

# تعیین گروه گرمایی<sup>۱</sup> پست برق فشرده<sup>۲</sup> 800kVA ساخت شرکت توسعه پست‌های ایران ترانسفو زنجان

**جلال قاسمی\*** دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، j.ghasemi@znu.ac.ir  
**مهدی چراغی** دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، mehdicheraqi@gmail.com

## چکیده

در این تحقیق پست برق فشرده با ظرفیت 800kVA شرکت توسعه پست‌های ایران ترانسفو زنجان مدل‌سازی و گروه گرمایی آن تعیین گردیده است. این پست دارای ترانسفورماتور سه فاز رزینی خشک که به همراه اتاقک قرارگیری آن به صورت سه بعدی مدل‌سازی و به بررسی پارامترهای مورد نظر از جمله کیفیت هدایت جریان سیال به سمت بوبین‌ها، افت فشار و توزیع دما در قسمت‌های مهم پرداخته شده است. جهت بررسی صحت نتایج، چهار حسگر دما در نقاط مختلف پست تعبیه گردید تا نتایج تحلیل با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی شرکت آزمایشگاه‌های صنایع برق ایران دارای اختلاف حداکثر 5/AK است. با اعمال داده‌ها طبق استاندارد IEC62271-202 و تعیین شرایط مرزی مورد نظر در آن، اختلاف دمای حداکثر که در بوبین فشار ضعیف اتفاق می‌افتد، 12K به دست آمد. لذا گروه گرمایی این پست طبق تعریف استاندارد مذکور، 15K خواهد بود. با وجود اینکه مقدار بدست آمده 14٪ کمتر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد، گروه گرمایی این پست در آزمایشگاه مذکور نیز 15K تعیین گردید که بیانگر نتایج خوب این تحقیق است.

**واژه‌های کلیدی:** گروه گرمایی پست برق فشرده، خنک‌کاری بوبین‌های ترانسفورماتور، مدل‌سازی سه بعدی، استاندارد IEC62271-202.

## Determination of the thermal class of 800KVA compact electric power substation made by Irantransfo Substations Development Company

**J. Ghasemi** Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran  
**M. Cheraghi** Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

### Abstract

In this research, the compact power substation with 800KVA capacity that is produced by Irantransfo Substations Development Company, has been modeled and its thermal class is determined. Modeling of this compact power substation that include a three-phase cast resin dry transformer placed in the enclosure chamber carried out in three-dimension. Then the desired parameters such as fluid flow, pressure drop and temperature distribution in significant parts are investigated. In order to verify the accuracy of the results, four sensors were placed in suitable locates to compare the results of the analysis with the measured values of these sensors. The results of the modeling in comparison with the experimental results show a difference of up to 5.8K. By applying data according to IEC62271-202 standard and appropriate boundary conditions, the maximum temperature difference which occurs in low voltage bobbin is 12K. So the thermal class will be 15K according standard definition. Although it was 14% lower than the laboratory results, the thermal class of this substation also determined in the Laboratory of Electrical Industries of Iran 15K and indicate the good results of this study.

**Keywords:** Thermal class of compact electric power substation, Power transformer bobbins cooling, 3D modeling, IEC62271-202 standard.

### ۱- مقدمه

میزان بار دریافتی، ظرفیت فیدرها و آرایش پست‌ها موثر واقع گردد. همچنین بهبود گروه گرمایی در نتیجه بهبود سیستم انتقال گرما برای خنک‌کاری در این پست‌ها، باعث تقویت تجارت شرکت‌های تولید کننده آنها در رقابت تجاری بین‌المللی خواهد شد. طبق استاندارد IEC62271-202، تهویه هوا در پست‌های فشرده به صورت طبیعی در نظر گرفته می‌شود و اگر پست دارای تجهیزات الکترونیکی

امروزه استفاده از پست‌های برق فشرده به دلیل قابلیت جابه‌جایی آنها در مواقع اضطراری و یا بکارگیری آن به عنوان پست برق سیار در نقاط دور دست مورد توجه است. دفع مناسب گرما تولیدی ترانسفورماتور در این پست‌ها، می‌تواند بر طول عمر تجهیزات به‌خصوص ترانسفورماتور مورد استفاده در آن، قابلیت اعتماد به پست،

Thermal Class<sup>1</sup>  
 Compact<sup>2</sup>

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: j.ghasemi@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۰۷

حساس به دما باشد از فن و یا خنک کننده‌های دیگر جهت تهویه آن با حفظ گروه گرمایی استفاده می‌شود. ولی آنچه مسلم است بهترین و مطمئن‌ترین راه جهت تهویه هوا و رعایت گروه گرمایی، روش طبیعی می‌باشد. چرا که در صورت بروز مشکل دسترسی برای تعمیرات این تجهیزات در اکثر مواقع سخت و زمانبر بوده و این موضوع موجب اختلال در عملکرد پست و یا خارج شدن آن از مدار خواهد شد. تحقیق حاضر به منظور تعیین گروه گرمایی پست فشرده با ظرفیت 800kVA تولیدی شرکت توسعه پست‌های ایران ترانسفو می‌باشد و شرایط اعمال شده در آن بر اساس اطلاعات واقعی در شرایط کار نامی این نوع پست در نظر گرفته شده است. راموس و همکاران [۱] در یک تحقیق عددی، انتقال گرمای جابجایی بر روی دو نمونه از پست زیرزمینی با درجه‌های متفاوت را مطالعه نموده‌اند. این تحقیق به منظور به دست آوردن الگوی جریان هوا و توزیع دمای مناسب در داخل پست فشرده صورت گرفته و صحت‌سنجی آن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انجام گردیده است. دگفا و همکاران [۲] سیستم خنک‌کاری یک پست فشرده را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق از مقاومت‌های سرامیکی برای تولید گرما به جای گرمای تولید شده توسط ترانسفورماتور استفاده شده و برای صحت‌سنجی از یک مدل آزمایشگاهی مقیاس شده استفاده گردیده است. یو و همکاران [۳] تأثیر مساحت درجه‌های ورودی و خروجی و همچنین محل قرارگیری درجه‌ها را بر خنک‌کاری پست برق فشرده مورد بررسی قرار داده‌اند. این پژوهش که برای پست برق فشرده با یک ترانسفورماتور سه فاز صورت گرفته است، ابتدا محل درجه‌های ورودی ثابت در نظر گرفته شده و مکان درجه‌های خروجی تغییر کرده است که با افزایش ارتفاع خروجی، دمای هوای خروجی کمتر شده و دبی هوا زیاد شده است. در قسمت دیگر با ثابت نگاه داشتن محل ورودی‌ها و خروجی‌ها و همچنین مساحت ورودی، مساحت خروجی را تغییر داده است که با افزایش مساحت درجه دمای خروجی کاهش و دبی هوا افزایش یافته است. در مرحله بعد با ثابت نگاه داشتن همه پارامترها، ارتفاع ورودی افزایش داده شده که در نتیجه آن دمای خروجی افزایش می‌یابد ولی این افزایش در مقایسه با تغییر ارتفاع خروجی محسوس نمی‌باشد. افزایش مساحت درجه ورودی نیز باعث کاهش دمای اتاقک شده ولی تأثیر چندانی در دمای خروجی ندارد. در تحقیقی دیگر، اسکندر و ممی‌زاده [۴] به بررسی انتقال گرما و تأثیر آن بر طول عمر و پیری مواد عایقی و همچنین شرایط بهره‌برداری ترانسفورماتور روغنی پرداخته‌اند. مدل‌سازی گرمایی ترانسفورماتور به روش استفاده از مدار الکتریکی معادل با مدار گرمایی هم در مراجع [۵، ۶] صورت گرفته است. در این روش حجم محاسبات پایین می‌باشد ولی از دقت پایینی در مقایسه با تحلیل به روش دینامیک سیالات محاسباتی برخوردار است.

طبق استاندارد IEC 62271-202، برای تعیین گروه گرمایی پست فشرده، ترانسفورماتور آن را به تنهایی در فضای آزاد طبق شرایط مشخص قرار داده و دمای گرمترین نقطه آن اندازه‌گیری می‌شود. سپس اختلاف دمای آن را با حالتی که ترانسفورماتور در داخل اتاقک بوده، مقایسه می‌گردد. طبق استاندارد مذکور، اگر این اختلاف دما بین صفر تا ۵ کلوین باشد، گروه گرمایی پست ۵ کلوین و اگر بین ۵ تا ۱۰ کلوین باشد گروه گرمایی ۱۰ کلوین خواهد بود. این روند تا ۳۰ کلوین

با گام ۵ کلوین تعریف می‌گردد [۷]. لازم به ذکر است که هر چه گروه گرمایی پست پایین‌تر باشد، از کیفیت خنک‌کاری بالاتری برخوردار بوده و امکان بهره‌برداری از آن برای مناطق گرمسیری مناسب‌تر است. در این مقاله به مدل‌سازی و تحلیل نرم‌افزاری سیستم خنک‌کننده پست برق فشرده با ظرفیت 800kVA ساخت شرکت توسعه پست‌های ایران ترانسفو، با هدف تعیین گروه گرمایی آن پرداخته شده و پارامترهای مهم جریان و انتقال گرما در شرایط موجود مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه گام‌های بعدی در جهت بهینه‌سازی سیستم خنک‌کاری و کاهش گروه گرمایی آن را میسر می‌سازد.

## ۲- معادلات حاکم

برای بررسی میدان جریان و توزیع دمای هوای خنک کننده در فضا محاسباتی مورد نظر، با در نظر گرفتن محور y در راستای گرانش، معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی در حالت سه‌بعدی به شکل بقایی بعددار برای جریان آرام و آشفته تراکم‌ناپذیر به صورت معادلات (۱) تا (۵) خواهد بود [۸]. معیار تعیین کننده برای تشخیص رژیم جریان عدد بی بعد رایلی،  $Ra = \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\nu \alpha}$  است. با توجه به هندسه مورد بررسی، در صورت در نظر گرفتن فاصله بین بوبین‌ها به عنوان طول مشخصه (کوچکترین بعد مسئله) و اختلاف دمای بوجود آمده در سطح بوبین‌ها با هوای خنک کننده،  $10^{10} > Ra$  خواهد بود. بنابراین جریان در نواحی تحت تبادل انتقال گرما آشفته خواهد بود.

معادله بقای جرم

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

معادله تکانه در جهت x

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ (v^* + v_i^*) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (v^* + v_i^*) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (v^* + v_i^*) \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right\} \quad (2)$$

معادله تکانه در جهت y (در راستای گرانش)

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ (v^* + v_i^*) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (v^* + v_i^*) \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (v^* + v_i^*) \frac{\partial v}{\partial z} \right] \right\} + \rho g(1 - \beta(T - T_\infty)) \quad (3)$$

معادله تکانه در جهت z

$$\rho \left[ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ (v^* + v_i^*) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (v^* + v_i^*) \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (v^* + v_i^*) \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right\} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن مقدار صفر برای  $K, \varepsilon, v_i^*, \alpha_i^*$ ، معادلات فوق جریان آرام را پوشش خواهند داد [۸]. برای افزایش دقت مدل سازی و تحلیل، خواص هوا متغییر با دما در نظر گرفته که در جدول ۱ پارامترهای مورد نیاز در محدوده دمایی لازم آورده شده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی هوا بر حسب دما

T [k]	$\rho$ [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$C_p$ [ $\frac{kJ}{kg.k}$ ]	$\mu \times 10^5$ [ $\frac{kg}{m.s}$ ]	k [ $\frac{W}{m.k}$ ]	$\alpha \times 10^4$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]
۲۵۰	۱/۴۱۲۸	۱/۰۰۵۳	۱/۴۸۸	۰/۰۲۲۲۷	۰/۱۳۱۶۱
۳۰۰	۱/۱۷۷۴	۱/۰۰۵۷	۱/۹۸۳	۰/۰۲۶۲۴	۰/۲۲۱۶۰
۳۵۰	۰/۹۹۸	۱/۰۰۰۹	۲/۰۷۵	۰/۰۳۰۰۳	۰/۲۹۸۳
۴۰۰	۰/۸۸۲۶	۱/۰۰۱۴	۲/۲۸۶	۰/۰۳۳۶۵	۰/۳۷۶۰
۴۵۰	۰/۷۸۳۳	۱/۰۰۲۰۷	۲/۴۸۴	۰/۰۳۷۰۷	۰/۴۲۲۲
۵۰۰	۰/۷۰۴۸	۱/۰۰۲۹۵	۲/۶۷۱	۰/۰۴۰۳۸	۰/۵۵۶۴
۵۵۰	۰/۶۴۲۳	۱/۰۰۲۹۲	۲/۸۴۸	۰/۰۴۳۶	۰/۶۵۳۲
۶۰۰	۰/۵۸۷۹	۱/۰۰۵۵۱	۳/۰۱۸	۰/۰۴۶۵۹	۰/۷۵۱۲

بر اساس مقادیر جدول ۱، معادلات (۹) تا (۱۳) برای پارامترهای مورد نظر برازش و در مدل سازی استفاده شده است.

$$\rho = 4 \times 10^{-11} T^4 - 8 \times 10^{-8} T^3 + 6 \times 10^{-5} T^2 - 0.0248T + 4.7708 \quad (9)$$

$$C_p = 5 \times 10^{-12} T^4 - 9 \times 10^{-9} T^3 + 6 \times 10^{-6} T^2 - 0.0016T + 1.1575 \quad (10)$$

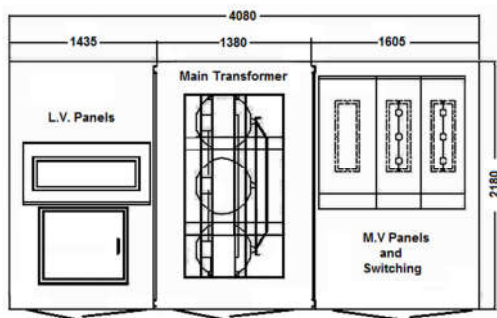
$$\mu \times 10^5 = -3 \times 10^{-14} T^6 + 9 \times 10^{-11} T^5 - 10^{-7} T^4 + 6 \times 10^{-5} T^3 - 0.0187T^2 + 3.1309 \times T - 213.32 \quad (11)$$

$$k = 10^{-9} T^3 - 5 \times 10^{-6} T^2 + 0.0103T - 0.0676 \quad (12)$$

$$\alpha \times 10^4 = 10^{-6} T^2 + 0.0007T - 0.1148 \quad (13)$$

### ۳- مدل سازی و تحلیل عددی

هندسه مورد نظر مطابق شکل ۱، ترانسفورماتور خشک رزینی سه فاز با توان 800kVA می باشد که در اتاقکی به طول ۱۳۸۰ میلی متر، عرض ۲۳۴۰ میلی متر و ارتفاع ۲۳۴۰ میلی متر قرار گرفته است (اتاقک وسط). دیواره های جانبی این اتاقک به اتاقک تابلوهای فشار ضعیف (اتاقک سمت چپ) و فشار متوسط به همراه سیستم سوئیچینگ (اتاقک سمت راست) منتهی می شود. به دلیل ناچیز بودن میزان گرمای تولیدی تجهیزات در اتاقک های کناری در مقایسه با ترانسفورماتور و برای دوری از افزایش غیر ضروری حجم محاسبات، از مدل سازی تجهیزات صرف نظر شده است.



شکل ۱- جانمایی تجهیزات پست مورد نظر

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \alpha \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ (k^* + \alpha_i^*) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (k^* + \alpha_i^*) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (k^* + \alpha_i^*) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \right\} \quad (5)$$

در این تحقیق از مدل دو معادله ای  $K-\varepsilon$  برای مدل سازی جریان آشفته استفاده گردیده که در معادلات (۶) تا (۷) این دو معادله آورده شده است.

معادله K

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial(uK)}{\partial x} + \frac{\partial(vK)}{\partial y} + \frac{\partial(wK)}{\partial z} = \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \nu^* + \frac{\nu_i^*}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \nu^* + \frac{\nu_i^*}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \nu^* + \frac{\nu_i^*}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right] \right\} + \nu \nu_i^* \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] + 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - \varepsilon - \beta g \frac{\nu_i^*}{Pr_i} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (6)$$

معادله  $\varepsilon$ 

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(u\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(v\varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(w\varepsilon)}{\partial z} = \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \nu^* + \frac{\nu_i^*}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \nu^* + \frac{\nu_i^*}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \nu^* + \frac{\nu_i^*}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] \right\} + C_1 \nu \nu_i^* \frac{\varepsilon}{K} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] + 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - C_2 \frac{\varepsilon^2}{K} - C_e \beta g \frac{\nu_i^*}{Pr_i} \frac{\varepsilon}{K} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (7)$$

که در این معادلات

$$\nu^* = \frac{\nu}{\nu_{air}} \quad (8)$$

$$\nu_i^* = \frac{\alpha C_\mu K^2}{\nu \varepsilon}$$

$$\alpha_i^* = \frac{\nu \nu_i^*}{\alpha Pr_i}$$

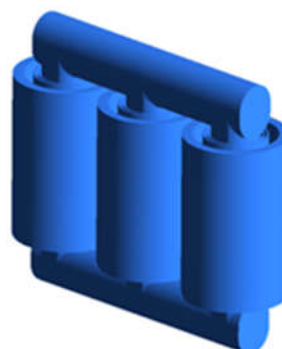
همچنین ضرایب ثابت در این معادلات به صورت زیر انتخاب شده است.

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_e = 0.7, C_\mu = 0.09, \sigma_\varepsilon = 1.30, \sigma_K = 1.30, Pr = 0.71$$

شکل ۲ الف نشان دهنده هندسه ساختاری ترانسفورماتور که شامل هسته سه ساقه و بوبین‌های فشار متوسط و ضعیف پوشانده شده با رزین است. شکل ۲ ب مدل ایجاد شده این ترانسفورماتور در ابعاد واقعی را جهت تحلیل نشان می‌دهد.



الف

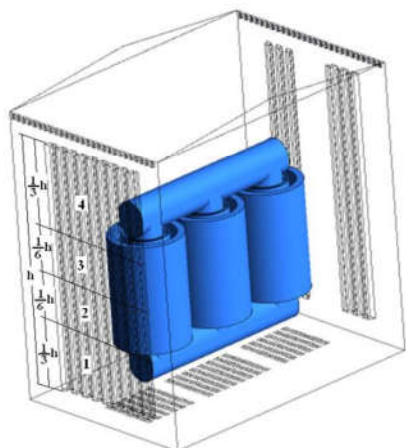


ب

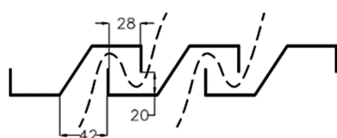
شکل ۲- هندسه ترانسفورماتور (الف) هندسه ساختاری، (ب) هندسه مدل‌سازی شده

شکل ۳ مدل کابین ترانسفورماتور و نحوه قرارگیری مدل ترانسفورماتور به همراه دریچه‌های دیواره جانبی، ورودی و پایین را نشان می‌دهد. شکل دریچه‌ها مطابق هندسه واقعی ایجاد گردیده که در شکل ۳ نمای از این دریچه دیواره‌های کابین و جزئیات آنها را نشان می‌دهد. در مدل ایجاد شده دریچه‌های دیواره (سند ترپ) سمت چپ و راست به چهار ناحیه مطابق شکل (الف ۳) جهت بررسی عملکرد نواحی مختلف این دریچه‌ها در خنک‌کاری، تقسیم‌بندی بندی گردیده است. ضمناً تقسیم‌بندی دیواره سمت راست در جهت ارتفاع مشابه دیواره سمت چپ بوده و در شکل نشان داده نشده است. یک دریچه مثلثی شکل هم در بالای دیواره‌های جانبی منتهی به اتاق تابلوهای فشار ضعیف و فشار متوسط وجود دارد که جریان هوا به این دو اتاقک انتقال می‌یابد و این دو اتاقک را می‌توان محیط گرم نشده فرض کرد. هندسه مسئله ابتدا در نرم‌افزار Solidwork تولید و به نرم‌افزار ICEM جهت شبکه‌سازی وارد شده است. شبکه‌سازی از نوع شبکه بی‌سازمان انجام و اندازه آنها در اطراف دیواره‌ها و در کنار دریچه‌ها فشرده شده و در سایر نقاط از مش درشت‌تر استفاده گردیده تا حجم محاسبات کاهش یابد. شکل ۴ الف نمایی کلی از شبکه ایجاد شده را نشان

می‌دهد.



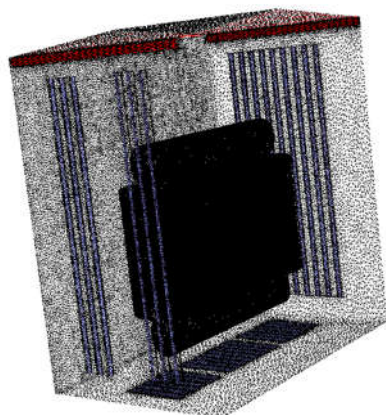
الف



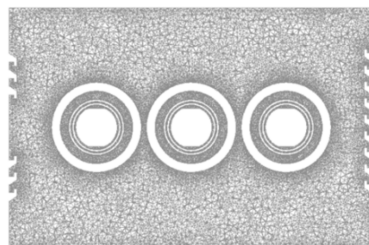
ب

شکل ۳- الف) مدل کابین به همراه ترانسفورماتور و دریچه‌های دیواره‌ها، ب) پروفیل دریچه‌های درب

برای افزایش دقت نیز در اطراف ترانسفورماتور از شبکه‌بندی لایه مرزی استفاده شده است که در شکل ۴ ب نشان داده شده است.

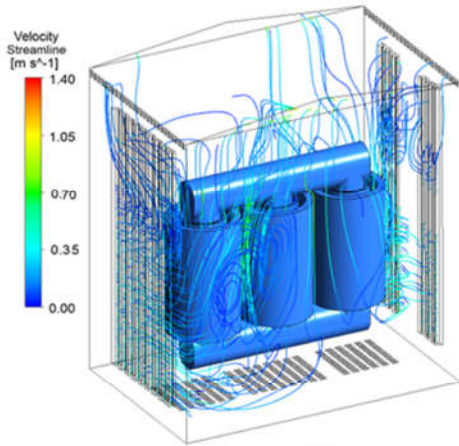


الف

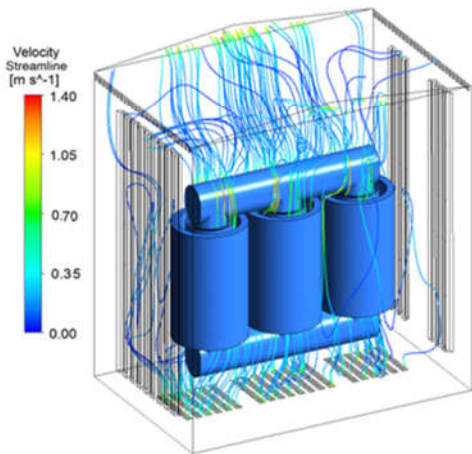


ب

شکل ۴- الف) شبکه‌بندی دامنه حل، ب) شبکه‌بندی لایه مرزی در اطراف بوبینها (مقطع عمود بر هسته ترانسفورماتور)



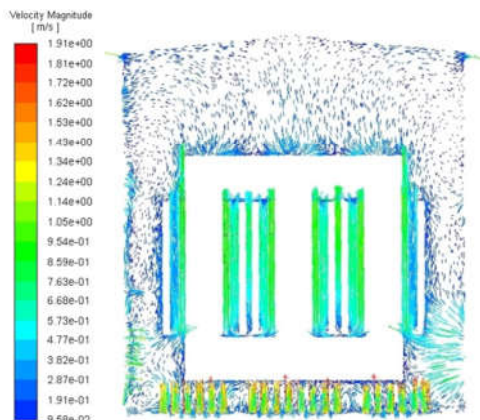
الف



ب

شکل ۶- خطوط جریان (الف) از سنترپهای کناری، (ب) از سنترپ کف تا خروجی (نواحی ۲ و ۳ بسته)

شکل ۷ بردارهای سرعت در صفحه کمکی گذرنده از وسط هسته را در حالی که سنترپهای نواحی ۲ و ۳ بسته هستند را نشان می‌دهد.



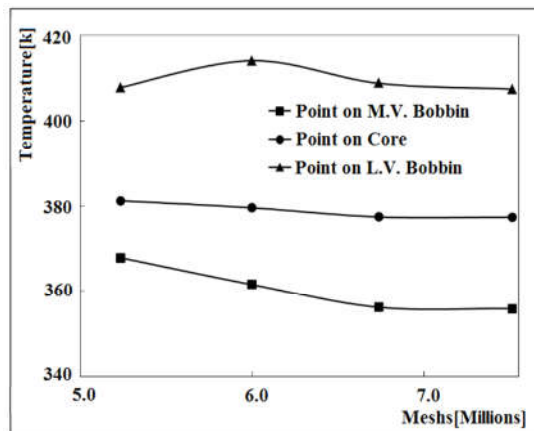
شکل ۷- بردارهای سرعت در صفحه گذرنده کمکی وسط هسته

### ۳-۱- شرایط مرزی

با توجه به اینکه طبق استاندارد، برای تعیین گروه گرمایی از انتقال گرما همرفتی که عامل خارجی در آن نقشی نداشته باشد، مد نظر است لذا شرط مرزی جریان در تمامی مرزهای ورودی به صورت فشار ورودی و در مرزهای خروجی به صورت فشار خروجی و همچنین دمای مرزهای ورودی مطابق استاندارد، ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است. تولید گرما با توجه به ولتاژ، جریان و مشخصات بوبینها متفاوت است. بر اساس اطلاعات کسب شده از شرکت توسعه پست‌های ایران‌ترانسفو که سازنده پست مورد مطالعه است، تلفات ترانسفورماتور ۱۲/۵ کیلووات در بار نامی بوده که از این مقدار ۵/۱۴ کیلووات مربوط به بوبین فشار ضعیف با سطح تبادل گرمایی ۹/۱۸ متر مربع و ۴/۹۸۵ کیلووات مربوط به بوبین فشار متوسط با سطح تبادل گرمایی ۷/۷۹ متر مربع است که این مقادیر به صورت شار سطحی به مقدار ۵۶۰ وات بر مترمربع برای بوبین فشار ضعیف و ۶۴۰ وات بر متر مربع برای بوبین فشار متوسط اعمال گردید. همچنین ۲/۳۷۵ کیلووات مربوط به تولید گرما ناشی از جریانهای فوکو در هسته می‌باشد که دارای سطح ۴/۵۳ مترمربع است که به مقدار ۵۲۴/۳ وات بر مترمربع به مدل آن اعمال شده است.

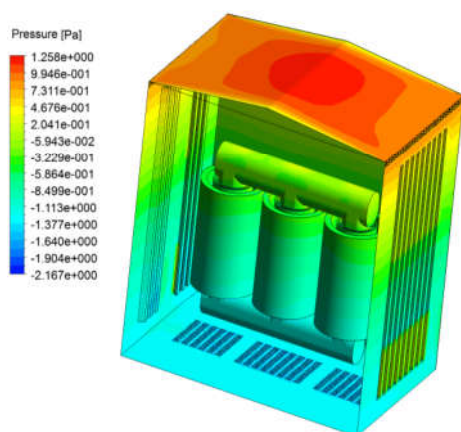
### ۴- بررسی نتایج

برای بررسی نتایج، ابتدا استقلال از شبکه بودن آن انجام گردیده است. جهت این بررسی، مختصات سه نقطه مشخص به ترتیب در روی بوبین فشار متوسط، هسته و بوبین فشار ضعیف در مدل ایجاد شده تعیین و دمای آنها به ازای تعداد شبکه‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، تعداد شبکه برای محاسبات آبی در حدود ۷/۵ میلیون در نظر گرفته شده است. تحلیل جریان و انتقال گرما بر اساس شرایط مرزی بیان شده برای مدل مورد نظر با استفاده از نرم افزار Ansys-Fluent 18.2 در مرکز پردازش موازی دانشگاه زنجان انجام گردیده است. در شکل ۶ خطوط جریان از سنترپهای کناری (شکل ۶الف) و از دریچه‌های کف (شکل ۶ب) زمانی که نواحی ۲ و ۳ بسته بودند را تا خروجی‌های کابین نشان می‌دهد.

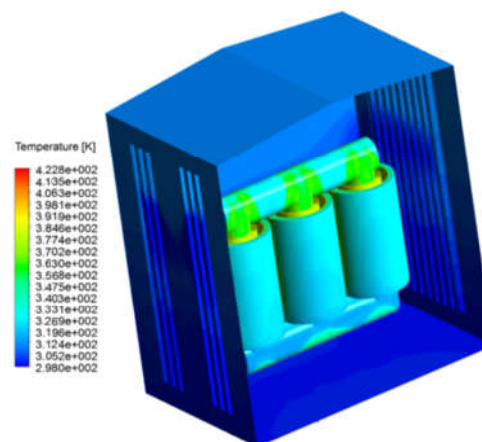


شکل ۵- بررسی استقلال از شبکه در سه نقطه مشخص در مدل ایجاد شده

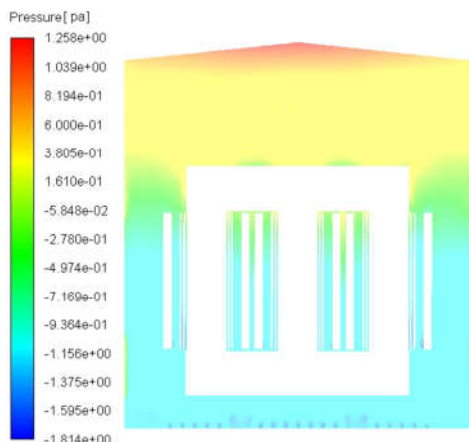
موقعیت‌های مشخص بر روی هسته در ساق‌های  $U_b$ ،  $V_b$ ،  $W_b$  و دماسنج شماره ۴ برای ثبت دمای هوای اتاقک در بالای ترانسفورماتور در مختصات مشخص نصب گردیده است.



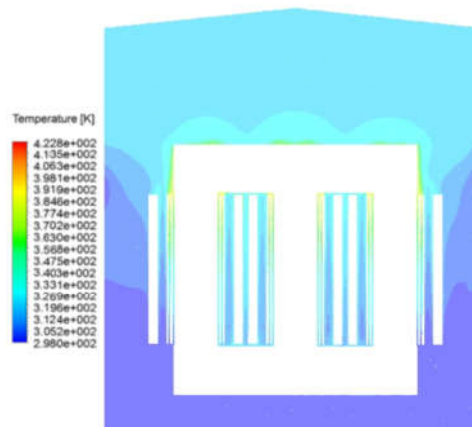
الف



الف



ب

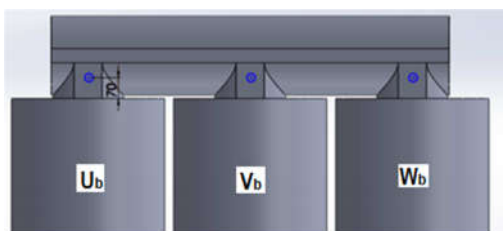


ب

شکل ۹- توزیع فشار در الف) اطراف هسته و بوبینه‌های ترانسفورماتور و دیواره‌های کابین، ب) صفحه کمکی گذرنده از وسط هسته

شکل ۸- الف) توزیع دما در هسته و بوبینه‌های ترانسفورماتور و دیواره‌های کابین، ب) توزیع در صفحه کمکی گذرنده از وسط هسته

شکل ۱۰ محل نصب دماسنج‌ها در روی هسته را نشان می‌دهد. این دماسنج‌ها با استفاده از چسب آلومینیومی بر روی هسته ترانسفورماتور چسبانده شده‌اند.



شکل ۱۰- محل نصب دماسنج‌ها در روی هسته ترانسفورماتور

در شکل ۹ الف) توزیع فشار نسبی کل را در اطراف هسته و بوبین‌های ترانسفورماتور و دیواره‌های کابین برای حالتی که سندترپ‌های ۲ و ۳ بسته هستند، نشان داده شده است که حاکی از ایجاد مکش در نواحی ورودی و افزایش فشار در نواحی بالای کابین است. همچنین شکل ۹ ب) توزیع فشار در صفحه کمکی گذرنده از وسط هسته را در حالتی که سندترپ‌های نواحی ۲ و ۳ بسته هستند را نشان می‌دهد. برای صحت‌سنجی، از نتایج تجربی شرکت آزمایشگاهی صنایع برق ایران که برای تعیین گروه گرمایی این‌گونه ترانسفورماتور و ارائه گواهی برای خریداران در آزمایشگاه تخصصی آن شرکت صورت می‌گیرد، استفاده شده است. به این منظور با هماهنگی آن آزمایشگاه سه عدد دماسنج با شماره‌های ۱، ۲، و ۳ به ترتیب در

جدول ۲ نتایج دماهای حاصل از تحلیل حاضر را در شرایط مشابه با نتایج آزمایشگاهی برای نقاط نصب در چهار دماسنج مورد نظر نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج دماهای حاصل از تحلیل حاضر در شرایط مشابه با شرایط آزمایشگاهی برای چهار دماسنج

شماره دماسنج	محل نصب	دما [K] اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی	دما [K] کار حاضر	مقدار اختلاف [K]
۱	بوبین $U_b$	۳۵۰/۵	۳۵۴	۳/۵
۲	بوبین $V_b$	۳۵۲/۶	۳۵۸	۵/۴
۳	بوبین $W_b$	۳۴۸/۲	۳۵۲	۳/۸
۴	کابین	۳۲۹/۲	۳۳۵	۵/۸

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد مقادیر محاسبه شده برای دما در محل قرارگیری دماسنج‌ها در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده دارای اختلاف می‌باشد. بخشی از این اختلاف را می‌توان در روش اندازه‌گیری در آزمایشگاه توجیه کرد. چرا که برای اندازه‌گیری دمای ترانسفورماتور در آزمایشگاه باید محل قرار گرفتن دماسنج کاملاً داخل جسم باشد (محل سوراخ شده باشد) و اطراف آن با چسب سیلیکونی پر شود. در غیر این صورت مقادیر اندازه‌گیری شده با خطا همراه خواهد بود. در این آزمایش نیز به دلیل اینکه امکان سوراخ کردن وجود نداشت، دماسنج‌ها فقط با استفاده از چسب آلومینیومی به محل مورد نظر چسبانده شده‌اند.

#### ۴-۱- تعیین گروه گرمایی پست موجود

با توجه به تعریف قبلی در خصوص گروه گرمایی و شرایط تعیین آن طبق استاندارد IEC62271-202، با اعمال شرایط مرزی مطابق با شرایط موجود در حال بهره‌برداری و همچنین ایجاد شرایط فضای آزاد در مدل ارائه شده، تحلیل عددی انجام و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- دمای بیشینه ترانسفورماتور برای دو شرایط داخل کابین و فضای آزاد

اختلاف	حداکثر دما [k] (در فضای آزاد)	حداکثر دما [k] (در داخل کابین)	
۱۲	۳۹۸	۴۱۰	LV
۱۱	۳۶۶	۳۷۷	Core
۱۳	۳۵۳	۳۶۶	MV

طبق نتایج جدول ۳ همچنان که انتظار می‌رفت، بیشترین دما در بوبین فشار ضعیف که جریان الکتریکی در آن بالا بوده و شار گرمایی زیادتری تولید می‌کند و همچنین فضای کمی برای انتقال گرما دارد، اتفاق می‌افتد. لذا گروه گرمایی طبق استاندارد ذکر شده بر اساس اختلاف دمای بوبین فشار ضعیف در شرایطی که ترانسفورماتور در

فضای آزاد تحلیل گردیده با شرایطی که ترانسفورماتور در کابین است، تعیین می‌گردد که این اختلاف دما ۱۲ کلوین می‌باشد و این مقدار ۱۴٪ کمتر از نتایج تجربی می‌باشد. لذا طبق تعریف گروه گرمایی مطابق با استاندارد IEC 62271-202، گروه گرمایی پست مورد نظر ۱۵ کلوین محاسبه می‌گردد. و در آزمایشگاه شرکت آزمایشگاههای صنایع برق ایران نیز گروه گرمایی برای پست مورد مطالعه ۱۵ کلوین تعیین گردیده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به بررسی جریان و انتقال گرمای پست برق فشرده با ظرفیت 800kVA تولیدی شرکت توسعه پست‌های ایران ترانسفو پرداخته و گروه گرمایی آن که یکی از معیارهای مهم آن در بهره‌برداری صحیح و همچنین مسائل تجاری محسوب می‌گردد، تعیین گردید. بدین منظور با مدلسازی سه بعدی ترانسفورماتور و کابین آن با ابعاد هندسی واقعی، پارامترهای مورد نظر از جمله جریان سیال و دما در قسمت‌های مختلف تحلیل گردید. جهت اعتبار بخشی نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری، پست مورد نظر به آزمایشگاه شرکت آزمایشگاه‌های صنایع برق ایران منتقل و مورد آزمایش قرار گرفت. برای تحقق این امر، حسگرهای دما در نقاط مشخص روی ترانسفورماتور نصب و دمای آنها در شرایط بار نامی اندازه‌گیری گردید. نتایج حاصل از مدلسازی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی حاکی از نتایج مورد قبول بوده و وجود اختلاف حداکثر ۵/۸ کلوین را نشان می‌دهد. بخشی از این اختلاف ناشی از شیوه اندازه‌گیری تجربی و خطای وجود مقاومت گرمای مابین سطح و دماسنج است. با اعمال شرایط مرزی و داده‌ها طبق استاندارد IEC62271-202، اختلاف دمای حداکثر که در بوبین فشار ضعیف اتفاق می‌افتد، ۱۲ کلوین می‌باشد و این مقدار ۱۴٪ کمتر از نتایج آزمایشگاهی است. لذا با توجه به تعریف استاندارد مذکور گروه گرمایی پست مذکور ۱۵ کلوین بوده و در آزمایشگاه شرکت توانیر نیز گروه گرمایی پست ۱۵ کلوین تعیین گردید.

با توجه به وجود زیرساخت‌های لازم سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای انجام این تحقیق در دانشگاه زنجان و ارتباط نزدیکتر با شرکت تولید کننده پست‌های برق، از آن می‌توان به عنوان گام اصلی برای بهینه‌سازی هندسه کابین و دریچه‌های تعبیه شده در آن و همچنین ساختار داخلی ترانسفورماتور به لحاظ بهینه سازی کانال‌های خنک‌کاری استفاده نمود. ضمن آنکه نتایج بدست آمده تا این حد از تحقیق نیز مورد توجه آن شرکت نیز واقع شده است.

#### ۶- سپاسگزاری

از مدیریت محترم شرکت توسعه پست‌های ایران ترانسفو زنجان که این تحقیق با همکاری و حمایت مالی آن شرکت صورت گرفته و از مدیریت محترم شرکت آزمایشگاههای صنایع برق ایران که همکاری کامل در اخذ نتایج تجربی را داشتند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## ۷- نمادها

علائم	
$k^*$	رسانایی گرمایی نسبی ( $k/k_{air}$ )
$K$	انرژی جنبشی آشفته
$p$	فشار
$P_T$	عدد پراتل آشفته
$Ra$	عدد رابلی
$t$	زمان
$T$	دما
$T_\infty$	دمای محیط
$u$	مؤلفه افقی سرعت در راستای محور $x$
$v$	مؤلفه عمودی سرعت در راستای محور $y$
$w$	مؤلفه افقی سرعت در راستای $z$
$\alpha$	پخشندگی گرمایی مولکولی
$\alpha^*$	پخشندگی گرمایی مولکولی نسبی ( $\alpha/\alpha_{air}$ )
$\alpha_f$	پخشندگی گرمایی آشفته
$\alpha_f^*$	پخشندگی گرمایی آشفته نسبی ( $\alpha_f/\alpha_{air}$ )
$\rho$	چگالی
$\beta$	ضریب انبساط حجمی
$\varepsilon$	اضمحلال انرژی جنبشی آشفته
$\nu$	لزجت سینماتیکی
$\nu^*$	لزجت سینماتیکی نسبی ( $\nu/\nu_{air}$ )
$\nu_f$	لزجت گردابی آشفته

## ۸- مراجع

- [1] Ramos J.C., Beiza M., Numerical modelling of the natural ventilation of underground transformer substations. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51, pp. 852-863, 2013.
- [2] Degefa M.Z., Millar R.J., Lehtonen M. and P. Hyvönen, Dynamic Thermal Modeling of MV/LV Prefabricated Substations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, No.2, pp. 786-793, 2014.
- [3] Yu T., Yang H., Xu R. and C. Peng, Simulation Study on Ventilation & Cooling for Main Transformer Room of an Indoor Substation. *Journal of Multimedia*, Vol. 9, No. 8, pp. 1040-1047, 2014.
- [4] Iskender I., Mamizadeh A., An improved nonlinear thermal model for MV/LV prefabricated oil-immersed power transformer substations. *Electrical Engineering*, Vol. 93, No. 1, pp. 9-22, 2011.
- [5] Haritha V.V.S.S., Rao T.R. and Jain A., Thermal modeling of electrical transformers. In *16th National power systems conferene*, India, 2010.
- [6] Weigen C., Chong P. and Yuxin Y., Power transformer top-oil temperature model based on thermal-electric analogy theory. *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 19, pp. 341-354, 2009 [7] IEC 62271-202, High-voltage switchgear and control gear, High Voltage/Low Voltage Prefabricated Substations. In *IEC Standard*, 2006.
- [8] Afrid M., Zebib A., Three-Dimensional Laminar and Turbulent Natural Convection Cooling of Heated Blocks. *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 19, pp. 405-424, 1991.