

شبیه سازی عددی انتقال حرارت در موتور الکتریکی TLM-401

امین رسولی جوکندان¹

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، بیرجند، rasouli.amin@birjand.ac.ir

1. مقدمه

در سالهای اخیر ارتقاء و ساخت موتورهای الکتریکی با توان و بازده بالا و قدرت زیاد، با افزایش شار حرارتی تجهیزات و سطوح سیستم همراه شده است. در طول سالیان اخیر، پیشرفتهای چشمگیری در تکنیکهای خنک کاری به وسیلهی هوا و خنک کاری به وسیلهی مایعات به وجود آمده است تا شار حرارت خارج شده، افزایش یابد. از آن جایی که تقاضا برای موتورهای با عملکرد بهتر، مصرف برق کمتر و سایز کوچکتر افزایش یافته است، مدیریت گرمای تولید شده در موتورهای الکتریکی به یکی از مهمترین جنبههای طراحی آن تبدیل شده است. موتورهای الکتریکی مدرن در طول عملکرد معمولی خود گرمای زیادی تولید میکنند که نتیجهی آن افزایش تلفات الکتریکی، الکترومغناطیسی و مکانیکی است. قسمت اعظم تلفات موتور به گرما تبدیل میشود و باعث بالا رفتن دمای قسمتهایی از جمله سیم پیچها و هسته آهنرباها میگردد. بالا رفتن بیش از حد دما در موتور برای کارایی و قابلیت آن به شدت زیانآور میباشد. به وجود آمدن نقاط داغ در موتور که ناشی از انتقال حرارت غیریکنواخت در آن است، ممکن است باعث خراب شدن عایق سیم پیچها، شکست و خرابی زود هنگام یاتاقانها و خرابی کلی چرخش موتور شود که عمر موتور را به شدت کاهش میدهد. برای بعضی از کاربردها مدیریت گرمای تولید شده در موتور بسیار ضروری است. بنابراین برای اطمینان از ایمنی و قابلیت کارایی یک موتور الکتریکی، تمام گرمای تولید شدهی آن می-بایست به محیط منتقل شود. دمای کاری قطعات اصلی موتورهای الکتریکی از عوامل تأثیرگذار بر روی بازده و طول عمر و خرابی آنها است و افزایش دما در قطعات و خصوصاً در سیم پیچها باعث افزایش تلفات جریان، از بین رفتن عایقها و در نهایت از کار افتادن کامل موتور الکتریکی میشود. [1 و 2] از این رو پیشبینی دقیق و صحیح توزیع دما در قطعات موتور نقش بسزایی دارد. در طول سالیان اخیر به خاطر افزایش کاربرد موتورهای الکتریکی در صنایع، تحلیلهای زیادی بر روی رفتار دمایی این موتورها صورت گرفته است. بوگلیتی و همکارانش [3] در مورد موتورهایی کاملاً محصور با فن خنک کننده تحقیق نمودند. آنها پنج موتور الکتریکی القایی با توانهای مختلف را مورد تحلیل گرمایی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد دمای کویلها با خطایی در حدود 5 درجه سلسیوس قابل پیشبینی خواهد بود که برای یکی از حیاتیترین بخشهای موتور الکتریکی مقدار پذیرفتنی است. چانگ و همکارانش [4]

پژوهشهایی بر سیستم خنککاری موتورها به صورت عددی و آزمایشگاهی انجام دادهاند. هدف آنها یافتن رابطهای بود که بتواند ارتباط بین افزایش فشار تولیدی ناشی از عملکرد فن و دبی جرمی هوای جریان یافته در داخل موتور را تشریح نماید تا به وسیله آن توزیع دما در روتور و استاتور را کنترل نمایند. لی و همکارانش [5] با انجام پژوهشهایی بر روی موتورهای القایی به کار رفته در وسایل هیبریدی، نشان دادند با افزایش ضریب هدایت گرمایی در آلیاژهای به کار رفته در میلههای روتور، توزیع دما یکنواختتر خواهد بود و اختلاف دمای نقاط مختلف کمتر میشود. جیمز و پیونگ [6] یک موتور الکتریکی DC را مورد تحلیل گرمایی قرار دادند. آنها با فرض دورهای بودن تناوب هندسی موتور، یک ششم از هندسه موتور را مورد بررسی و حل قرار دادند. آنها میزان حساسیت دمای قطعات حیاتی نسبت به تغییرات هندسی پوسته خارجی بررسی نمودند. توزیع دما در این موتور نشان داد که مقدار انتقال حرارت از فاصله هوایی بین روتور و استاتور بسیار ناچیز است. سان و همکارانش [7] مطالعاتی بر روی بهینهسازی یک فن گریز از مرکز با تمرکز بر بهبود جریان سیال در حین تغییر مسیر حرکت آن از محوری به شعاعی در اطراف فن انجام داده اند. آن ها با استفاده از یک شبیه سازی دو بعدی کویل شده با الگوریتم بهینهسازی ژنتیک بر روی تیغه های فن موفق شدند راندمان فن را ارتقاء دهند. فدوسیو و همکارانش [8] با ایجاد یک سوراخ در وسط شفت و استفاده از آن به عنوان لوله خنک کننده توانستند قسمتی از گرمای تولید شده در استاتور را به پره های فن و سپس به بیرون انتقال دهند. کیم و همکارانش [9] با قرار دادن یک پره بر روی شفت روتور در دو طرف فاصله هوایی، سرعت عبور جریان هوا از فاصله هوایی را بالا بردند که بدین وسیله دبی عبوری از فاصله هوایی زیاد شده و مقدار انتقال حرارت از روتور به هوا افزایش یافت. در نتیجه مقدار حداکثر دمای موتور کاهش پیدا کرد. از این رو با توجه به تحلیلهای صورت گرفته بر روی رفتار دمایی این موتورها، در این پژوهش تحلیل گرمایی موتور TLM-401 به صورت شبیهسازی عددی انجام میپذیرد.

2. مفروضات و معادلات حاکم

ف	موتور	
1	توان	125 کیلووات
2	سرعت بیشینه	9745 دور بر دقیقه
3	سرعت نامی	1555 دور بر دقیقه
4	ولتاژ نامی	252 ولت
5	قطر خارجی روتور	929 میلی متر
6	قطر خارجی استاتور	411 میلی متر

مدل انتخابی برای توصیف، مدل توربولانسی کی-اِپسیلون اصلاح شده است، چرا که با توجه به فیزیک مسأله حاضر، همگرایی در سایر مدلها به خوبی اتفاق نمیافتد و جواب با فیزیک مسأله سازگاری ندارد. پارامترهای این مدل با استفاده از دادههای نتایج تجربی مانند جریان لوله، صفحه تخت کالیبره میشوند و برای بسیاری از کاربردها قوی و منطقیاند. با توجه به پیچیده بودن هندسه و گردابههای بودن جریان برای حل دقیقتر و همگراشدن معادلات مومنتوم و انرژی از معادله کی-اِپسیلون استفاده شدهاست. معادلات برای این مسأله به صورت پایا حل شده و نتایج آن نیز در حالت پایا گزارش میگردد. این معادلات اغتشاش و گردابهها را به خوبی شبیهسازی میکنند.

معادلات حاکم بر مسأله معادلات بقای جرم، مومنتوم خطی و بقای انرژی هستند. با توجه به مدل توربولانسی کی-اِپسیلون معادله انتقالی برای مدل توربولانسی از روابط زیر بدست می آید [10].

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (1)$$

$$\phi_i = \bar{\phi}_i + \phi'_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j \rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j \rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 S_\varepsilon + \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{g \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4)$$

در این معادلات k انرژی جنبشی توربولانس یا گردابه و ε نرخ اضمحلال آن می باشد. همچنین σ_k و σ_ε عدد پراشتل توربولانس برای k و ε میباشد. G_k تولید انرژی جنبشی توربولانس به دلیل وجود گردایان سرعت و G_b انرژی توربولانسی تولید شده به دلیل شناوری است.

3. حل عددی

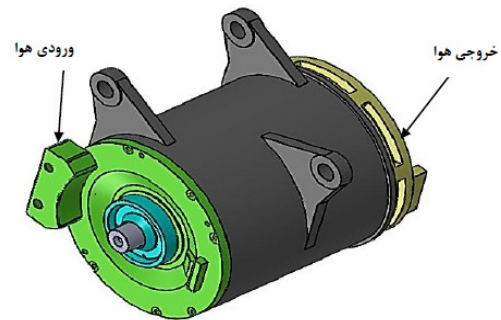
در این قسمت، برای حل عددی موتور الکتریکی سه بخش آورده شده است که شامل بخش هندسه مورد تحلیل و ساده سازی های لازم برای حل آن، شرایط مرزی، شبکه بندی و اعتبارسنجی میباشد.

3.1. هندسه مورد تحلیل

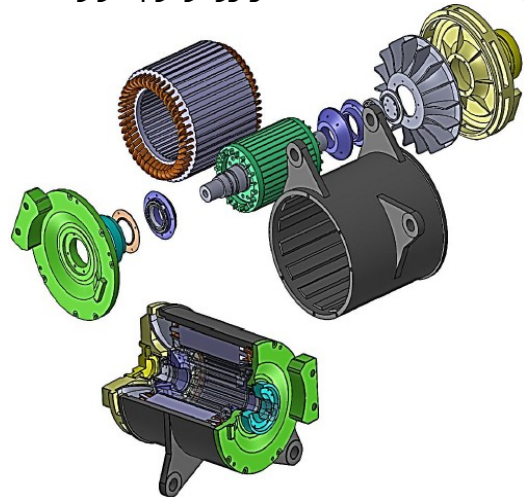
در این مقاله رفتار دمایی موتور TLM-401 مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت تا نقاط بحرانی از حیث دمایی استخراج شود. مشخصات موتور مورد مطالعه در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1: مشخصات موتور TLM-401		
ردیف	مشخصات	مقادیر

برای ایجاد هندسه موتور، از نرم افزار Solidworks استفاده شده است. هندسه مونتاژ شده و کامل موتور الکتریکی TLM-401 در شکل 1 و نمای انفجاری آن در شکل 2 نشان داده شده است. در تحلیل حرارتی، تنها قطعاتی که در انتقال و یا تولید حرارت نقش داشته اند در محاسبات وارد میشوند. این قطعات شامل محفظه ورودی و خروجی هوا، شفت، روتور، رادها، استاتور، کویلها، فن و پوسته بیرونی مجموعه است.



شکل 1: هندسه ایجاد شده موتور در نرم افزار Solidworks



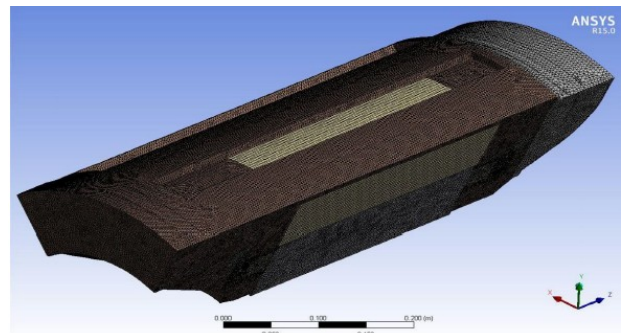
شکل 2: مدل انفجاری ایجاد شده هندسه موتور در نرم افزار Solidworks

در شکلهای 1 و 2 که در آنها هندسه موتور الکتریکی مورد مطالعه نشان داده شده است، مشاهده میشود که کلیه اجزای داخلی موتور به صورت دوار و کاملاً متقارن هستند، اما قسمت ورودی هوا که در قسمت بالای موتور قرار گرفته است، مانع از در نظر گرفته شدن کل موتور به

موتور جریان مییابد، در خروجی نیز هوا مستقیماً به اتمسفر تخلیه میشود، بنابر این فشار هوای خروجی موتور برابر با یک اتمسفر در نظر گرفته شده است. هندسه موتور هم همانطور که قبلاً اشاره شد به صورت تناوبی در نظر گرفته میشود و با توجه به مشخصات موتور یعنی سرعت چرخش آن، سرعت چرخش دیواره‌ی روتور و فن 1555 دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

3.3. شبکه بندی و اعتبار سنجی

با توجه به اینکه هندسه کلی مورد نظر، متشکل از هندسه‌های کوچک دیگری است، لذا مشبندی در نواحی مختلف با هم تفاوت دارد. شبکه‌بندی کلی هندسه متشکل از شبکه منظم و نامنظم است. مشخصات شبکه برای سیال اطراف روتور و فن در حالت محور مختصات چرخان تنظیم شده است. به صورتی که فن، روتور و رادهای آن به صورت دیواره‌های چرخان در نظر گرفته شده‌اند و با سرعت نامی موتور، یعنی 1555 دور بر دقیقه، میچرخند. شبکه ایجاد شده برای هندسه در شکل 5 آورده شده است.



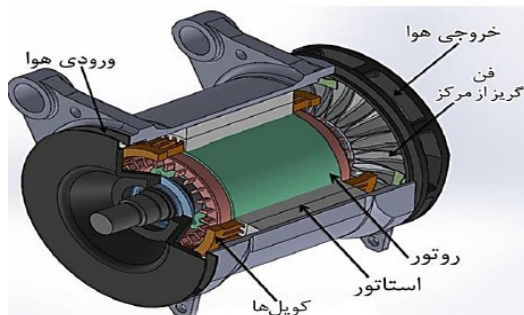
شکل 5: شبکه ایجاد شده برای هندسه موتور الکتریکی برای اینکه استقلال جواب از شبکه مشخص شود، شبکه‌بندی در چهار تعداد مختلف انجام شده و مقدار دمای خروجی موتور الکتریکی برای هر شبکه بدست آمده و در جدول 2 آورده شده است. همانطور که مشاهده میشود، اختلاف دمای خروجی در دو شبکه‌بندی آخر کمتر از 4/0 درصد است. بیشتر کردن تعداد شبکه پس از این باعث افزایش زمان و هزینه محاسبات میشود. به همین دلیل تعداد 1139743 شبکه برای بدست آوردن جواب مناسب است.

جدول 2: تعداد شبکه و دمای هوای خروجی حاصل از حل آن

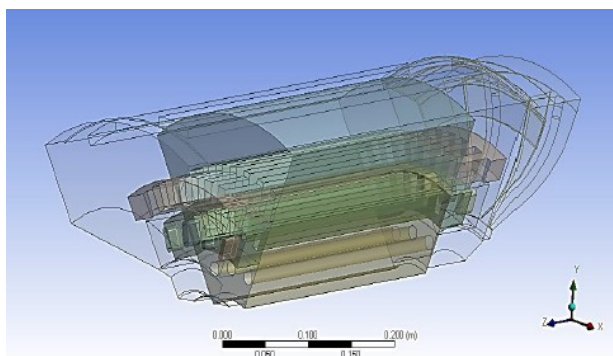
تعداد شبکه	دمای هوای خروجی (C°)
599721	41/57
791279	42/22
292495	42/92
1192749	42/41

با توجه به شبیه‌سازی انجام گرفته به روش عددی و آزمایش انجام شده در آزمایشگاه شرکت VGM آلمان به راحتی میتوان نتایج به دست آمده را با هم مقایسه کرد. برای ایم منظور، دمای بحرانی

عنوان یک قطاع تکرار شونده میشود. با توجه به اینکه حل عددی کل هندسه نیازمند سیستم پردازشگر بسیار قوی با حجم محاسبات بالا است، از نظر زمان و هزینه مقرون به صرفه است که مطابق شکل 3 قسمت ورودی هوا را به صورت دوار و با مساحت معادل مساحت ورودی اصلی، حول موتور مدل کنیم. این کار باعث میشود که حل سریعتر و با هزینه کمتری انجام گیرد. همچنین هندسه کویل‌های استاتور در مدل موتور الکتریکی بسیار پیچیده است که این عامل باعث به وجود آمدن شبکه نامنظم برای حل عددی میشود. این شبکه نامنظم، همگرایی معادلات را دچار مشکل میکند. به همین علت کویل‌های استاتور را نیز به صورت مقاطع مستطیلی با حجم و سطح معادل کویل اصلی جایگزین میکنیم. بنابراین برای تحلیل گرمایی موتور الکتریکی، هندسه کلی را مطابق شکل 3 ساده‌سازی میکنیم. این هندسه را به دلیل تقارن حول محور آن، میتوان به صورت یک قطاع یک ششم تکرار شونده در نظر گرفت و حل کرد. هندسه مورد تحلیل در شکل 4 آورده شده است.



شکل 3: هندسه کاملاً متقارن برای تحلیل گرمایی موتور الکتریکی

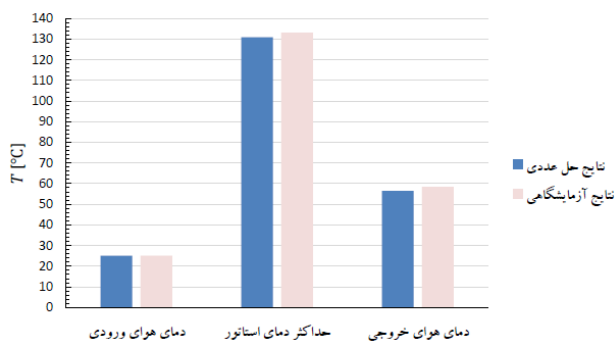


شکل 4: هندسه یک ششم برای تحلیل گرمایی موتور الکتریکی

3.2. شرایط مرزی

شبیه‌سازی به صورت پایا انجام شده است. در قسمت ورودی مجموعه، هوا مستقیماً از اتمسفر دمیده میشود، لذا شرط مرزی ورودی با فشار یک اتمسفر به آن اعمال شده است. مطابق با شرایط دمایی واقعی موتور، دمای هوای ورودی نیز همان دمای طبیعی یا دمای اتاق است و برابر با 95 درجه سلسیوس تنظیم شده است. هوای ورودی به واسطه مکش و افست فشاری که فن در انتها موتور ایجاد میکند از بین حفره‌ها و شیارهای تعیین شده در

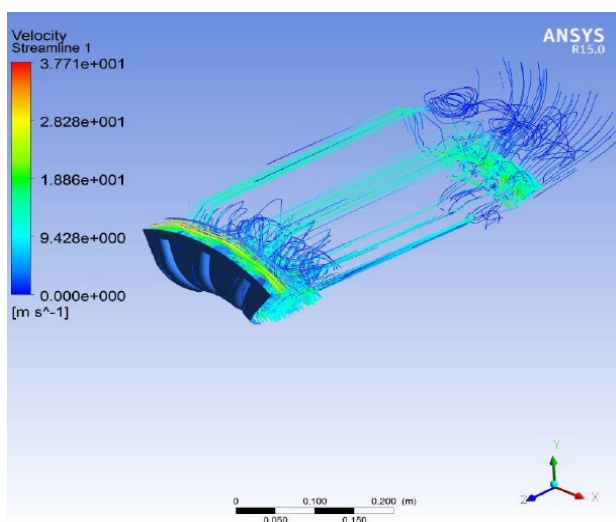
موتور الکتریکی که همان دمای سیم پیچهای انتهای استاتور آن است و دمای ورودی و خروجی موتور را در شبیه سازی عددی و آزمایش تجربی به دست آورده و با هم مقایسه میکنیم. در شکل 6 میتوان مقایسه نتایج حل عددی و آزمایشگاهی را مشاهده کرد. همانطور که مشاهده میشود نتایج حل عددی و نتایج آزمایشگاهی از تطابق خوبی برخوردار است.



شکل 6: مقایسه نتایج حل عددی و نتایج آزمایشگاهی

4. نتایج

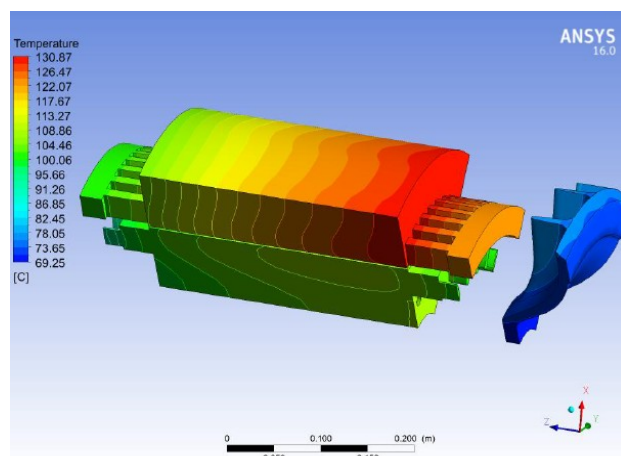
پس از ایجاد هندسه موتور در نرم افزار Solidworks، تحلیل گرمایی موتور TLM-401 به صورت شبیهسازی عددی توسط نرمافزار Ansys Fluent انجام میگردد. با توجه به شبیهسازیهای صورت گرفته، در شکل 7 مشاهده میشود که در قسمت ورودی موتور جریان آرام است اما جریان با رسیدن به پرههای روی روتور که در حال چرخش هستند، مغشوش میشود. این جریان با گذر از سوراخهای تعبیه شده در روتور، گپ بین روتور و استاتور و کانالهای حول استاتور اجزاء روتور و استاتور را خنک میکند و از قسمت انتهای موتور الکتریکی، یعنی جایی که فن قرار دارد، خارج میشود.



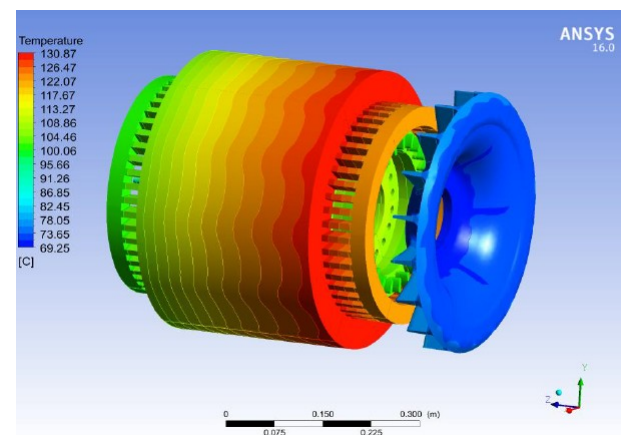
شکل 7: خطوط جریان و اغتشاش در قسمت خروجی

در شکلهای 8 و 9 مشاهده میشود که مقدار حداکثر دما در موتور الکتریکی در قسمت انتهای استاتور اتفاق میافتد که مقدار آن برابر 87/130 درجه سلسیوس میباشد. در موتور الکتریکی به دلیل تقارن در سیم پیچها و اجزای تولیدکننده گرما، توزیع

گرما به صورت متقارن است. دمای هوا در حین ورود به موتور برابر با دمای محیط است، اما با گذر هوا در طول موتور الکتریکی و انتقال گرما به هوا، دمای هوا در طول موتور افزایش پیدا میکند. این افزایش دما در طول موتور الکتریکی باعث میشود که اختلاف دمای سطح اجزاء با هوا در طول موتور الکتریکی کاهش یابد. با توجه به رابطه مستقیم انتقال حرارت با اختلاف دما، دفع حرارت در طول موتور الکتریکی کاهش پیدا میکند و دمای اجزاء بالا میرود.

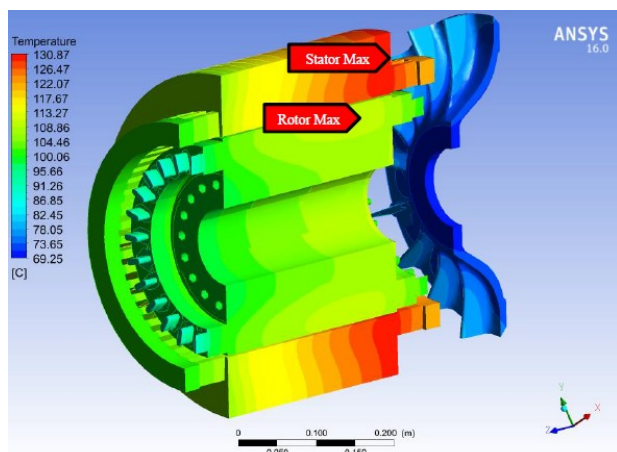


شکل 8: نمای سه بعدی کانتور دما در قطاع حل شده



شکل 9: نمای کانتور دمای روتور و استاتور

در روتور با توجه به اینکه اجزاء در حال دوران هستند و روتور نسبت به هوای جریان یافته دارای سرعت نسبی است، انتقال حرارت بیشتری صورت میگیرد و دمای آن نسبت به استاتور کمتر است. و همانطور که اشاره شد و در شکل 10 مشاهده میشود، مقدار حداکثر دمای استاتور در انتهای آن اتفاق میافتد، اما با توجه به اینکه روتور در حال چرخش است و سطح انتهایی آن نسبت به هوای جریان یافته در موتور دارای سرعت نسبی است، حداکثر دمای روتور به طور دقیق در انتهای روتور اتفاق نمیافتد و با انتهای روتور و گپ بین روتور و استاتور فاصله دارد. مقدار حداکثر دمای روتور 81/107 درجه سلسیوس است که محل آن در شکل 10 مشخص شده است.



شکل 10: محل مقادیر بیشینه در روتور و استاتور

5. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله رفتار دمایی موتور الکتریکی TLM-401 و نقاط بحرانی آن بررسی گردید. نتایج شبیه‌سازی عددی انتقال گرما در موتور الکتریکی ذکر شده، پس از حل عددی توسط نرم افزار Ansys fluent، به وسیله نتایج آزمایشگاهی انجام شده در شرکت VGM آلمان اعتبار سنجی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مقدار حداکثر دما در موتور الکتریکی TLM-401 در قسمت انتهای استاتور اتفاق می‌افتد که مقدار آن برابر 87/130 درجه سلسیوس است. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که حداکثر دمای روتور به طور دقیق در انتهای روتور اتفاق نمی‌افتد و با انتهای روتور و گپ بین روتور و استاتور فاصله دارد که این مقدار 81/107 درجه سلسیوس است.

- [1] Venkataraman, B., Godsey, B., Premierani, W., Shulman, E., Thaku, M. and Midence, R., 2005, April. Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection. In *58th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2005.
- [2] Zhu, Z.Q., 2011. Fractional slot permanent magnet brushless machines and drives for electric and hybrid propulsion systems. *The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 30(1), pp.9-31.
- [3] Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D., Shanel, M., Mueller, M. and Mejuto, C., 2009. Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 56(3), pp.871-882.
- [4] Chang, C.C., Kuo, Y.F., Wang, J.C. and Chen, S.L., 2010. Air cooling for a large-scale motor. *Applied Thermal Engineering*, 30(11-12), pp.1360-1368.
- [5] Li, W., Cao, J. and Zhang, X., 2009. Electrothermal analysis of induction motor with compound cage rotor used for PHEV. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 57(2), pp.660-668.
- [6] Hwang, P. and Kuria, J., 2017. Optimizing heat sink geometry for electric vehicle BLDC motor using CFD.
- [7] Sun, T., Li, Y., Xu, Y. and Wang, Z., 2012. Numerical simulation and optimization of centrifugal fan. In *Advances in Mechanical and Electronic Engineering* (pp. 311-315). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [8] Fedoseyev, L. and Pearce, E.M., Tesla Inc, 2016. *Rotor assembly with heat pipe cooling system*. U.S. Patent 9,331,552.
- [9] Kim, C., Lee, K.S. and Yook, S.J., 2016. Effect of air-gap fans on cooling of windings in a large-capacity, high-speed induction motor. *Applied Thermal Engineering*, 100, pp.658-667.
- [10] Bergman, T.L., Incropera, F.P., Lavine, A.S. and DeWitt, D.P., 2011. *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons.