۵ g/L تهیه و ارزیابی پایداری آن ها بررسی می شود. در ادامه بهترین نتایج بدست آمده اثرشان بر خواص روغن ترانسفورماتور مقایسه خواهد شد و در نهایت تاثیر هر نانو روغن بر دما در نقاط مختلف ترانسفورماتور به صورت تجربی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۲- بخش آزمایشگاهی

۲-۱- تجهیزات اندازه گیری خواص

از آنجایی که در این پژوهش هدف اولیه ارزیابی خواص مهم مانند لزجت، ضریب هدایت حرارتی، ولتاژ شکست، فاکتور اتلاف، گذردهی و مقاومت الکتریکی نانوروغن های حاوی نانولوله های کربنی چند جداره، اکسید آهن و اکسید آلومینیوم است، از تجهیزاتی نظیر دستگاه چگالی سنج مدل

جدول ۱. مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در زمینه افزودن نانوذرات به روغن ترانسفورماتور (ادامه دارد)

Table 1. The laboratory studies were conducted on the addition of nanoparticles to transformer oil. (Continued)

نویسندگان	نوع نانوذره	غلظت	خواص مورد بررسی
جین و همکاران [۶]	TiO ₂	۰/۰۰۳۷, ۰/۰۰۷۴ vol. %	ولتاژ شکست ویسکوزیته
موتیان و همکاران [۲۵]	TiO ₂	ذکر نشده است	ولتاژ شکست
فلاح شجاعی و همکاران [۲۶]	TiO ₂	۰/۰۰۱-۰/۰۱ g/l	ولتاژ شکست
لیو و همکاران [۲۷]	Fe ₃ O ₄ ZnO Al ₂ O ₃ SiO ₂	۰/۰۴-۰/۱۴ vol.%	ولتاژ شکست پایداری اکسیداسیون گذردهی الکتریکی مقاومت الکتریکی فاکتور اتلاف
بوکراتین و همکاران [۲۸]	ZnO Ti ₂ SiO ₂	۰/۰۱-۰/۰۷۵ vol.%	ولتاژ شکست نقطه اشتعال نقطه آتش ویسکوزیته
الوی و همکاران [۱۰]	INPS ^۱ SNPS ^۲ CNPS ^۳	۰/۰۵ g/l	ولتاژ شکست
لی و همکاران [۲۹]	Fe ₃ O ₄	۰/۰۰۴ wt%	ولتاژ شکست مقاومت الکتریکی گذردهی الکتریکی فاکتور اتلاف
لی و همکاران [۱۲]	CeO ₂	۳۰ wt%	ولتاژ شکست
الوی و همکاران [۳۰]	SNPS	۰-۰/۱۲۵ vol.%	ولتاژ شکست
فونتز و همکاران [۱۴]	MWCNT diamond	۰/۰۰۵, ۰/۰۱, ۰/۰۵ vol.%	ضریب هدایت حرارتی ویسکوزیته ولتاژ شکست
کارتیک و همکاران [۳۱]	Al ₂ O ₃ Al CuO Cu	۰/۰۱-۲ vol.%	ولتاژ شکست نقطه اشتعال نقطه آتش

¹ Insulating nanoparticles

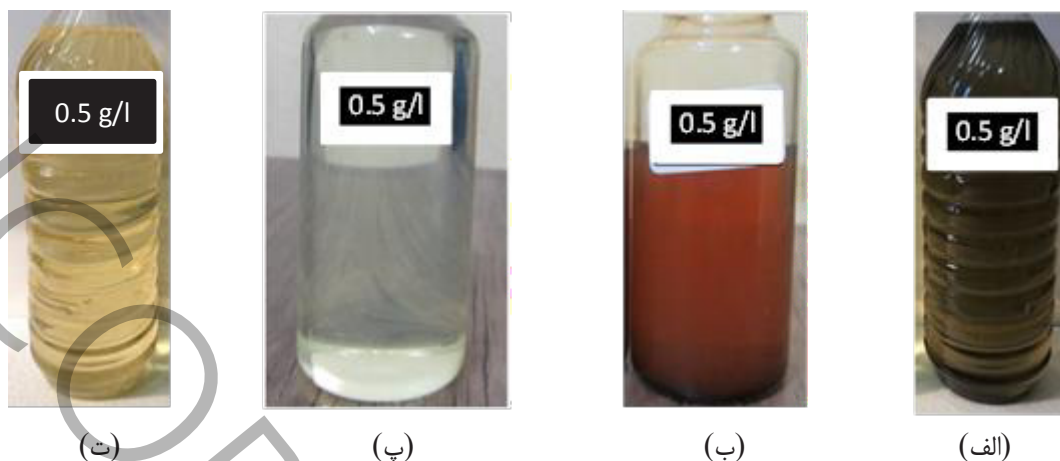
² Semi-conductive nanoparticles

³ Conductive nanoparticles

جدول ۱. مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در زمینه افزودن نانوذرات به روغن ترانسفورماتور

Table 1. The laboratory studies were conducted on the addition of nanoparticles to transformer oil.

ویسکوزیته			
ضریب هدایت حرارتی	۱-۲۹ vol.%	MgO	دوندپاتی و همکاران [۱۷]
ضریب هدایت الکتریکی	۰/۱-۰/۵ vol.%	AlN	دونگ و همکاران [۱۸]
ولتاژ شکست	۰/۱-۰/۳ g/l	TiO ₂	منصور و همکاران [۳۲]
ولتاژ شکست			
مقاومت الکتریکی	۰/۰۰۳-۰/۰۵ g/l	TiO ₂	دوفان و همکاران [۲۵]
گذردهی الکتریکی			
نقطه اشتعال			
فاکتور اتلاف			
ضریب هدایت حرارتی	۰/۰۱-۰/۱ vol.%	h-BN	تیجرینا و همکاران [۳۳]
مقاومت الکتریکی			
ویسکوزیته			
ضریب هدایت حرارتی	۱-۴ vol.%	Al ₂ O ₃ AlN	چوی و همکاران [۲۱]
ضریب هدایت حرارتی	۰/۱,۰/۳,۰/۵ vol.%	Al ₂ O ₃	سینگ و کوندان [۲۳]
ویسکوزیته			
ویسکوزیته	۰-۱۲/۶ vol.%	SiO ₂	جمشیدی و همکاران [۱۵]
ولتاژ شکست	۰/۱-۰/۶ vol.%	Fe ₃ O ₄	قاسمی و همکاران [۳۴]
ولتاژ شکست			
تخلیه جزئی	۰/۰۰۲-۰/۰۰۸ wt%	SIC	کوترس و همکاران [۳۵]
ولتاژ شکست			
ضریب هدایت حرارتی	۰/۰۰۱-۰/۰۱ wt%	MWCNTs	علیزاده و همکاران [۳۶]
ولتاژ شکست	۰/۰۰۱-۰/۰۸۵ wt%	TiO ₂ CNT	مشهدزاده و همکاران [۳۷]
ولتاژ شکست			
مقاومت دی الکتریک	۰/۰۰۱-۰/۰۱ vol.%	TiO ₂ Al ₂ O ₃ MoS ₂	سومتی و همکاران [۲۴]
ضریب شکست	۰/۰۱-۰/۲ g/l	CNT	سهیمی و همکاران [۳۸]



شکل ۱. نانوروغن حاوی الف) نانولوله های کربنی چند جداره ب) اکسید آهن ب) اکسید آلومینیوم و ت) روغن معدنی خالص ترانسفورماتور

Fig. 1. Nano-oil containing a) multi-walled carbon nanotubes, b) iron oxide, c) aluminum oxide, and d) pure mineral transformer oil.

مخلوط گردید. برای افزایش پایداری اولیک اسید به عنوان ماده فعال کننده سطحی در غلظت برابر با نانوذره به مخلوط اضافه شد. سپس مخلوط مربوطه به مدت ۴۵ دقیقه داخل حمام آلتراسونیک با فرکانس ۴۰ kHz و توان W ۲۰۰ قرار داده شد. شکل ۱ نمای واقعی نانوروغن های تهیه شده در درصد وزنی یکسان ۰/۵ گرم بر لیتر به همراه روغن پایه را نشان می دهد و همچنین در شکل ۲ تصاویر TEM این نانوروغن ها قابل مشاهده است.

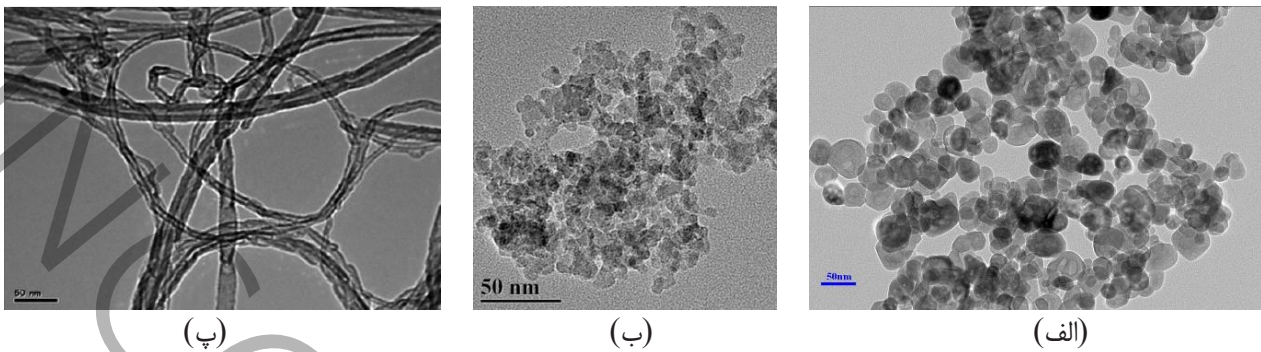
۲-۳- مجموعه آزمایشگاهی

از آنجایی که بررسی رفتار نانوروغن ها در مقایسه با روغن معدنی در یک ترانسفورماتور واقعی امکان پذیر نبود، برای انجام آزمون ها در این پژوهش از یک ترانسفورماتور کوچک آزمایشگاهی که می تواند شرایط عملکرد حرارتی یک ترانسفورماتور واقعی را در بار کامل ۱۵۰ وات و بار جزئی مهیا نماید، استفاده شد. این ترانسفورماتور آزمایشگاهی از یک مخزن به ابعاد ۲۵×۱۰×۲۲ (طول، عرض، ارتفاع) سانتی متر تشکیل و فین هایی عمودی و توخالی با ضخامت ۱/۵ سانتی متر بر روی بدنه خارجی مخزن تعبیه شده است. در مجموع ۸ فین در جهت طولی و ۴ فین در جهت عرضی بر روی دیواره جانبی خارجی مخزن مطابق با شکل ۳-الف قرار دارد. سه استوانه که شار حرارتی ثابت را همانند سیم پیچ ها در ترانسفورماتور واقعی تولید و

سانتریفیوژ قرار گرفت تا اکسید آهن از اتانول جدا شده و ته نشین شود. سپس، محلول اتانول در بالای اکسید آهن را دور ریخته و مجدداً اتانول به نانوذره اضافه شده تا به اصطلاح نانوذرات با اتانول شسته شود، مجدداً مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت دورانی ۶۰۰۰ دور بر دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ قرار گرفت. این روند در سه مرحله انجام شد و در مجموع مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ قرار گرفت. سپس نانوذرات باقیمانده از دستگاه خارج شده، به ظرف های مناسب انتقال یافته و به مدت ۱۰ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد حرارت دیدند تا اتانول کاملاً از نانوذرات بخار شده و نانوذرات خشک شوند [۱۲]. پس از خشک شدن نانوذرات در غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر در روغن مخلوط شده و به مدت ۴۵ دقیقه در حمام آلتراسونیک با فرکانس ۲۴۰ KHz و توان W ۲۰۰ قرار گرفت تا به خوبی پراکنده شود و مخلوط همگنی حاصل شود.

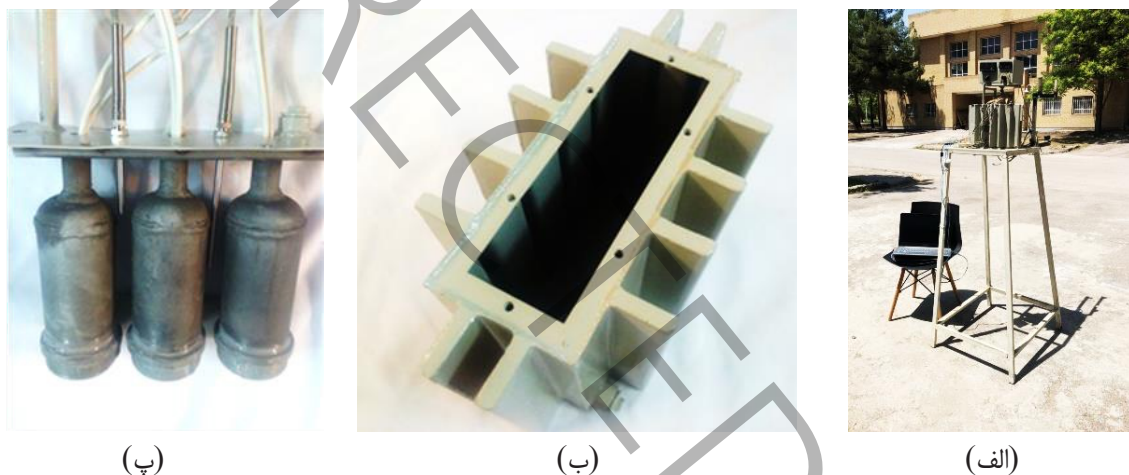
نانوروغن اکسید آلومینیوم

برای آماده سازی نانوروغن اکسید آلومینیوم از روش ذکر شده در مرجع [۴۱] استفاده شد. برای این منظور نانوذرات جامد پودری شکل Al_2O_3 با قطر متوسط ۲۰ نانومتر از شرکت نانوریسرچ خریداری شده و در غلظت دلخواه در روغن معدنی پخش شدند. سپس توسط یک همزن دستی کمی



شکل ۲. تصاویر TEM الف) نانوذره اکسید آهن ب) نانوذره اکسید آلومینیوم پ) نانولوله های کربنی چند جداره

Fig. 2. TEM images of a) iron oxide nanoparticle, b) aluminum oxide nanoparticle, and c) multi-walled carbon nanotubes.



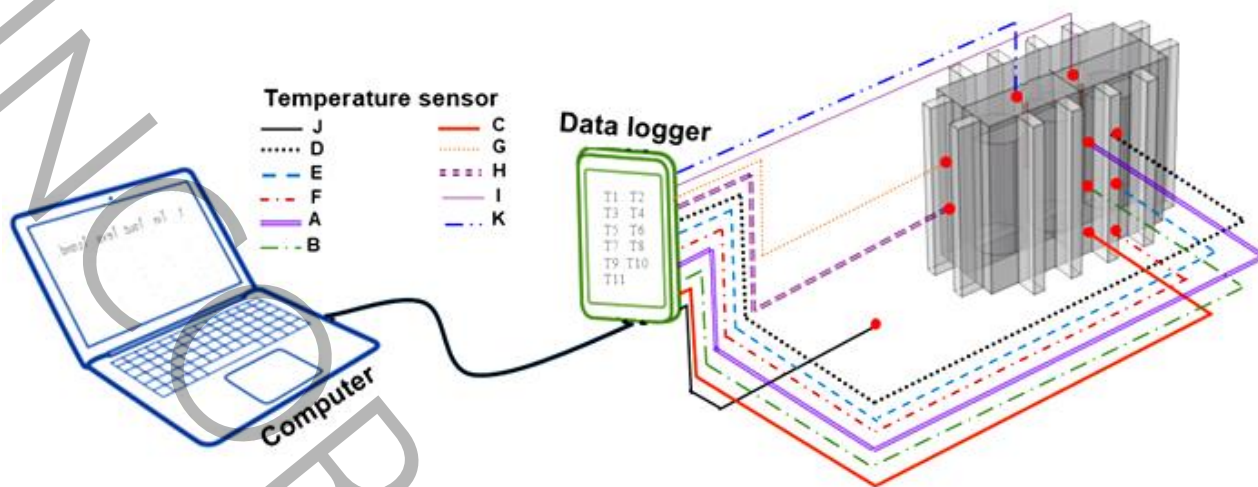
شکل ۳. الف) نمای واقعی ترانسفورماتور ب) نمای از فینهای متصل شده به مخزن ترانسفورماتور آزمایشگاهی پ) نمای از استوانه های داخل مخزن

Fig. 3. a) Real view of the transformer b) View of the fins attached to the laboratory transformer tank c) View of the cylinders inside the tank

شده در قسمت طولی مخزن، حسگرهای A، B و C دمای روغن در پایه فین‌های قسمت طولی را اندازه‌گیری می‌کنند. حسگرهای G و H در پایه فین‌های قسمت عرضی ترانسفورماتور قرار گرفته و دمای روغن را در نزدیکی این فین‌ها اندازه‌گیری می‌کنند. همچنین دو حسگر I و K در قسمت فوقانی ترانسفورماتور قرار گرفته و دمای نقطه داغ را ثبت می‌کند. حسگر L هم نشان دهنده دمای محیط است.

به روغن منتقل می‌کنند، مطابق شکل ۳-ب در درون مخزن قرار گرفته است.

مطابق شکل ۴، ده حسگر دمایی مدل ds18b20 با دقت ۰/۵ درجه سانتی‌گراد به منظور گزارش دمای نقاط مختلف روغن ترانسفورماتور در نوک پرها، پایه آن‌ها و لایه‌های بالایی روغن استفاده شده است. همچنین یک حسگر به منظور گزارش دمای محیط ترانسفورماتور در نظر گرفته شده. حسگرهای D، E و F دمای روغن در نوک فین‌های تعبیه



شکل ۴. نمای کلی سیستم ترانسفورماتور تحت آزمون همراه با محل قرارگیری حسگرها

Fig. 4. Overall view of the transformer system under test, along with the sensor placement locations.

۳- عدم قطعیت

مقدار داده‌ی اندازه‌گیری شده در هر محله‌ی آزمون و میانگین حسابی داده‌ها می‌باشد که در پژوهش حاضر داده مورد اندازه‌گیری دما و تعداد دفعات اندازه‌گیری ۳ مرتبه است. عدم قطعیت B که مربوط به دقت ابزار اندازه‌گیری است مطابق رابطه ۳ تعریف می‌شود.

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

a ، دقت اندازه‌گیری ابزار است که در این پژوهش برابر بادقت حسگرهای ds18b20، ± 0.5 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در نهایت عدم قطعیت کلی از رابطه ۴ به دست خواهد آمد [۴۱].

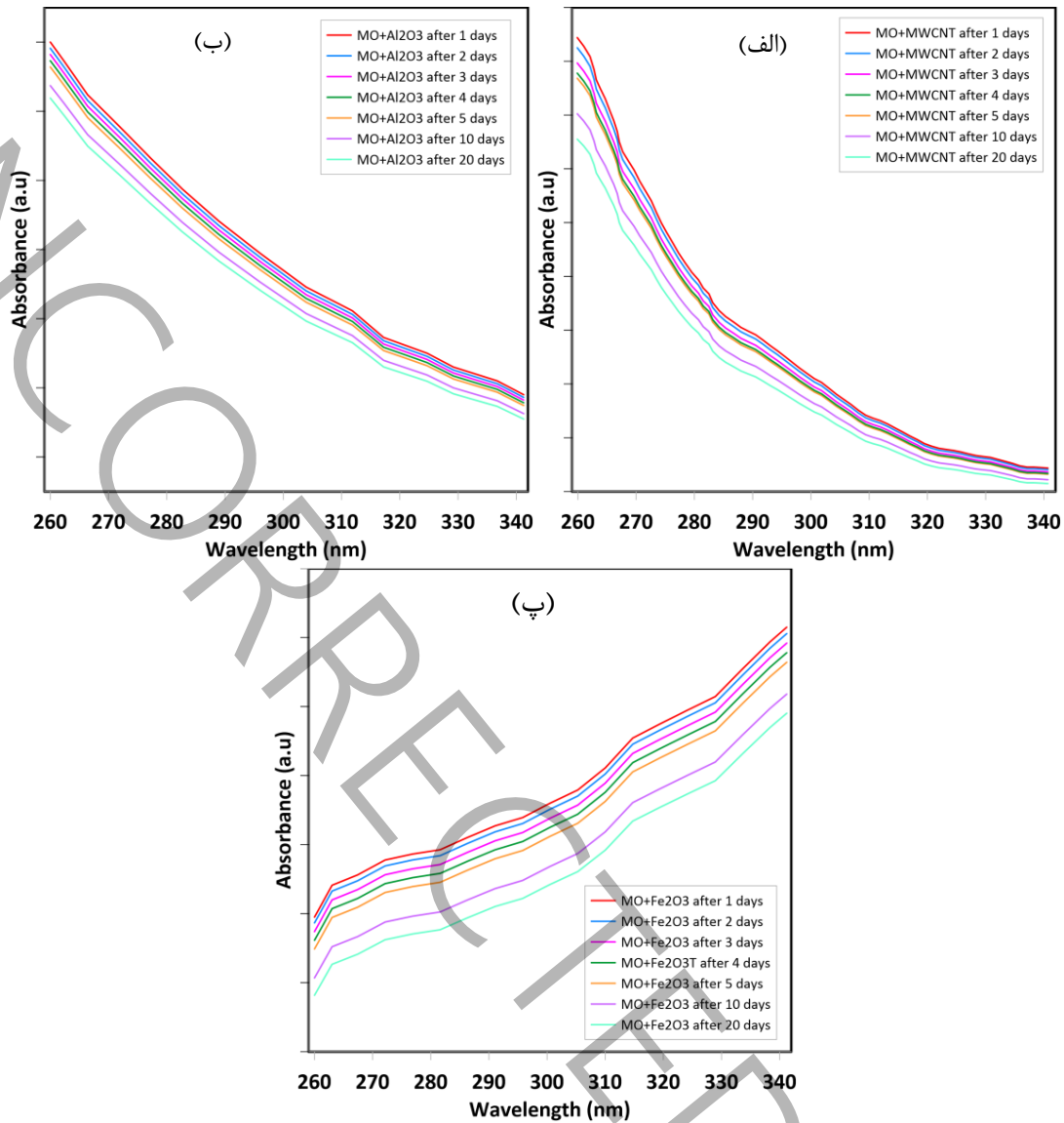
$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (4)$$

از آنجایی که در پژوهش‌های تجربی، تعیین عدم قطعیت نتایج، امری ضروری است [۴۱]، در این بخش به نحوه محاسبه عدم قطعیت پرداخته می‌شود. عدم قطعیت بنا بر آماری بودن یا نبودن، به دو بخش A و B تقسیم می‌گردد. محاسبه‌ی عدم قطعیت A ، که ناشی از تکرار آزمایش‌ها است، مطابق رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$u_A = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

که در آن u_A عدم قطعیت مربوط به تکرار، n تعداد دفعات داده‌گیری، S انحراف معیار در اندازه‌گیری می‌باشد که مقدار پارامتر S توسط رابطه ۲ تعیین می‌گردد.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$



شکل ۵. تغییرات طیف جذبی نانوروغنهای (الف) نانولوله های کربنی چند جداره ، (ب) اکسید آلومینیوم و (پ) اکسید آهن، با محدوده طول موجی مشخص در زمانهای مختلف

Fig. 5. Absorption spectrum changes of nano-oils containing a) multi-walled carbon nanotubes, b) aluminum oxide, and c) iron oxide, with a specified wavelength range at different times.

را محاسبه نمود. به همین علت در ارائه این نتایج، مقدار اعداد محور عمودی فقط برای مقایسه مهم خواهند بود که در صورت یکسان بودن حداکثر و حداقل مقدار محور عمودی، این مقایسه می‌تواند اعتبار کافی داشته باشد. برای این منظور نتایج این بخش با مقدار حداکثر یک و حداقل صفر ارائه شده است. نتایج آزمون تجربی طیف جذبی برای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۰ و ۲۰ روز برای سه نانوروغن در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار و روند جذب نور مؤثر تا مدت ۵ روز، بسیار نزدیک به هم است، به طوری که با کمی دقت می‌توان دریافت که حداکثر تغییرات مربوط

۴- بحث و نتایج

۴-۱- پایداری نانوروغن‌ها

به‌منظور بررسی پایداری نانوروغن‌ها، یکی از روش‌های مهم ارزیابی، استفاده از طیف جذبی می‌باشد. در این روش، با استفاده از تغییرات طیف جذبی نور در محدوده طول‌موجی مشخص در طی زمان، می‌توان پایداری و کیفیت نانوروغن را بررسی نمود. برای این آزمون از دستگاه اسپکتروفوتومتری (مدل ۸۴۵۳ Agilent) استفاده شد. نتایج این آزمون اصولاً به‌صورت مقایسه‌ای معتبر است و از آن نمی‌توان به طور دقیق میزان ضریب جذب نور

جدول ۲. اندازه‌گیری خواص نانوروغن‌ها با غلظت ۰/۵ g/l در دمای محیط (۲۵ °C)

Table 2. Measurement of the properties of nano-oils with a concentration of 0.5 g/l at room temperature (25 °C)

سیال	گرانروی (Mpa.s)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)	ولتاژ شکست (kv)	گذردهی الکتریکی (pS/)	فاکتور اتلاف (نسبت توان فعال ^۴ به توان مؤثر ^۵)	مقاومت الکتریکی (Ω.m)
محدوده مجاز تغییر	۱۰ تا ۳۰ [۵۱, ۵۰]	-	حداقل ۳۰ [۴۹]	۲/۵ تا ۲/۲ [۴۹]	-	حداقل ۳۵×10^{-4} [۴۹]
روغن	۱۵/۳	۰/۱۱۷۵	۷۸/۵	۲/۲۶	۰/۰۲۵	۲×10^{-۱۳}
نانوروغن اکسید آهن	۱۴/۹	۰/۱۲۱	(مستقل از دمای محیط) ۹۷/۲	۲/۳۱	۰/۰۲۶	۵×10^{-۹}
نانوروغن اکسید آلومینیوم	۱۵	۰/۱۲۰	۷۴/۳	۲/۱۹	۰/۰۳۱	۱×10^{-۱۲}
نانوروغن نانولوله‌های کربنی چند جداره	۱۴/۷	۰/۱۷۵	۳۱/۷۳	۲/۴۱	۰/۰۲۱	۳۵×10^{-۸}

⁴ Power

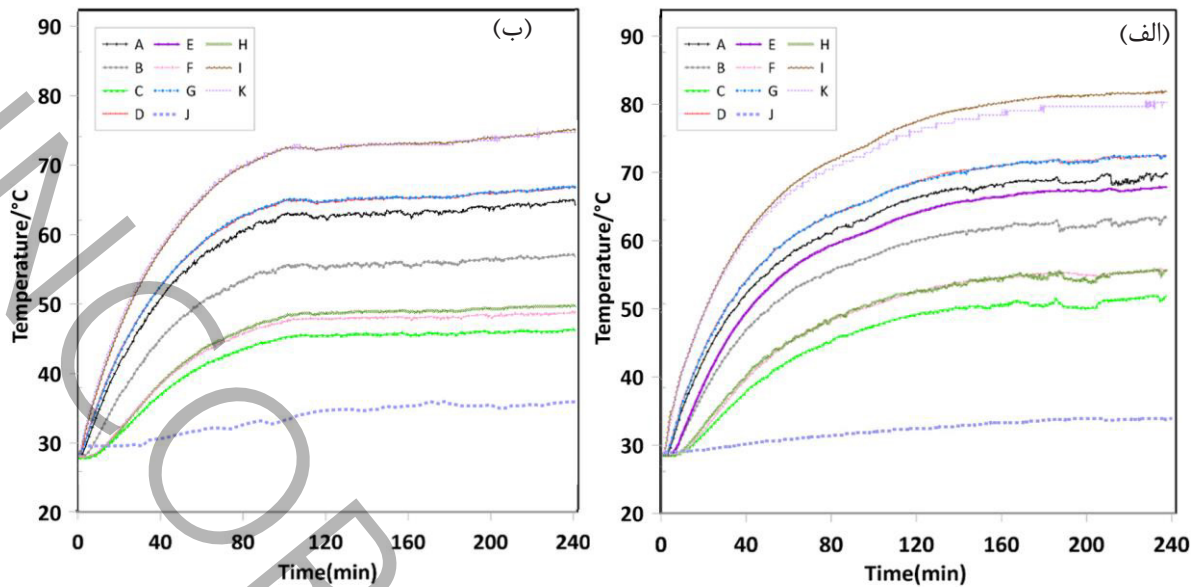
⁵ Apparent Power

می‌شود با افزودن نانوذرات به روغن پایه، هر کدام از کمیت‌ها تغییراتی داشته که همچنان در محدوده مجاز قرار دارند [۴۴-۴۶]. این در حالی است که بیشترین و کمترین تغییرات از بین کمیت‌های نام برده را مقاومت الکتریکی و ویسکوزیته با مقادیر ۹۹/۹ و ۳/۹۲ درصد به خود اختصاص داده اند. دلیل این امر این است که به علت بالاتر بودن مقاومت الکتریکی نانوذرات نسبت به روغن پایه، مقاومت الکتریکی نانوروغن افزایش می‌یابد. از آنجایی که نانولوله‌های کربنی چند جداره دارای مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به دو نانوذره دیگر دارند، نانوروغن حاصل از آن دارای گذردهی الکتریکی بیشتری خواهد بود. افزایش دما نیز موجب افزایش هدایت الکتریکی و در نتیجه کاهش مقاومت در همه غلظت‌های مورد بررسی می‌شود. از طرفی دیگر مشاهده می‌شود که نانوذرات اکسید آهن، اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی منجر به افزایش فاکتور اتلاف نسبت به روغن پایه می‌شوند زیرا فاکتور اتلاف نسبت جریان مقاومتی عبوری از عایق که از حرکت الکترون‌ها در میدان الکتریکی ناشی می‌شود، به جریان خازنی عبوری از آن تعریف می‌شود. بنابراین وجود نانوذرات به عنوان ذرات خارجی در روغن موجب افزایش موضعی میدان الکتریکی در روغن می‌شود. این پدیده که به طور مشابهی

به نانوروغن اکسید آهن با ۲/۴۷ درصد است. اما بعد از ۵ روز تغییرات طیف جذبی افزایش می‌یابد درحالی که در ادامه پس از گذشت ۱۰ روز مقدار آن به ۵/۶۸، ۶/۷۳ و ۸/۲۳ درصد به ترتیب برای نانوروغن اکسید آلومینیوم، نانولوله‌های کربنی چند جداره و اکسید آهن می‌رسد. به‌عنوان یک نتیجه می‌توان این‌گونه بیان نمود که چون بعد از ۱۰ روز حداکثر تغییرات کمتر از ۱۰ درصد است لذا می‌توان پایداری نانوروغن را در مدت‌زمان آزمایش قابل قبول فرض کرد، هرچند که چالش استفاده طولانی مدت برای این استفاده نانوروغن‌ها وجود خواهد داشت که در دست بررسی است.

۴-۲ اثر نانو ذرات بر خواص فیزیکی روغن ترانسفورماتور

حضور نانوذرات در روغن ترانسفورماتور بر پارامترهای موثر عملکردی نظیر ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارت، ولتاژ شکست، گذردهی الکتریکی، فاکتور اتلاف و مقاومت الکتریکی موثر خواهد بود [۴۲، ۴۳]. از این رو در پژوهش حاضر، این پارامترها برای نانوروغن‌های حاوی نانولوله‌های کربنی چند جداره، اکسید آهن و اکسید آلومینیوم با غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده



شکل ۶. الف) نمودار دمایی ترانسفورماتور با روغن معمولی ب) نمودار دمایی ترانسفورماتور با نانوروغن نانولوله‌های کربنی چند دیواره در غلظت ۰/۵ g/l

Fig. 6. a) Temperature graph of the transformer with regular oil b) Temperature graph of the transformer with multi-walled carbon nanotube nano-oil at a concentration of 0.5 g/l

اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی چند جداره نسبت به روغن پایه کاهش می‌یابند. زیرا این نانوذرات توانایی به تله انداختن و کند کردن الکترون‌های آزاد را ندارند و در روغن مانند ذرات خارجی و ناخالصی عمل می‌کنند که با افزایش موضعی میدان در اطراف خود موجب افزایش تخلیه جزیی در فاصله بین دو الکترود شده و ولتاژ شکست را کاهش می‌دهند.

به طوری کلی می‌توان این گونه از این بخش نتیجه‌گیری نمود که افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره به روغن ترانسفورماتور نسبت به بقیه نانوذرات بیشترین اثرگذاری را در عامل‌های مختلف دارد؛ لذا پیش‌بینی می‌شود که بیشترین کاهش دمای نقطه داغ را داشته باشد.

۴-۳- اثر نانوذرات بر عملکرد حرارتی ترانسفورماتور

به منظور درک بهتر از عملکرد حرارتی ترانسفورماتور، آزمون‌های آزمایشگاهی برای ترانسفورماتور تحت بار کامل برای روغن معمولی و روغن با ۰/۵ g/l نانوذره نانولوله‌های کربنی چند جداره که بیشترین تغییرات را در خواص فیزیکی روغن داشت، در محیط آزمایشگاهی انجام شد. همچنین هر آزمون برای ارزیابی قابلیت تکرارپذیری سه مرتبه انجام شد که نتایج به دست آمده با یکدیگر تطابق داشتند. شکل ۶ نمودار دمایی حسگرها در نقاط مختلف ترانسفورماتور برای روغن معمولی و نانوروغن حاوی نانولوله‌های

در پژوهش‌های پیشین [۴۷، ۴۸] ذکر شده، نشان می‌دهد که نانوروغن‌ها نسبت به روغن دارای الکترون‌های آزاد بیشتری هستند که در حضور میدان الکتریکی خارجی به حرکت درآمده و جریان تولید می‌کنند و هر چه نانو ذره رسانایی الکتریکی بیشتری داشته باشد، منجر به اتلاف انرژی کمتر می‌شود. از آنجایی که اکسید آلومینیوم، کمترین گذردهی الکتریکی را دارد بنابراین، جریان مقاومتی و تلفات عایقی بالاتری نسبت به دو نانوروغن دیگر از خود نشان می‌دهد، زیرا فرآیندهای رسانش و پلاریزاسیون دو پدیده اصلی هستند که باعث اتلاف دی‌الکتریک می‌شوند. از طرفی دیگر همان‌طور که از نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود، ولتاژ شکست نانوروغن‌ها روندی متفاوت داشته است. به عنوان مثال نانوروغن حاوی نانوذرات اکسید آهن، ولتاژ شکست را نسبت به روغن پایه افزایش داده است. دلیل این امر این است که در این نانوروغن، نانوذرات اکسید آهن در روغن، به عنوان نقش رباینده الکترون عمل کرده و با تله انداختن الکترون‌ها و کاهش انرژی آن‌ها موجب افزایش ولتاژ شکست می‌شوند. به طوری که الکترون‌های سریع در مسیر حرکت خود در روغن با ذرات اکسید آهن برخورد کرده و این برخورد موجب کاهش سرعت و انرژی آنها می‌شود و در نتیجه در نانوروغن حاوی اکسید آهن، الکترون‌ها به ولتاژ بالاتری نیاز دارند تا بتوانند در فاصله بین دو الکترود حرکت کرده و موجب رسانایی روغن شوند [۲۶]. علاوه بر این ولتاژ شکست نانوروغن‌های

توان کامل ارائه شده است.

مطابق جدول ۳، با مقایسه دمای نقطه داغ نانوروغن اکسید آهن با دمای نقطه داغ روغن پایه ترانسفورماتور مشاهده می‌شود که وجود نانوذرات اکسید آهن در بهبود انتقال حرارت سیستم موثر به نظر نمی‌رسد. به عنوان مثال دمای نقطه داغ نانوروغن اکسید آهن در ۶۸ درصد توان کامل $۶۵/۵ \pm ۰/۴۳۲$ درجه سانتی‌گراد است و در ۱۰۰ درصد توان کامل $۷۹/۱ \pm ۰/۶۶۵$ درجه سانتی‌گراد را به خود اختصاص داده است. این بدین معنی است که در بهترین حالت حدود $۱/۳$ درجه سانتی‌گراد عملکرد دمایی ترانسفورماتور، نسبت به روغن پایه بهبود می‌یابد. توانایی پایین نانوروغن اکسید آهن در کاهش دمای ترانسفورماتور می‌تواند ناشی از پایین بودن نسبی ضریب هدایت حرارتی نانوذرات اکسید آهن و یا بالا بودن میزان ته‌نشینی این نانوذرات در ترانسفورماتور در حین اندازه‌گیری باشد. همانطور که در شکل ۵-پ قابل مشاهده است، میزان ته‌نشینی نانوروغن اکسید آهن به نسبت دیگر نانوروغن‌ها بیشتر بوده که می‌تواند از عوامل موثر بر عملکرد نامطلوب آن باشد.

در نانو روغن حاوی اکسید آلومینیوم به‌ازای ۳۸، ۶۸ و ۱۰۰ درصد توان کامل، دما میانگین نقطه داغ ترانسفورماتور به ترتیب به $۴۹/۲ \pm ۰/۶۷۶$ ، $۶۴/۷ \pm ۰/۳۳۴$ و $۷۸/۳ \pm ۰/۴۹۷$ درجه سانتی‌گراد ثبت می‌شوند. این در حالی است که دماهای متناسب با این توان‌ها برای روغن حاوی نانولوله‌های کربنی چند جداره به ترتیب $۴۸/۵ \pm ۰/۳۵۶$ ، $۴۸/۵ \pm ۰/۳۵۶$ و $۷۵ \pm ۰/۵۴۲$ درصد

کربنی چند جداره در مدت آزمون نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین دما در هر دو آزمون در حسگرهای I و K که در بالاترین نقطه قرار دارند رخ می‌دهد. درحالی‌که میانگین مقادیر این دو حسگر برای روغن $۸۰/۴$ درجه سانتی‌گراد و برای نانوروغن حاوی نانولوله‌های کربنی چند جداره ۷۵ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. این در حالی است که دمای نقاط مختلف ثبت شده توسط حسگرها در حضور نانوذرات به هم نزدیک‌تر شده و در مدت‌زمان کمتری به حالت پایا می‌رسد. دلیل این امر را می‌توان به ضریب هدایت حرارتی این نانوذره ($\approx ۰/۱۷۵ \text{ W/m.k}$) ارتباط داد که نسبت به دیگر نانوذرات بیشتر است. این باعث می‌شود توزیع حرارت در زمان آزمون سریع‌تر انجام شده و نیز انتقال حرارت به محیط مؤثرتر صورت گیرد. در ادامه آزمون انواع روغن‌ها اعم از روغن معدنی و سه نانو روغن اکسید آهن و اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی چند جداره در غلظت $۰/۵$ گرم بر لیتر در ترانسفورماتور آزمایشگاهی در توان‌های ۳۸، ۶۸ و ۱۰۰ درصد توان کامل انجام شد، تا عملکرد آن‌ها ارزیابی شود. در این راستا دمای میانگین حسگرهای I و K که نشان‌دهنده دمای روغن در گرم‌ترین ناحیه درون ترانسفورماتور (نقطه داغ) می‌باشند، به‌عنوان مبنای مقایسه دما انتخاب شد. علاوه بر دمای نقطه داغ، دمای محیط، دمای نسبی که بیانگر اختلاف میان دمای نقطه داغ و دمای محیط است، به همراه عدم قطعیت‌ها (مطابق رابطه ۴) در جداول ۳، ۴ و ۵ برای سه نانوروغن در سه توان ۳۸، ۶۸ و ۱۰۰ درصد

جدول ۳. دمای روغن‌ها در ترانسفورماتور آزمایشگاهی به ازای ۳۸ درصد توان کامل

Table 3. The temperature of the oils in the laboratory transformer at 38% of full power.

سیال	I,K (°C)	T_{∞} (°C)	(I,K- T_{∞}) دمای نسبی	عدم قطعیت u (°C)
روغن معدنی	۴۹/۷	۲۵	۲۴/۷	۰/۸۵۸
نانوروغن اکسید آهن	۴۹/۶	۲۴/۸	۲۴/۸	۰/۸۵۸
نانوروغن اکسید آلومینیوم	۴۹/۲	۲۵/۳	۲۳/۹	۰/۶۷۶
نانوروغن نانولوله‌های کربنی	۴۸/۵	۲۵/۹	۲۲/۶	۰/۳۵۶

جدول ۴. دمای روغن‌ها در ترانسفورماتور آزمایشگاهی به ازای ۶۸ درصد توان کامل

Table 4. The temperature of the oils in the laboratory transformer at 68% of full power.

سیال	I,K (°C)	T _∞ (°C)	دمای نسبی (I,K- T _∞)	عدم قطعیت u (°C)
روغن معدنی	۶۶/۱	۲۵/۸	۴۰/۳	۰/۵۸۹
نانوروغن اکسید آهن	۶۵/۵	۲۵/۵	۴۰	۰/۴۳۲
نانوروغن اکسید آلومینیوم	۶۴/۷	۲۶	۳۸/۷	۰/۳۳۴
نانوروغن نانولوله‌های کربنی	۶۱	۲۵/۶	۳۵/۴	۰/۵۷۱
چند جداره				

جدول ۵. دمای روغن‌ها در ترانسفورماتور آزمایشگاهی به ازای ۱۰۰ درصد توان کامل

Table 5. The temperature of the oils in the laboratory transformer at 100% of full power.

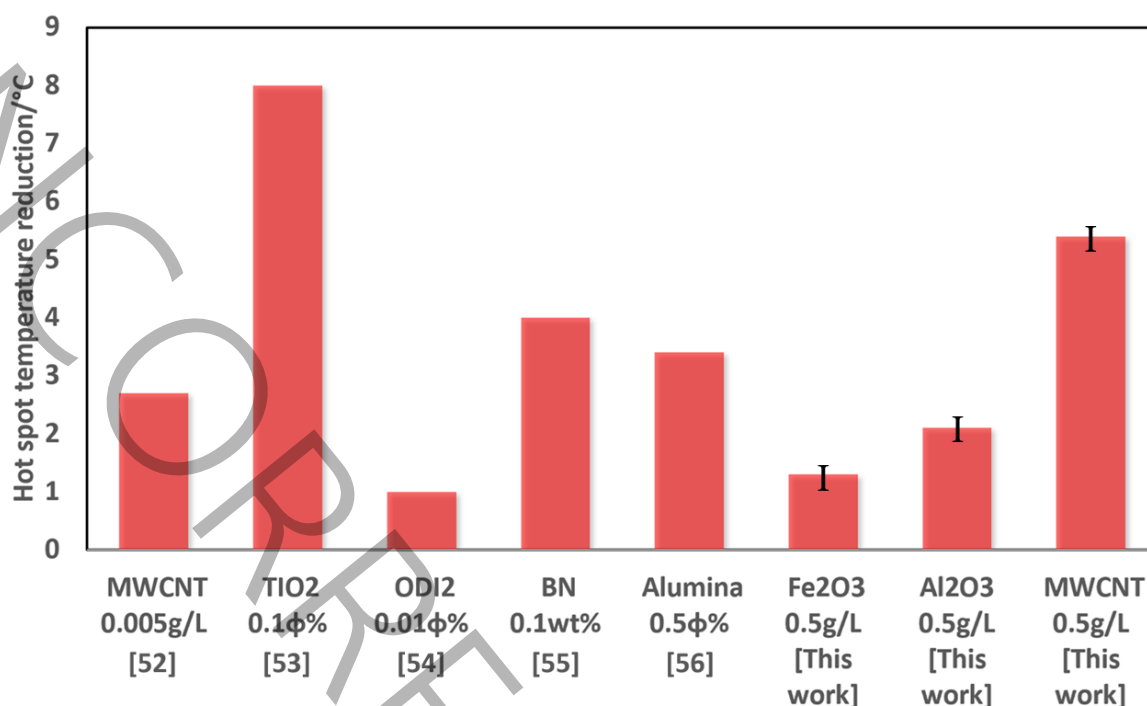
سیال	I,K (°C)	T _∞ (°C)	دمای نسبی (I,K- T _∞)	عدم قطعیت u (°C)
روغن معدنی	۸۰/۴	۲۴/۸	۵۵/۶	۰/۶۶۵
نانوروغن اکسید آهن	۷۹/۱	۲۴	۵۵/۱	۰/۴۳۲
نانوروغن اکسید آلومینیوم	۷۸/۳	۲۵/۳	۵۳	۰/۴۹۷
نانوروغن نانولوله‌های کربنی	۷۵	۲۵/۷	۴۹/۳	۰/۵۴۲
چند جداره				

نقش پررنگ‌تری را در انتقال حرارت ایفا کرده که موجب کاهش بیشتر دما می‌شود. به‌منظور مقایسه نتایج تجربی پژوهش حاضر با دیگر پژوهش‌های انجام شده با نانوذرات مختلف، شکل ۷ که میزان کاهش دمای نقطه داغ روغن به‌ازای افزودن مقدار مشخصی از نانوذرات به روغن ترانسفورماتور را نشان می‌دهد، ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بهترین نتیجه ثبت شده مربوط به نانوذره اکسید تیتانیوم است که توانسته کاهش حدود ۸ درجه سانتی‌گراد در دمای نقطه داغ را ثبت کند اما نکته‌ای که در این جا مطرح است قیمت و درصد حجمی این نانوذره است که بسیار بالاتر از نانوذرات مورد استفاده در این پژوهش و دیگر مطالعات ارایه شده است. از طرفی دیگر حضور نانوذرات فلزی با درصد وزنی بالا در مخزن ترانسفورماتور منجر به تخلیه الکتریکی شده و

درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. این نشان می‌دهد که عملکرد این دو نانوذره در همه توان‌ها از نانوذره اکسید آهن بهتر بوده است. به‌طوری‌که در بهترین حالت برای نانوذره اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی چند جداره کاهش دمای نقطه داغ به ۲/۱ و ۵/۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به روغن پایه می‌رسد؛ بنابراین نانولوله‌های کربنی چند جداره نسبت به دو نانوروغن دیگر بهترین عملکرد را داشته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش توان ورودی و دمای ترانسفورماتور، میزان اختلاف دمای نانوروغن‌ها نسبت به روغن پایه افزایش می‌یابد و کاهش دمای بیشتر نانوروغن‌ها نسبت به روغن پایه اتفاق می‌افتد. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان ورودی و دمای ترانسفورماتور، میزان انرژی و حرکات برونین^۱ نانوذرات بیشتر شده و

1 Brownian motion



شکل ۷. نمودار مقایسه میزان کاهش دمای نقطه داغ ترانسفورماتور در پژوهشهای مختلف [۵۲-۵۶]

Fig. 7. Comparison chart of the reduction in hot spot temperature of the transformer in various studies [52-56].

ترانسفورماتور آزمایشگاهی به‌ازای توان‌های ۳۸، ۶۸ و ۱۰۰ درصد توان کامل اندازه‌گیری شد. ابتدا دمای نقطه داغ ترانسفورماتور با روغن معدنی در توان‌های ورودی ثبت و به‌عنوان مرجع برای مقایسه با دیگر آزمون‌ها در نظر گرفته شد. بررسی‌ها نشان داد که علی‌رغم یکسان بودن ضریب هدایت حرارتی نانوروغن‌های حاوی نانوذرات اکسید آهن ($W/m.k$) اکسید آلومینیوم (0.121) و اکسید آلومینیوم (0.120 W/m.k)، استفاده از نانوذره اکسید آهن در روغن ترانسفورماتور تأثیر محسوسی در کاهش دمای نقطه داغ ترانسفورماتور نداشته و در بهترین حالت دمای نقطه داغ $1/3$ درجه نسبت به آزمون پایه کاهش یافت. درحالی‌که با افزودن نانوذره اکسید آلومینیوم به روغن ترانسفورماتور به علت پایداری بیشتر، کاهش دمای $2/1$ درجه سانتی‌گراد را در به همراه داشت. اما همان‌طور که انتظار می‌رفت افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره (0.175 W/m.k) به روغن ترانسفورماتور موجب کاهش $5/4$ درجه در دمای نقطه داغ شد که از دو نانوروغن دیگر اثرگذاری بیشتری داشت.

کارایی سیستم را مختل می‌کند. بنابراین به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از نانوذره نانولوله‌های کربنی چند جداره با درصد مناسب که هم سازگار با محیط ترانسفورماتور است و هم قیمت بالایی ندارد می‌تواند گزینه مناسبی برای این حوزه باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تجربی اثر افزودن سه نانوذره اکسید آهن، اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی چند جداره بر کاهش دمای نقطه داغ ترانسفورماتور پرداخته شد. برای این منظور خواص روغن‌ها اعم از روغن معدنی و سه نانوروغن حاوی نانوذرات اکسید آهن، اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی چند جداره در غلظت 0.5 گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت. غلظت انتخاب شده به دلیل قرارگرفتن تمام مشخصه‌ها روغن ترانسفورماتور نظیر ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارت، ولتاژ شکست، گذردهی الکتریکی، فاکتور اتلاف و مقاومت الکتریکی در محدوده مجاز بود. در ادامه به طور تجربی دمای نانوروغن‌ها در محل‌های متفاوت

- Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET), IEEE, Islamabad, Pakistan 2015, pp. 1-3.
- [9] M. Rizwan, S.A. Khan, M.R. Khan, A.A. Khan, Experimental and statistical investigation on the dielectric breakdown of magneto nanofluids for power applications, *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 19(1) (2024) 5.
- [10] Y. Lv, W. Wang, K. Ma, S. Zhang, Y. Zhou, Nanoparticle Effect on Dielectric Breakdown Strength of Transformer Oil-Based Nanofluids, in: 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, Shenzhen, China 2013, pp. 680-682.
- [11] A. Siddique, M. Yaqoob, W. Aslam, S. Atiq, M.U. Shahid, F. Zaffar, Stability and Breakdown Strength Improvements of the Transformer Insulating Oil by Blend of Blackseed, Flaxseed and Castor Oil Based Novel Nanofluid Via Green Synthesis Revolution, Flaxseed and Castor Oil Based Novel Nanofluid Via Green Synthesis Revolution, (2024) 1-16.
- [12] J. Li, Z. Zhang, P. Zou, S. Grzybowski, M. Zahn, Preparation of a Vegetable Oil-Based Nanofluid and Investigation of Its Breakdown and Dielectric Properties, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 28 (2012) 43-50.
- [13] B. Du, J. Li, B.M. Wang, Z.T. Zhang, Preparation and Breakdown Strength of Fe₃O₄ Nanofluid Based on Transformer Oil in: International Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, 2012, pp. 311-313.
- [14] D.H. Fontes, G. Ribatski, E.P.B. Filho, Experimental evaluation of thermal conductivity, viscosity and breakdown voltage AC of nanofluids of carbon nanotubes and diamond in transformer oil, *Diamond & Related Materials*, 58 (2015) 115-121.
- [15] N. Jamshidi, M. Farhadi, D.D. Ganji, K. Sedighi, Experimental Investigation on the Viscosity of Nanofluids, *International Journal of Engineering*, 25 (2012) 201-209.
- [16] M. Shanbedi, A. Dashtbozorg, H. Karimi, R. Rovesi, Graphene Nanoplatelets-and Multi-Walled Carbon
- [1] V. Singh, M. Gupta, A. Kumar, S. Luthra, A. Kumar, Experimental Investigations of Thermophysical Properties and Convective Heat Transfer of Al₂O₃ and CuO Nanofluids in a Copper Tube: Proposing New Correlations, *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(3) (2023) 229.
- [2] L.S. Sundar, S. Mesfin, E.V. Ramana, Z. Said, A.C. Sousa, Experimental investigation of thermo-physical properties, heat transfer, pumping power, entropy generation, and exergy efficiency of nanodiamond+ Fe₃O₄/60: 40% water-ethylene glycol hybrid nanofluid flow in a tube, *Thermal Science and Engineering Progress*, 21 (2021) 100799.
- [3] M.M. Ghafurian, A. Joveini, S. Safarzadeh, H. Niazmand, Experimental study of passive cooling techniques in an oil-immersed transformer building, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, (2023) 1-12.
- [4] H. Zuo, F. Wang, Z. Huang, Q. Wang, J. Li, P. Rozga, Synergistic effect of electric field and temperature on POSS modified natural ester insulating oil: A molecular dynamics study, *Journal of Molecular Liquids*, 355 (2022) 118923.
- [5] F.T. Dastjerd, H. Niazmand, O. Mahian, Experimental and numerical investigation of wicked heat pipe cooling efficacy in oil-immersed transformers, *Applied Thermal Engineering*, 250 (2024) 123413.
- [6] H. Jin, T. Andritsch, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, AC Breakdown Voltage and Viscosity of Mineral Oil based SiO₂ Nanofluids, in: IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal, QC, Canada 2012, pp. 902-905.
- [7] A.F. Mubarak, D.A. Asfani, I.M.Y. Negara, D. Fahmi, H. Subekti, Analysis of Breakdown Characteristics in Nanofluid Insulation Materials with Metal Particle Contamination, *JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering)*, 8(2) (2024).
- [8] M. Rafiq, D. Khan, M. Ali, Insulating Properties of Transformer Oil-based Silica Nanofluids, in: 2015 Power

- (2021) 817-825.
- [25] C. Mu-tian, D. Yue-fan, L. Yu-zhen, Z. Jian-quen, L. Xiao-xin, L. Cheng-rong, Effect of Nanoparticles on the Dielectric Strength of Aged Transformer Oil in: 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico 2011, pp. 664-667.
- [26] A. Fallah-Shojaie, A. Tavakoli, M. Ghomashpasand, S. Hoseinzadeh, Experimental Evaluation on the dielectric breakdown voltage of fresh and used Transformer Oil mixed with Titanium dioxide nanoparticles in the Gilan Electrical distribution company in: 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), IEEE, Mshhad, Iran, 2013, pp. 1-4.
- [27] R. Liu, L.A. Pettersson, T. Auletta, O. Hjortstam, Fundamental Research on the Application of Nano Dielectrics to Transformers in: 2011 Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, IEEE, Cancun, Mexico, 2011, pp. 423-427.
- [28] M. Bukruteen, R. Karthik, R. Madavan, Investigation of Critical Parameters of Insulating Mineral Oil Using Semiconductive Nanoparticles in: 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologie (ICCPCT), IEEE, Nagercoil, India 2013, pp. 294-299.
- [29] J.C. Lee, W.H. Lee, S.H. Lee, S. Lee, Positive and negative effects of dielectric breakdown in transformer oil based magnetic fluids, *Materials Research Bulletin* 47 (2012) 2984-2987.
- [30] Y.Z. Lv, Y.F. Du, J.Q. Zhou, X.X. Li, M.T. Chen, C.R. Li, G.L. Wang, Nanoparticle Effect on Electrical Properties of Aged Mineral Oil Based Nanofluids in: CIGRE, Paris, France, 2012, pp. 1-6.
- [31] R. Karthik, T.S.R. Raja, R. Madavan, Enhancement of Critical Characteristics of Transformer Oil Using Nanomaterials, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38 (2013) 2725-2733.
- [32] D.E.A. Mansour, E.G. Atiya, R.M. Khattab, A.M. Azmy, Effect of Titania Nanoparticles on the Dielectric Properties of Transformer Oil-Based Nanofluids in: Nanotubes-Based Transformer Oil Nanofluids as Coolants with Enhanced Performance, *Research Square*, (2024) 1-15.
- [17] R.S. Dondapati, V. Saini, N. Kishore, V. Prasad, Enhancement of Performance Parameters Of Transformer Using Nanofluids, *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 4 (2015) 383-386.
- [18] M. Dong, L.P. Shen, H. Wang, H.B. Wang, J. Miao, Investigation on the Electrical Conductivity of Transformer Oil-Based AlN Nanofluid, *Journal of Nanomaterials*, 2013 (2013) 842963, 842961-842967.
- [19] S. Porgar, A.J. Chamkha, Synthesis, Characterization and Thermal Analysis of MWCNT-Transformer Oil-Based Nanofluid: An Experimental Study, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(12) (2023) 16445-16453.
- [20] M. Nazari, S. Jafarmadar, S. Gohari, Convective heat transfer behavior and AC dielectric breakdown voltage of electric power transformer oil with magnetic colloidal nano-fluid: An experimental study, *Case Studies in Thermal Engineering*, 45 (2023) 103017.
- [21] C. Choi, H.S. Yoo, J.M. Oh, Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants, *Current Applied Physics*, 8 (2008) 710-712.
- [22] A. Paul, B. Patgiri, N. Sarma, Transformer oil based Casson ternary hybrid nanofluid flow conFig.d by a porous rotating disk with hall current, *ZAMM Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 104(4) (2024) e202300704.
- [23] M. Singh, L. Kundan, Experimental Study on Thermal Conductivity and Viscosity of Al₂O₃-Nanotransformer Oil, *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME)* 2 125-130.
- [24] S. Sumathi, R. Rajesh, P. Subburaj, Investigation of dielectric strength of transformer oil based on hybrid TiO₂/Al₂O₃/MoS₂ Nanofluid using taguchi and response surface methodology, *IETE Journal of Research*, 67(6)

- [41] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu, Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles, *Journal of applied physics*, 91(7) (2002) 4568-4572.
- [42] M. Hussain, F.A. Mir, M. Ansari, Nanofluid transformer oil for cooling and insulating applications: A brief review, *Applied Surface Science Advances*, 8 (2022) 100223.
- [43] M. Karatas, Y. Bicen, Nanoparticles for next-generation transformer insulating fluids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167 (2022) 112645.
- [44] R.S. Sai, J. Rafi, S. Farook, N. Kumar, M. Parthasarathy, R.A. Bakkiyaraj, Degradation studies of electrical, physical and chemical properties of aged transformer oil, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2020, pp. 012056.
- [45] P.K. Watson, J.B. Higham, Electric breakdown of transformer oil, *Proceedings of the IEE-Part IIA: Insulating Materials*, 100(3) (1953) 168-174.
- [46] C.T. Dervos, C.D. Paraskevas, P.D. Skafidas, P. Vassiliou, A complex permittivity based sensor for the electrical characterization of high-voltage transformer oils, *Sensors*, 5(4) (2005) 302-316.
- [47] R. Liu, L.A. Pettersson, T. Auletta, O. Hjortstam, Fundamental research on the application of nano dielectrics to transformers, in: *2011 Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena*, IEEE, 2011, pp. 423-427.
- [48] S.A. Khan, A.A. Khan, M. Tariq, Measurement of Tan-delta and DC Resistivity of Synthetic Ester Based Oil Filled with Fe₂O₃, TiO₂ and Al₂O₃ Nanoparticles, *Smart Science*, 9(3) (2021) 216-225.
- [49] <https://www.electrical4u.com/transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil/>, in 2024.
- [50] <https://wiki.anton-paar.com/en/transformer-oilsprocess-oils/>, in 2024.
- [51] <https://lambdageeks.com/viscosity-of-transformer-oil/>, in 2024.
- [52] N.S. Suhaimi, M.F. Md Din, C.Y. Tan, M.T. Ishak, A.R.A. Rahman, W.F.H. Wan Zambri, J.L. Wang, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, Montreal, QC, Canada 2012, pp. 295-298.
- [33] J.T. Tijerina, T.N. Narayanan, G. Gao, M. Rohde, D.A. Tsentelovich, M. Pasquali, P.M. Ajayan, Electrically Insulating Thermal Nano-Oils Using 2D Fillers, *ACS NANO*, 6 (2012) 1214-1220.
- [34] J. Ghasemi, S. Jafarmader, M. Nazari, Effect of Nanoparticles on the Lightning Inmulse Breakdown Voltage of Transformer Oil, *Journal of Magnet i sm and Magnet i c Mat er ial s*, 389 (2015) 148-152.
- [35] K.N. Koutras, S.N. Tegopoulos, V.P. Charalampakos, A. Kyritsis, I.F. Gonos, E.C. Pyrgioti, Breakdown Performance and Partial Discharge Development in Transformer Oil-Based Metal Carbide Nanofluids, *Nanomaterials*, 12(2) (2022) 269.
- [36] H. Alizadeh, H. Pourpasha, S.Z. Heris, P. Estellé, 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 (2022) 101713.
- [37] A. Mashhadzadeh, M. Ghanbari, A. Koochaki, M. Ahangari, Improving the Thermal and Electrical Properties of Transformer Oil Using Hybrid Nanofluid, *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, 10(3) (2022) 175-178.
- [38] N.S. Suhaimi, M.F.M. Din, M.T. Ishak, A.R.A. Rahman, J. Wang, M.Z. Hassan, Performance and limitation of mineral oil-based carbon nanotubes nanofluid in transformer application, *Alexandria Engineering Journal*, 61(12) (2022) 9623-9635.
- [39] T.-K. Hong, H.-S. Yang, C. Choi, Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids, *Journal of Applied Physics*, 97(6) (2005) 064311.
- [40] K. Hong, T.-K. Hong, H.-S. Yang, Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles, *Applied Physics Letters*, 88(3) (2006) 031901.

7 (2021) 4325-4334.

[55] B. Du, X. Li, M. Xiao, High thermal conductivity transformer oil filled with BN nanoparticles, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 22(2) (2015) 851-858.

[56] Z. Taghikhani, M.A. Taghikhani, G. Gharehpetian, A comprehensive investigation on the efficiency of alumina nanoparticles in ONAN and OFAN cooling performance enhancement of transformers, Powder Technology, 387 (2021) 466-480.

Electrical properties and Raman scattering of palm oil based carbon nanotube, Key Engineering Materials, 908 (2022) 343-347.

[53] B. Mehrvarz, F. Bahadori, S.Z. Moghaddam, Heat transfer enhancement in distribution transformers using TiO₂ nanoparticles, Advanced Powder Technology, 30(2) (2019) 221-226.

[54] A.A. Taheri, A. Abdali, M. Taghilou, H.H. Alhelou, K. Mazlumi, Investigation of mineral oil-based nanofluids effect on oil temperature reduction and loading capacity increment of distribution transformers, Energy Reports,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Tavakoli Dastjerd, A. H. Joveini, M. Derayatifar, H. Niazmand, *Experimental Study of Nano-Oils Containing Iron Oxide, multi-walled carbon nanotubes, and Aluminum Oxide in Reducing the Hot Spot Temperature of Transformers*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 56(5) (2024) 741-762.

DOI: [10.22060/mej.2024.22976.7702](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22976.7702)



UNCORRECTED PROOF