

صلى الله عليه وسلم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گزارش نهایی طرح پژوهشی

افزایش ضریب حفاظت (IP) در موتورهای الکتریکی از طریق طراحی سیستم خنک کاری بسته

مجری طرح:

محمد حسن کیهانی

همکار:

کاوه اشکفتی

حمایت کنندگان :

دانشگاه صنعتی شاهرود - شرکت تولیدی صنعتی توربوژنراتور

اردیبهشت ۱۳۸۴

این طرح با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است و تاریخ های تصویب و خاتمه آن به ترتیب ۸۱/۱۱/۱۵ و ۸۴/۳/۳ می باشد.

چکیده

در این طرح پژوهشی، یک سیستم خنک کاری بسته طوری طراحی و ساخته شود تا ضریب حفاظت (IP) الکتروموتور افزایش یابد. در این گزارش ابتدا به بررسی روابط تحلیلی حاکم بر حرکت سیال و انتقال حرارت آن پرداخته می شود، سپس نحوه مدلسازی هندسی و فیزیکی این الکتروموتور تشریح خواهد شد. سپس آنالیز عددی مدل فیزیکی و نتایج آن که با کمک نرم افزار Fluent انجام شده است، ارائه خواهد شده و در نهایت با توجه به نتایج آنالیز عددی و با کمک نرم افزار B-Jac یک سیستم خنک کاری کارآ طراحی می-شود. در انتهای گزارش نیز الکتروموتور ساخته شده بر اساس نتایج پژوهش، توسط شرکت تولیدی صنعتی توربوژنراتور ارائه شده است.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از دانشگاه صنعتی شاهرود و شرکت تولیدی و صنعتی توربوژنراتور شاهرود که مساعدت های لازم و در خصوص انجام این پروژه را به عمل آوردند، صمیمانه تقدیر و تشکر می کنیم. به ویژه از جناب آقای دکتر قاسمی، معاون پژوهش و فناوری، جناب آقای دکتر کرمی، مدیر کل محترم امور پژوهشی و ارتباط با صنعت و سرکار خانم آزادخواه، کارشناس محترمه امور پژوهشی دانشگاه و همچنین جناب آقای مهندس عامریان، مدیر عمل محترم کارخانه توربوژنراتور و کلیه کسانی که به هر طریق ما را در ادامه این کار یاری کردند، صمیمانه تشکر می کنیم.

فهرست

۱	مقدمه
۳	۱ - انتقال حرارت در ماشینهای الکتریکی
۳	۱-۱- روشهای خنک کردن
۴	۲-۱- روشهای تهویه
۷	۳-۱- جهت جریان هوا
۸	۴-۱- خنک کردن ماشینهای کاملاً بسته
۸	۵-۱- ماشینهای با سیستم تشعشع کننده (رادیاتور)
۹	۶-۱- مدار خنک کننده
۱۴	۲ - روشهای نوین
۱۵	۳ - شرح اقدامات انجام شده
۱۵	۱-۳- تهیه نرم افزارهای لازم
۱۵	۲-۳- مدلسازی هندسی
۱۸	۳-۳- مرحله انتخاب مدلسازی فیزیکی مناسب جهت پدیده های حاکم بر الکتروموتور 400 KW
۱۸	۱-۳-۳- مدلسازی جریان سیال بین دو استوانه متحدالمرکز دوار
۲۲	۲-۳-۳- مدلسازی جریان در الکتروموتور
۲۳	۳-۳-۳- مدلسازی اغتشاش (Turbulence) در جریان هوای الکتروموتور
۲۵	۴-۳-۳- مدلسازی انتقال حرارت و جرم در الکتروموتور
۲۶	۵-۳-۳- مدلسازی انتقال حرارت تشعشع در الکتروموتور
۲۷	۶-۳-۳- صحت اعتبار مدل (Model Validation)
۲۸	۴ - اعمال شرایط مرزی به معادلات حاکم بر مسئله انتقال حرارت در الکتروموتور
۳۸	۵ - آشنایی با نرم افزار B-Jac
۳۸	۱-۵- پارامترهای طراحی مبدل
۴۰	۲-۵- نتایج طراحی مبدل
۴۲	بحث و نتیجه گیری
۴۴	منابع
۴۵	پیوست (۱)
۷۱	پیوست (۲)

مقدمه

در طراحی یک موتور الکتریکی پارامترهای متعددی از قبیل خواص الکترومغناطیسی، تهویه، جریان حرارت، طراحی مکانیکی و آکوستیک مطرح هستند که نگرش همه جانبه به آنها مورد نیاز صنعت می‌باشد. خنک‌کاری ماشینهای الکتریکی یکی از مهمترین مسائلی است که تاثیر مهمی بر نحوه استفاده از این ماشینها دارد. شاخه‌های گسترده‌ای از دانش جهت مدلسازی حرارتی و خنک‌کاری ماشینهای الکتریکی مورد استفاده واقع می‌شود که ترکیب همه مدل‌های بکار رفته همیشه باید از طریق آزمایش و تجربه مورد تایید قرار گیرد. ایجاد یک مدل ریاضی جامع جهت خنک‌کاری ماشینهای الکتریکی در یک سیکل بسته هدف اصلی این پژوهش است. پس از ایجاد مدل ریاضی و انجام محاسبات مربوط سیستم Cooling طراحی و نصب می‌گردد و صحت مدلسازی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. پس از انجام پروژه اطلاعات موجود بعنوان یک دانش فنی قابل استفاده جهت تبدیل سیستم خنک‌کاری موتورهای موجود به سیستم خنک‌کاری بسته می‌باشد. در حال حاضر در بسیاری از صنایع کشور و بخصوص صنایع شیمیایی، رنگرزی، نساجی و کاغذسازی موتورهای گران‌قیمت وجود دارد که به عکس قرار گرفتن در اتمسفر اسیدی و یا آلوده کارخانه در معرض خراب شدن و یا کاهش عمر و راندمان قرار دارند.

اجرای سیستم خنک‌کاری بسته بدون انجام محاسبات دقیق و مطمئن بر روی این موتورها بسیار خطرناک بوده و ممکن است باعث سوختن کامل موتور گردد. امید که با بهره‌گیری از روی خنک‌کاری بسته و انجام محاسبات دقیق و مطمئن قدمی در جهت نگهداری موتورهای موجود و تبدیل سیستم خنک‌کاری موتورهای خریداری شده برداشته شده و ما می‌توانیم با انجام این طرح در صنعت کشور مثمر ثمر باشیم.

فصل اول

انتقال حرارت در ماشینهای الکتریکی

۱-۱ - روشهای خنک کردن

با مراجعه به کتب کلاسیک موتورهای الکتریکی نظیر آنچه در مرجع [1] و [2] آمده است می‌توان انگیزه اصلی در خنک‌کاری موتور و روشهای مختلف بکار رفته در خنک‌کاری را بررسی نمود

عاملی که ابعاد ماشین را برای کار معین تعیین می‌کند افزایش درجه حرارت آن است که نتیجه تلفات مختلف در ماشین است. مقادیر حداکثر مجاز افزایش درجه حرارت در قسمت‌های مختلف ماشین به وسیله انجمن بین‌المللی الکترونیک استاندارد شده است. با پیشرفت مواد عایق از نظر استقامت در مقابل درجات حرارت بالاتر این مقادیر به حد بالاتر تجدید نظر خواهد شد در حال حاضر بزرگترین بهره خروجی از ابعاد معین ماشین با پیشرفت روشهای خنک کردن حاصل می‌شود. ماشینهای الکتریکی کوچک در حدود قدرت کسر اسب بخار بطور طبیعی خنک می‌شوند. در این روش وسایل خارجی بکار نبرده و خنک شدن با تشعشع و جابجایی طبیعی صورت می‌گیرد و در حالتی که بدنه ماشین باز است جریان هوای نامنظم بوسیله رتور به این امر کمک می‌کند. ولی تمام ماشینهای الکتریکی جدید تلفاتشان به ازاء واحد سطح ماشین بزرگ است و

حرارت تولیدی را به محیط اطراف منتقل می‌کنند. برای اجتناب از افزایش درجه حرارت زیاد در حین کار به روشهای خنک‌کنندگی مصنوعی نیاز دارند.

اغلب خنک کردن ماشینها با جریان هوا انجام می‌شود که این روش را تهویه می‌نامند. در ماشینهای پرسرعت مانند مولدهای توربینی برای خنک کردن از هیدروژن استفاده می‌شود. ماشینهایی هم هست که از آب برای خنک کردن آنها استفاده می‌شود.

۱-۲ - روشهای تهویه

با توجه به روش تهویه انواع ماشینهای الکتریکی بصورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- ماشین با تهویه طبیعی

این ماشینها با جریان طبیعی هوا ناشی از گردش یا اختلاف درجه حرارت خنک می‌شوند.

۲- ماشین با تهویه دستی (خودی)

این ماشینها با وزش هوا به سطوح داخلی توسط فن تعبیه شده در داخل ماشین، که از اجزاء ماشین است، خنک می‌شوند.

۳- ماشین با تهویه خارجی (خودی)

این ماشینها با وزش هوا به سطوح خارجی توسط یک فن که از اجزاء ماشین است، خنک می‌شوند.

۴- ماشین با تهویه جداگانه

این ماشینها بوسیله مایع یا گاز خنک‌کننده که توسط یک وسیله خارجی مانند فن یا پمپ به گردش درمی‌آید خنک می‌شوند.

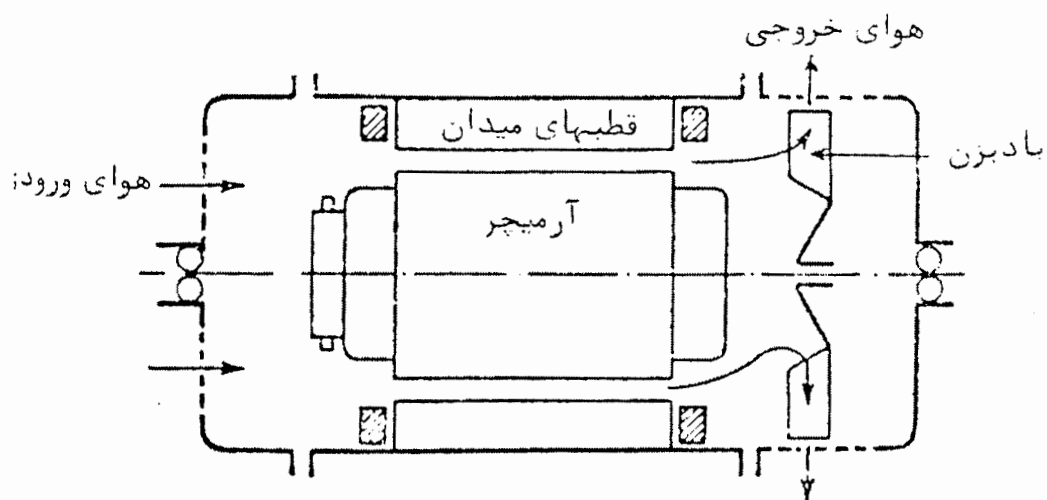
تهویه خودی و تهویه جداگانه را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد.

۱- تهویه واکنشی

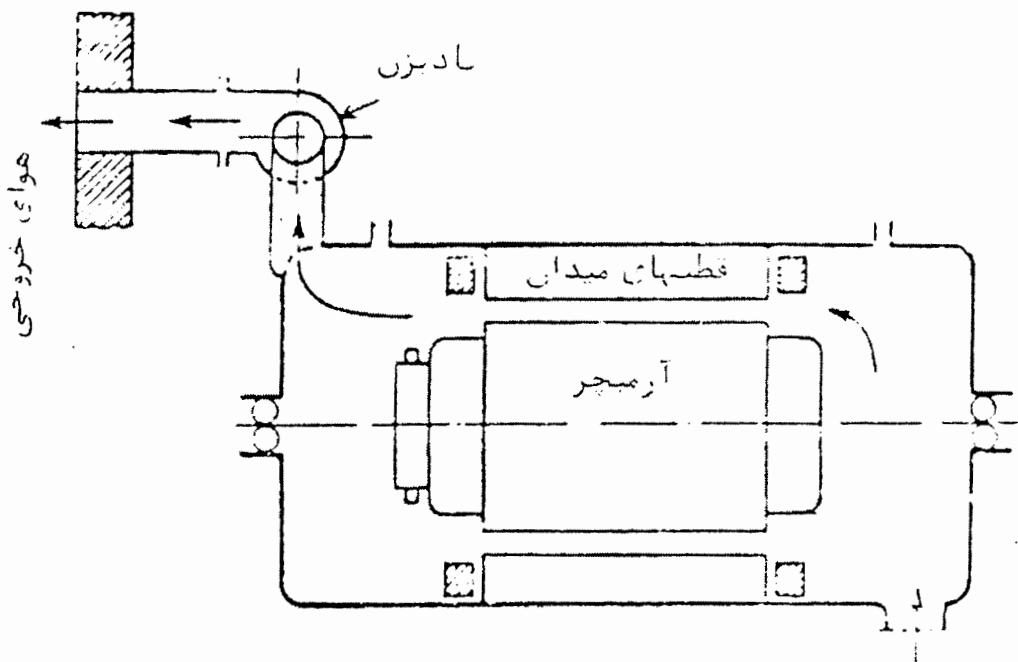
۲- تهویه کنشی

تهویه یک ماشین واکنشی است اگر فن باعث کاهش فشار هوای داخل ماشین شده و در نتیجه هوا با شرایط خارجی فشار جو به داخل ماشین مکیده شود و سپس هوا توسط فن به محیط رانده می‌شود.

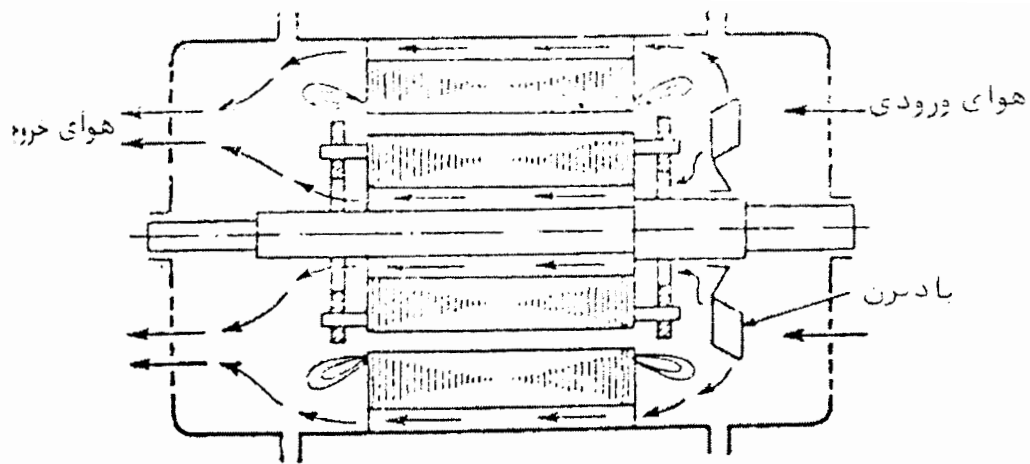
تهویه ماشین را کنشی گویند اگر فن هوا را از محیط مکیده و آنرا به داخل ماشین بفرستند و از آنجا به خارج رانده شود.



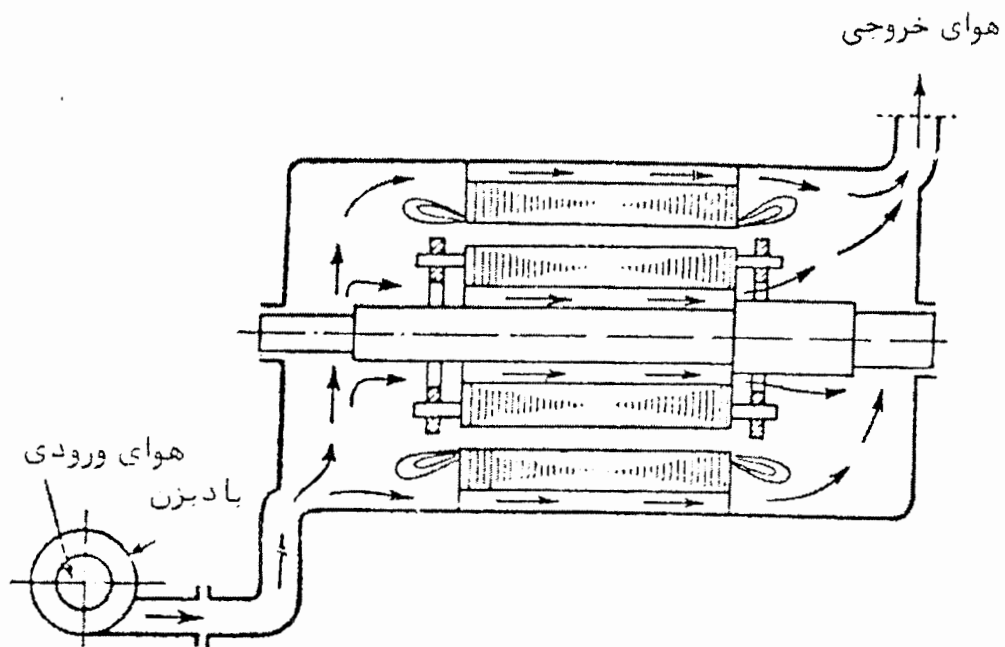
شکل (۱) تهویه واکنشی با فن داخلی



شکل (۲) تهویه واکنشی با فن خارجی



شکل (۳) تهویه کنشی با فن داخلی



شکل (۴) تهویه کنشی با فن خارجی

تهویه واکنشی برای ماشینهای کم قدرت و قدرت متوسط خروجی معمول است در این حالت فن داخلی روی محور مجاور یک سپر نصب شده است. در تهویه واکنشی هوای سرد داخل ماشین شده در حالیکه با تهویه کنشی درجه حرارت هوای سرد بعلت تلفات فن بالا می‌رود. بنابراین در تهویه کنشی مقدار هوای لازم برای خنک کردن بیشتر است. کار آرام ماشینهای الکتریکی ظرف چند سال کار از مسائل مهم است. فن یکی از

منابع ایجاد سر و صدا است مخصوصاً وقتی که قطر داخلی سپر تقریباً مساوی قطر خارجی فن باشد. ماشینهای کم صدا با بار کمتر طرح می‌شوند و در نتیجه تلفات ماشین بر واحد سطح انتقال آن کوچک است. به این ترتیب می‌توان فن با قطر کوچکتر بکار برد.

در چنین حالاتی می‌توان از تهویه کنشی داخلی استفاده کرد. موتورهای القایی که مجاری شعاعی در استاتور و رتور دارند بطور کنشی تهویه می‌شوند.

ماشینهایی وجود دارند که ترکیبی از تهویه کنشی شعاعی و محوری در آنها بکار رفته است.

۱-۳ - جهت جریان هوا

روشهای تهویه را می‌توان بسته به چگونگی عبور هوا از اجزاء گرم ماشین به سه نوع تقسیم کرد:

الف: شعاعی ب: محوری ج: ترکیب شعاعی و محوری

الف: تهویه شعاعی

این روش معمولترین روش تهویه است زیرا حرکت رتور باعث حرکت طبیعی گریز از مرکز هوا شده که در صورت لزوم می‌توان با نصب فن آنرا افزایش داد. شکل (a-5) تهویه شعاعی را برای ماشینهایی که طول بسته آنها کوچک است نشان می‌دهد. شکل سپرها طوری است که هوا را به پیشانی سیم‌ها هدایت کرده و سپس به هسته برمی‌گرداند. در ماشینهایی که طول هسته آنها بزرگ است لازم است که مجاری هوای شعاعی تعبیه شود. (شکل a-5).

۱- انتقال حرارت غیریکنواخت است. از شکل (۶) معلوم می‌شود که درجه حرارت محلی که هوا خارج می‌شود بیشتر از محلی است که هوا وارد می‌گردد زیرا هوا در عبور از محل ورود به خروج گرم می‌شود.

۲- افزایش تلفات آهن تعبیه مجاری تهویه در زیر شیارهای استاتور مقدار آهن را کاهش داده و چگالی شار هسته استاتور را افزایش می‌دهد که در نتیجه تلفات آهن زیاد می‌شود. و در بسیاری از حالات این تلفات بیشتر از میزانی است که توسط خنک کردن جبران شده است.

ج: تهویه شعاعی و محوری

این روش معمولاً در موتورهای بزرگ و مولدهای توربینی بکار می‌رود. زیرا در این ماشینها سطح مجاری تهویه محوری که برای خنک کردن کافی باشد باعث افزایش تلفات آهن شده و بنابراین ترکیبی از تهویه

محوری و شعاعی بکار می‌رود. هوا از یک طرف به داخل ماشین کشیده شده و توسط سپر و رتور به مجاری هدایت می‌شود. فن رتور، هوا را خارج می‌نماید.

۱-۴ - خنک کردن ماشینهای کاملاً بسته

ماشینهای کاملاً بسته در مواردی که استفاده از ماشینهای باز و حفاظت شده جایز نیست بکار می‌رود مانند جایی که هوا ناخالصی‌هایی مانند گازهای انفجاری و بخارات اسیدی داشته باشد و عایق‌ها را خراب نماید. در ماشین کاملاً بسته بین داخل و خارج آن جریان هوا وجود نداشته و تمام حرارت داخلی ماشین از طریق سطح خارجی بدنه به محیط اطراف انتقال می‌یابد.

اگر انتقال حرارت با تشعشع طبیعی و جابجایی صورت گیرد خنک کردن زیاد موثر نیست و قدرت نامی ماشین پایین خواهد بود. بنابراین استفاده از ماشینهای کاملاً بسته جز در هنگامی که مطلقاً لازم باشد کاملاً غیراقتصادی بوده و چنین ماشینهایی از ماشینهای باز یا حفاظت شده گرانتر خواهد بود. ماشینهای کاملاً بسته دو نوعند:

۱- ماشینهایی با تهویه از بدنه

در ماشینهای کاملاً بسته با تهویه از بدنه فن روی محور خارج سپر قرار دارد.

فن در نزدیکی پوشش خارجی نصب شده تا جهت لازم را برای جریان هوا فراهم سازد. این نوع تهویه برای ماشینهای تا قدرت ۲۵kw موثر است. در ماشینهای بزرگتر (تا قدرت ۲۰۰) علاوه بر این گردش داخلی هوا نیز لازمست. این عمل با قرار دادن فن دیگری داخل ماشین انجام می‌شود.

۱-۵ - ماشینهای با سیستم تشعشع کننده (رادیاتور)

در چنین ماشینهایی که یک فن هوا را در داخل ماشین به گردش در می‌آورد. یک فن خارجی هوای گرم را از داخل مکیده و به یک رادیاتور که روی بدنه ماشین نصب شده می‌دمد. هوای گرم در تشعشع کننده خنک

شده و به ماشین برمی‌گردد. این نوع خنک کردن امکان ساخت ماشین‌های تا چند صد kw را بدست می‌دهد.

۱-۶ - مدار خنک‌کننده

: تهویه خودی و جداگانه بر دو نوع است.

۱- مدار تهویه باز

۲- مدار تهویه بسته

در مدار تهویه باز هوای سرد داخل کشیده شده و پس از عبور از قسمت‌های گرم ماشین به خارج رانده می‌شود. بنابراین هوای تمیز و تازه مرتباً به داخل کشیده شده و خارج می‌شود. در ماشین‌های بزرگ که به مقدار زیادی هوا نیاز دارند لازم است هوا را با صافی‌های مناسبی تمیز کرد تا از مسدود شدن مجاری هوا توسط گرد و غبار جلوگیری شود. همچنین لازم است هوا را خشک کرد تا رطوبت آن حذف شود. صافی‌ها را باید زود به زود تمیز کرد. صافی‌ها نیز مقاومت جریان هوا را افزایش داده و در نتیجه قدرت فن برای گردش هوا اضافه خواهد شد.

واضح است که اگر تهویه مدار باز برای ماشین‌های بزرگ که چند تن هوای خنک در ساعت لازم دارند استفاده شود. هزینه عمل‌گزار خواهد شد. همچنین هیچ صافی وجود ندارد که تمام گرد و غبار را از هوا بگیرد و به این دلایل تهویه مدار باز برای ماشین‌های بزرگ بکار نمی‌رود.

روش کامل فراهم کردن هوای خنک برای تهویه، تهویه مدار بسته است. در این روش یک مقدار معین هوا از مدار بسته عبور می‌کند. این مدار شامل مسیرهای مختلفی در ماشین است همراه با محفظه‌ای که در آن فن خنک‌کننده هوا و واسطه‌ها قرار دارند. هوای گرم خروجی از بدنه ماشین از خنک‌کننده آبی می‌گذرد. سپس هوای خنک به ورودی‌های ماشین برمی‌گردد که دوباره به گردش درآید.

روشهای مختلف مورد استفاده برای خنک کردن با هوا چنین است:

۱- تهویه محوری یک طرفه

در این روش هوا با فن ملخی از یک طرف داخل ماشین شده و از طرف دیگر خارج می‌گردد. عیب تهویه محوری یک طرفه در ماشینهای با طور زیاد اینست که در طول ماشین اختلاف درجه رارت سیم‌پیچی خیلی زیاد است.

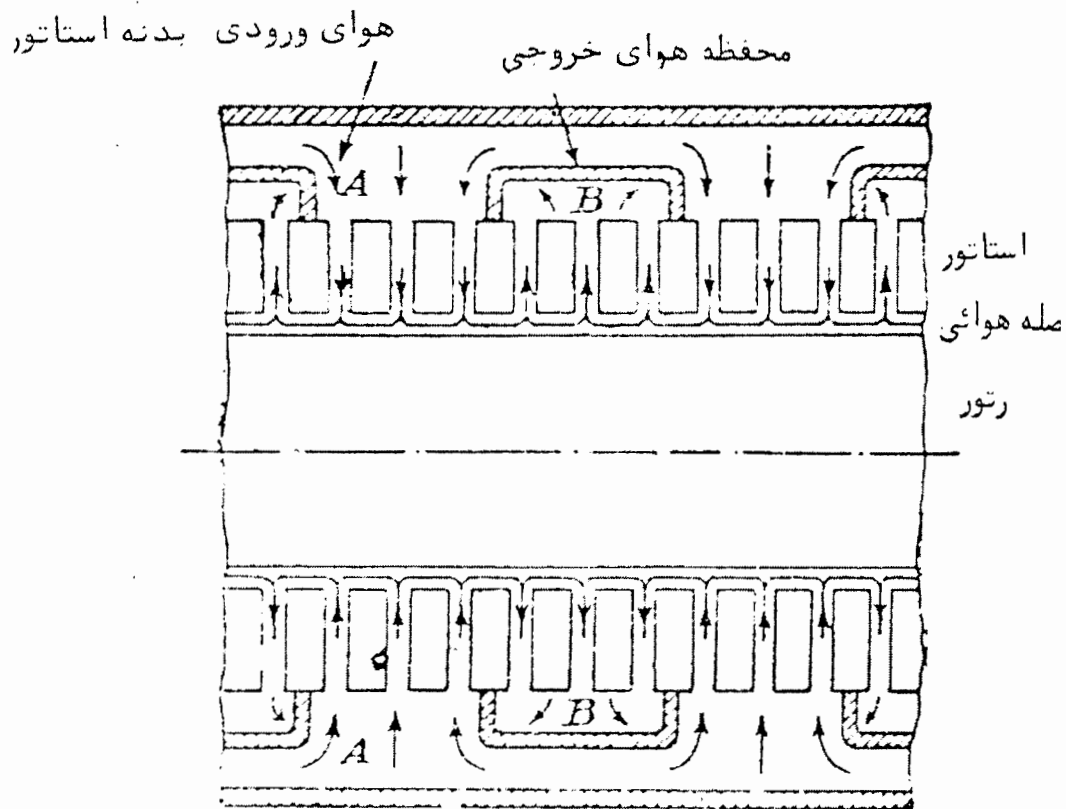
۲- تهویه محوری دو طرفه

در این روش هوا از هر دو طرف داخل ماشین فرستاده می‌شود. تهویه دوطرفه این مزیت را دارد که اتصالات پیشانی سیم‌پیچی‌ها یک درجه حرارت دارند.

۳- تهویه با چند ورودی

روشهای تهویه محوری فوق را نمی‌توان برای موتورهایی که طول هسته‌شان بزرگ است بکار برد زیرا دمیدن هوای سرد لازم بای خنک کردن قسمت‌های مرکزی هسته مشکل است. زیرا در هسته طویل هوا قبل از رسیدن به قسمت‌های مرکزی گرم می‌شود. بنابراین در ماشینهای بزرگ تهویه با چند ورودی بکار می‌رود.

در روش تهویه با چند ورودی قسمت خارجی استاتور به چند بخش تقسیم شده است. این قسمت‌ها طبق شکل (۷) به تناوب به عنوان مجراهای ورودی و خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در محفظه‌های ورودی، هوا بطور شعاعی به داخل هدایت می‌شود در حالی که در محفظه‌های خروجی، هوا بطور شعاعی به خارج هدایت می‌گردد. هوا تحت فشار به محوطه استاتور فرستاده می‌شود از آنجا وارد محفظه‌های ورودی A شده و بطور شعاعی از داخل مجاری استاتور عبور می‌کند. قسمتی از این هوا از مجاری محوری عبور می‌کند و باقی‌مانده از فاصله هوایی گذر می‌کند. هوا سپس بطور شعاعی از بخشهای مجاور هسته به محفظه‌های خروجی B هدایت می‌شود. هوا از محفظه‌های خروجی کشیده شده و به خنک‌کن‌ها فرستاده شده و در آنجا سرد شده و مجدداً به گردش در می‌آید. این روش را می‌توان برای ماشینهای تا ۶۰ MW بکار برد.



شکل (۷) روش خنک کردن با چند ورودی

در عین حال استفاده از هیدروژن جهت خنک کاری در بعضی از ماشینهای الکتریکی نظیر ژنراتورها، به دلیل خواص خوب ترمودینامیکی هیدروژن رایج است.

استفاده از Cooling برای خنک کردن ماشینهای الکتریکی دارای مزایای زیر است:

مزایا:

با کاهش تلفات مربوط به تهویه که قسمت اعظم کل تلفات را در ماشین پر سرعت تشکیل می دهد. بازده ماشین افزایش می یابد.

۲- افزایش قدرت

بطور دقیق کاهش تلفات باعث افزایش قدرت ماشین خواهد شد. مثلا در مورد ژنراتورها

اگر خنک کردن با هیدروژن، تحت فشار 35 g/cm^2 (کمی بالاتر از فشار جو برای جلوگیری از نشت هوا به

داخل هیدروژن) انجام شد. در نتیجه قدرت خروجی ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش می یابد.

۳- افزایش عمر

عمر یک ماشین اصولاً عبارتست از هم‌عایق سیم‌پیچی آن. بدیهی است که خنک‌کاری عمر عایق افزایش می‌یابد.

خنک کردن مستقیم

ابتدا اختلاف بین خنک کردن معمولی و مستقیم را بیان می‌کنیم:

خنک کردن معمولی

ماشینهایی که به طور معمولی خنک می‌شوند تلفات خود را بصورت حرارت به سیال خنک‌کننده‌ای می‌دهند که تماماً خارج عایق سیم‌پیچی‌هاست. روش‌هایی که تا کنون شرح داده شد روشهای معمولی بودند.

خنک کردن مستقیم

در خنک کردن مستقیم تلفات آرمیچر و سیم‌پیچی میدان به ماده خنک‌کننده‌ای که در اطراف عایق سیم‌پیچی گردش می‌کند انتقال می‌یابد. ماشینهایی که به این روش خنک می‌شوند به نامهای پرفشار یا با خنک‌کننده داخلی و یا با خنک‌کننده هادیها خوانده می‌شود. در این روش ماده خنک‌کننده یا با هادی مسی تماس مستقیم دارد یا با موادی که مقاومت حرارتی آنها ناچیز است از هادی جدا می‌شود.

دلایل پذیرفتن خنک کردن مستقیم

کوشش بر این است که قدرت نامی ماشین را بالا ببریم. یک راه در روش خنک کردن معمولی این بود که فشار هیدروژن را افزایش دهیم. حرارت مس رتور محدودیت جدی در مورد خروجی مولدی که بطور معمولی خنک می‌شود، پیش می‌آورد و افزایش فشار هیدروژن بالاتر از 2kg/cm^2 افزایش کمی در قدرت ماشین نشان خواهد داد.

مواد خنک‌کننده

مواد خنک‌کننده که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

هیدروژن، آب و روغن

۱- هیدروژن

در روش مستقیم با استفاده از هیدروژن هادیهای استاتور و رتور سوراخ‌دار ساخته می‌شوند. هیدروژن داخل این هادیها از یک طرف به طرف دیگر پمپ می‌شود. با خنک کردن مستقیم با هیدروژن می‌توان ماشینهای با قدرت بالا ساخت.

۲- آب

تبدیل روش خنک کردن سیم‌پیچی استاتور مولدهای توربینی از خنک کردن با هیدروژن به آب به دو دلیل منطقی است. اولاً با افزایش قدرت نامی مولد، فضای بیشتری برای هادیها جهت عبور گاز سردکننده لازم است. ثانياً محدودیت قطر رتور باعث می‌شود که طول آنرا افزایش دهند و برای گردش دادن هیدروژن از هادیهای خیلی بلند احتیاج به فشار ابتدایی بالایی است. آب بعنوان ماده خنک‌کننده جانشین هیدروژن شده است نه تنها به دلیل اینکه ظرفیت انتقال حرارت آن خیلی بهتر است بلکه لزجت (ویسکوزیته) آب خالص خیلی کوچک بوده و می‌تواند بدون خطر ایجاد فشار زیاد جریان در لوله‌های کوچک عبور کند. مزایای آب بعنوان ماده خنک‌کننده عبارتند از:

۱- قدرت لازم برای به گردش درآوردن ماده خنک‌کننده تابعی از جرم خنک‌کننده و فشار جریان لازم آن است. جرم آب لازم که تلفات حرارتی معین را انتقال می‌دهد بزرگتر از هیدروژن است ولی بعلاوه لزجت کم آن قدرت پمپ کوچک خواهد بود.

۲- بین آب خنک‌کننده و هادی اختلاف درجه حرارت موجود نیست و بنابراین از مولدهایی که با آب خنک می‌شوند می‌توان نسبت به هیدروژن بار بیشتری گرفت.

فصل دوم

روشهای نوین

بررسی های انجام شده در مورد Cooling موتورهای الکتریکی بیشتر متوجه استفاده از عایقهای قویتر و مقاومتر در برابر حرارت می باشد. همچنین در ساختار کانالهای خنک سازی توسط هوا نیز با افزایش مسیر کانالها امکان خنک سازی بهتر استاتور و روتور را میسر می سازند. اما در همه روشها خنک کاری موتور معمولا با هوا صورت میگیرد و به منظور جلوگیری از آسیب رسیدن به موتور از سیستم بسته به کرات استفاده می کنند.

فصل سوم

شرح اقدامات انجام شده

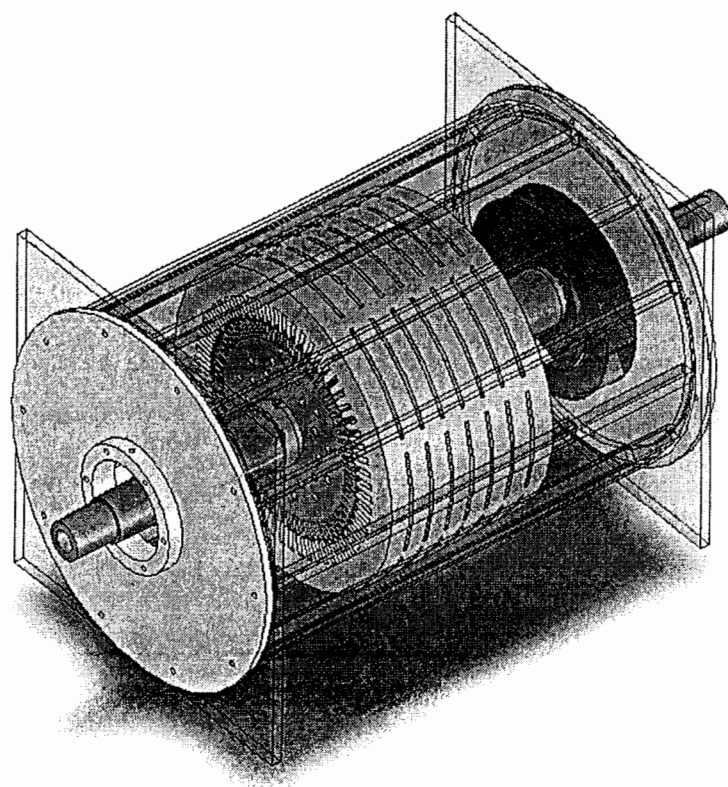
پس از بررسیهای مقدماتی و انجام بازدید اولیه از کارخانه توربوژنراتور و تهیه برخی اطلاعات پایه مورد نیاز، نقشه و ابعاد روتور و استاتور الکتروموتور مورد نظر تهیه شده و اقدامات لازم جهت تهیه نرم افزار های B-Jack، آخرین نسخه Gambit-Fluent و SolidWorks صورت پذیرفت.

۳-۱ - تهیه نرم افزارهای لازم و آماده سازی آنها بر روی کامپیوتر

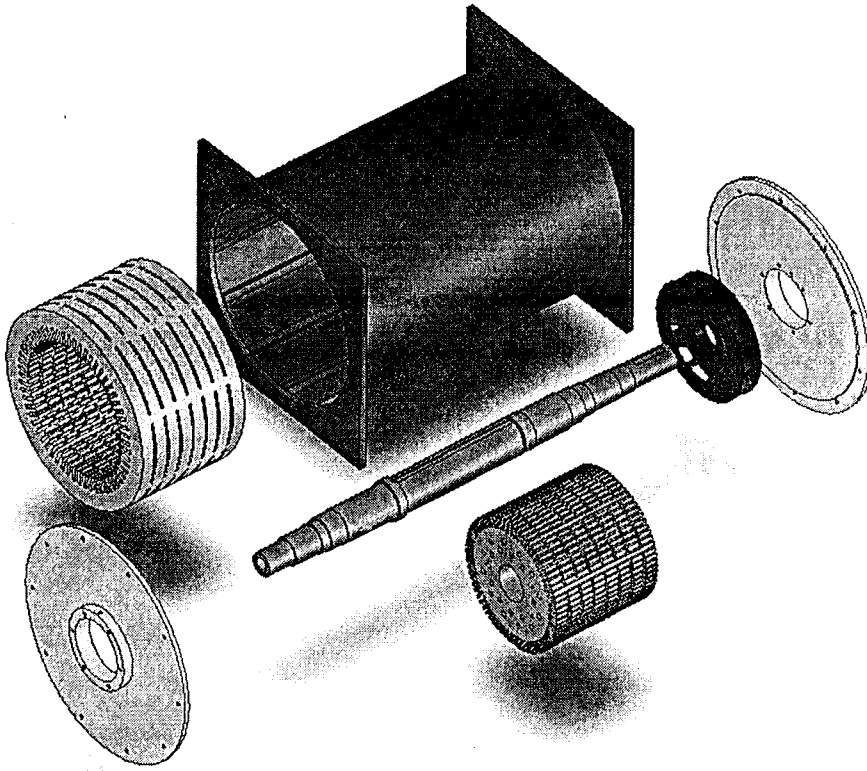
۳-۲ - مدلسازی هندسی و ایجاد ناحیه های محاسباتی (Mesh)

در این مرحله کار با نرم افزار Solidworks جهت تهیه نقشه های سه بعدی از الکتروموتور و نرم افزار Gambit جهت تولید ناحیه محاسباتی انجام شده است. در ایجاد شبکه که یکی از مهمترین قسمتها در حل عددی بوده و ایجاد مناسب آن بسیار حساس و تعیین کننده میباشد به مسایل زیر بایستی توجه نمود. چنانچه شبکه بیش از حد ظریف باشد حل معادلات انتقال حرارت به دلیل زمانبری زیاد عملاً ممکن نخواهد بود و چنانچه بیش از حد بزرگ انتخاب شود نتایج دقت لازم را نخواهند داشت نتایج مطالعات علمی نشان دهنده نیاز به شبکه های ظریف در نزدیکی مرزها میباشد. علاوه بر ظرافت شبکه ها، نوع آنها نیز مهم میباشد و استفاده از شبکه های منشوری ترکیبی Tet/Hyb کمک مهمی در حل مسئله خواهد نمود. یک راه منطقی برای اطمینان از ظرافت شبکه بررسی حساسیت پاسخها نسبت به افزایش تعداد سلولها خواهد بود. این کار با قابلیت های Fluent قابل انجام بوده و در پروژه نیز جهت رسیدن به تعداد مناسب ناحیه ها اعمال شده است.

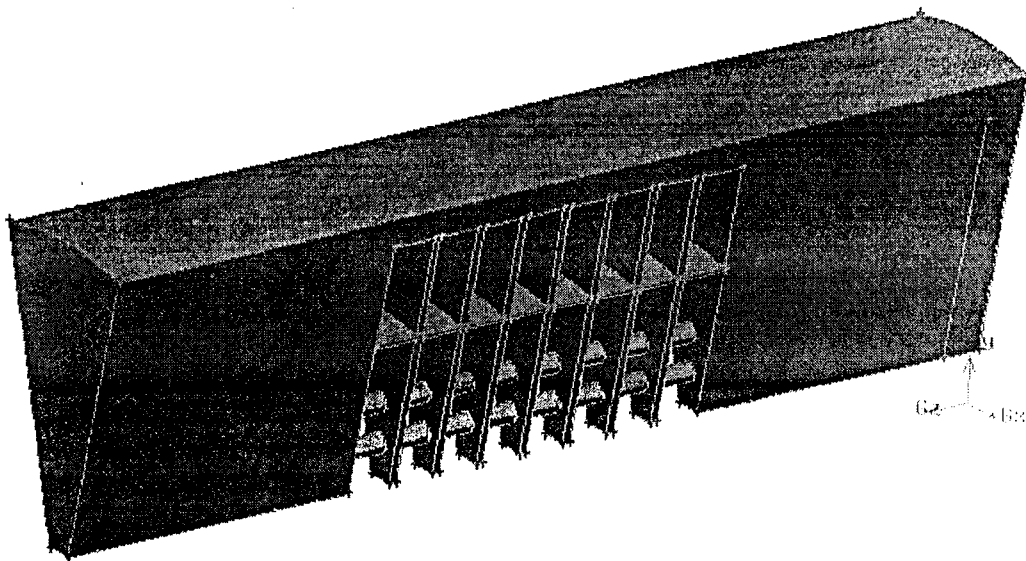
ضمناً به دلیل ماهیت سه بعدی مسئله، مغشوش بودن جریان در الکتروموتور بعد از تهیه مدل سه بعدی و کامل الکتروموتور، تنها یک قطاع ۱/۱۲ از موتور تحلیل شده است. نتیجه این مرحله از کار شامل شکل مدل کامل سه بعدی الکتروموتور تصویر شماره ۱ و ۲، شکل مدل قطاع ۱/۱۲ تصویر شماره ۳ و شکل مدل مش بندی شده تصویر شماره ۴ میباشد.



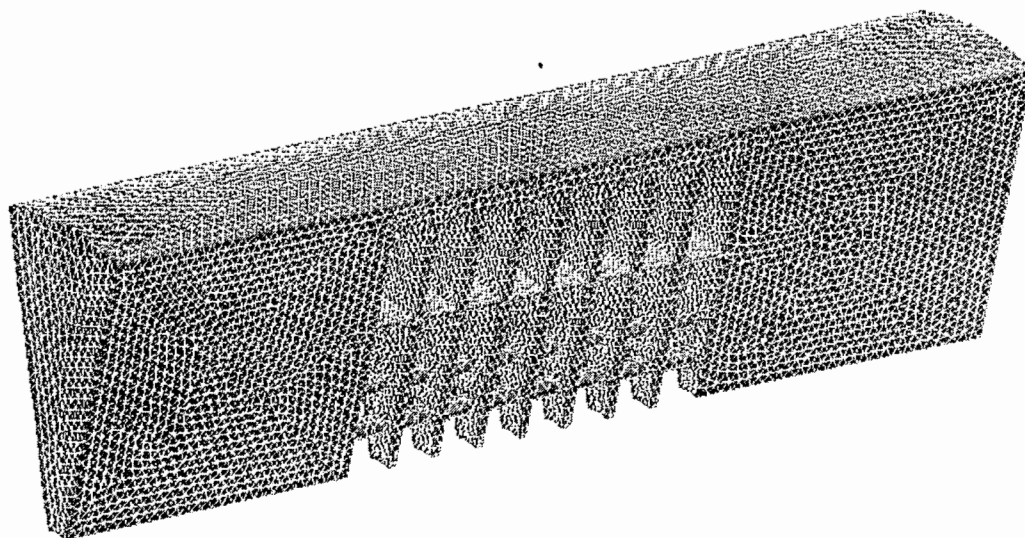
شکل ۱- مدل کامل سه بعدی الکتروموتور 400KW (مونتاز شده)



شکل ۲- نمای انفجاری مدل سه بعدی الکتروموتور 400KW



شکل ۳- مدل هندسی قطاع ۱/۱۲ الکتروموتور 400KW



شکل ۴ - مدل شبکه بندی شده قطاع ۱/۱۲ الکتروموتور 400KW

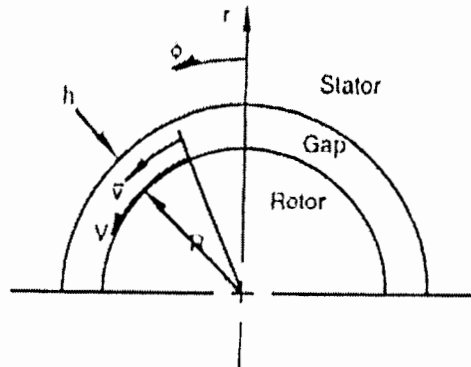
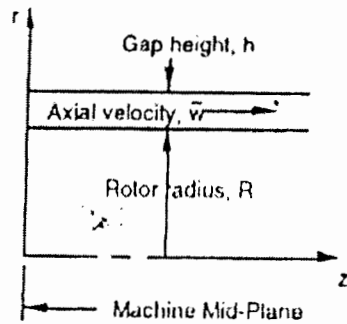
۳-۳ - مرحله انتخاب مدلسازی فیزیکی مناسب جهت پدیده های حاکم بر الکتروموتور

400 KW

۳-۳-۱ - مدلسازی جریان سیال بین دو استوانه متحدالمرکز دوار

جریان فضای بین دو استوانه دوار از اهمیت خاصی برخوردار بوده، و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. این جریان نه تنها از این جهت که پدیده های فیزیکی زیادی را مورد مطالعه قرار می دهد بلکه به دلیل کاربرد بسیار گسترده ای که به عنوان مثال در انتقال حرارت بین روتور و استاتور دارد، دارای اهمیت بسیاری می باشد. همچنین در مطالعه جریان بین دو استوانه دوار پدیده ناپایداری تیلور (Taylor Instability) رخ می دهد که در بررسی جریان سیال و انتقال حرارت بسیار اثرگذار می باشد. از این جمله می توان بر مطالعاتی که توسط R.E. Mayle, S.Hess انجام شده است اشاره نمود. در بررسی جریان بین روتور و استاتور در موتور و ژنراتور، پیچیدگی دیگری وجود دارد که حل تحلیل انتقال حرارت را بسیار مشکل می کند و این پیچیدگی بخاطر آن است که جریان در داخل شکاف (Gap) بدلیل تزریق یا مکش جریان های هوای خنک کاری هرگز توسعه یافته نمی شود و لذا معادلات جریان توسعه یافته در اینجا کاربردی ندارد.

بمنظور تحلیل جریان دوار بین دو استوانه ابتدا جریان در حالت ساده تر یعنی هنگامی که تزریق و مکش وجود ندارد مورد مطالعه قرار گرفته و سپس در حالتیکه هوای خنک کاری به داخل شکاف تراوش می کند مورد تحلیل قرار می گیرد. در همه این حالتها سطح دو استوانه، کاملاً زبر (Completely Rough) در نظر گرفته می شود.



شکل ۵- سیستم مختصات برای جریان چرخشی در شکاف استوانه ای با جریان محوری

تحلیل جریان چرخشی ساده

برای یک جریان سیال چرخشی متقارن در یک شکاف بین دو استوانه متحدالمرکز (Gap) روابط سرعت و فشار متوسط جریان به صورت زیر هستند:

$$\rho \bar{\omega} A = \text{Const.} \quad (1)$$

$$\bar{\omega} h \frac{d\bar{v}}{dz} = \frac{\tau_{\phi s}}{\rho} - \frac{\tau_{\phi r}}{\rho} \quad (2)$$

$$h \frac{d\bar{p}}{\rho dz} = \frac{\tau_{zs}}{\rho} - \frac{\tau_{zr}}{\rho} \quad (3)$$

در اینجا ρ چگالی، $\bar{\omega}$ سرعت متوسط جریان در راستای محوری z ، A مساحت محوری جریان، \bar{v} سرعت دورانی متوسط جریان، h ارتفاع gap، \bar{p} فشار متوسط، $\tau_{\phi s}$ و $\tau_{\phi r}$ تنش های برشی مماسی روی روتور و استاتور و همینطور τ_{zs} و τ_{zr} تنش های برشی محوری هستند.

برای حل روابط (۲) و (۳) نیاز به محاسبه تنش های برشی استاتور و روتور و مولفه های آنها در راستای مماسی و محوری داریم. تنش های برشی برآیند استاتور و روتور به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\frac{\tau_r}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\tau_{\phi r}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{zr}}{\rho}\right)^2}$$

$$\frac{\tau_s}{\rho} = \sqrt{(\tau_{\phi s}/\rho)^2 + (\tau_{zs}/\rho)^2} \quad (4)$$

برای جریان چرخشی درهم هنگامی که مولفه های تنش های برشی با روابط زیر تعریف شوند، پروفیل های سرعت محوری و مماسی از قانون لگاریتمی دیواره پیروی می کنند.

$$\frac{\tau_{\phi s}}{\rho} = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho}} v_{\phi s}^* \quad \frac{\tau_{\phi r}}{\rho} = \sqrt{\frac{\tau_r}{\rho}} v_{\phi r}^* \quad \text{مماسی}$$

$$\frac{\tau_{zs}}{\rho} = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho}} v_{zs}^* \quad \frac{\tau_{zr}}{\rho} = \sqrt{\frac{\tau_r}{\rho}} v_{zr}^* \quad \text{محوری}$$

در اینجا v_{zr}^* و $v_{\phi r}^*$ مولفه های مماسی و محوری سرعت اصطکاکی بر روی روتور و مشابه $v_{\phi s}^*$ و v_{zs}^* بر روی استاتور هستند.

با تعریف ضرایب اصطکاک برای جریان روی سطوح روتور و استاتور f_r ، f_s و با این فرض که ضریب اصطکاک در جهت محوری f_z برای هر دو سطح یکسان است، سرعت های اصطکاکی با روابط زیر محاسبه می شوند:

$$v_{zr}^* = -\sqrt{\frac{f_z}{8}} \bar{w}, \quad v_{\phi r}^* = -\sqrt{\frac{f_s}{8}} \bar{v}, \quad v_{\phi s}^* = -\sqrt{\frac{f_r}{8}} (V - \bar{v})$$

9

$$v_{zs}^* = -\sqrt{\frac{f_z}{8}} \bar{w}$$

که در اینجا سرعت مماسی نسبی برای روتور برابر با $V - \bar{v}$ و برای استاتور \bar{v} است، همچنین سرعت محوری نسبی برای هر دو سطح \bar{w} می باشد. علامت منفی جهت درست را برای تنش های برشی فراهم می کند. با جایگزینی این روابط در رابطه (5) و حل روابط (4) و (5) برای مولفه های تنش برشی داریم:

$$\frac{\tau_{\phi r}}{\rho} = -\left[\sqrt{\frac{f_r}{8}} \sqrt{\left(\frac{f_r}{8}\right)(V - \bar{v})^2 + \left(\frac{f_z}{8}\right)\bar{w}^2} \right] (V - \bar{v})$$

$$\frac{\tau_{\phi s}}{\rho} = -\left[\sqrt{\frac{f_s}{8}} \sqrt{\left(\frac{f_s}{8}\right)\bar{v}^2 + \left(\frac{f_z}{8}\right)\bar{w}^2} \right] \bar{v}$$

$$\frac{\tau_{zr}}{\rho} = -\left[\sqrt{\frac{f_z}{8}} \sqrt{\left(\frac{f_r}{8}\right)(V - \bar{v})^2 + \left(\frac{f_z}{8}\right)\bar{w}^2} \right] \bar{w}$$

$$\frac{\tau_{zs}}{\rho} = -\left[\sqrt{\frac{f_z}{8}} \sqrt{\left(\frac{f_s}{8}\right)\bar{v}^2 + \left(\frac{f_z}{8}\right)\bar{w}^2} \right] \bar{w}$$

9

با جایگزینی این عبارات در روابط (2) و (3) و بازنویسی آنها داریم:

$$\bar{w} h \frac{d\bar{v}}{dz} = -\left[\sqrt{\frac{f_r}{8}} \sqrt{\left(\frac{f_r}{8}\right)(V - \bar{v})^2 + \left(\frac{f_z}{8}\right)\bar{w}^2} \right] (V - \bar{v}) - \left[\sqrt{\frac{f_s}{8}} \sqrt{\left(\frac{f_s}{8}\right)\bar{v}^2 + \left(\frac{f_z}{8}\right)\bar{w}^2} \right] \bar{v} \quad (6)$$

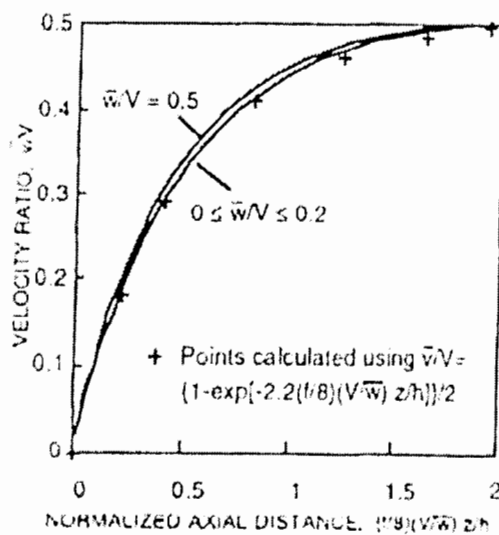
$$h \frac{d\bar{p}}{\rho dz} = -\sqrt{\frac{f_z}{8}} \left[\sqrt{\left(\frac{f_r}{8}\right)(V - \bar{v})^2 + \left(\frac{f_z}{8}\right)\bar{w}^2} - \sqrt{\left(\frac{f_s}{8}\right)\bar{v}^2 + \left(\frac{f_z}{8}\right)\bar{w}^2} \right] \bar{w} \quad (7)$$

با بخاطر داشتن این که \bar{w} ثابت است، روابط فوق را می توان برای \bar{v} و \bar{p} هنگامی که ضرایب اصطکاک معلوم باشند، حل کرد.

محاسبه پاسخ ها برای سطوح کاملاً صاف

اگر هر دو سطح روتور استاتور کاملاً صاف باشند، ضرایب اصطکاک مستقل از اعداد رینولدز دورانی و محوری هستند. رابطه (۶) بصورت عددی برای $f_r = f_s = f_z = f = Const.$ و $\bar{v} = 0$ در $z=0$ حل گشته است. نتایج تحلیل برای نرخ های سیال عبوری $\bar{w}/V \leq 0.5$ در شکل (۲) ترسیم شده اند و همانطور که مشاهده می شود رابطه ساده زیر معادل منحنی ترسیم شده است.

$$\frac{\bar{v}}{V} = \frac{1}{2} \left(1 - \exp \left[-2.2 \left(\frac{f}{8} \right) \left(\frac{V}{\bar{w}} \right) \frac{z}{h} \right] \right), \quad (\bar{v} = 0; z = 0) \quad (8)$$



شکل ۶- جریان مماسی محاسبه شده در شکاف بین روتور- استاتور برای پارامترهای مختلف جریان محوری

معادلات حالت تزریق جریان

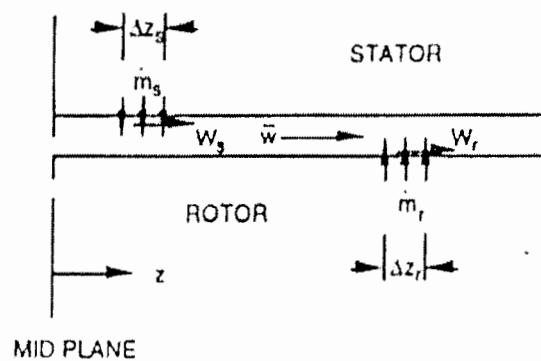
برای جریان دوار در یک شکاف استوانه ای به همراه تزریق، روابط سرعت های مماسی و محوری متوسط به صورت زیر است:

$$A = \frac{d\bar{w}}{dz} = \frac{\dot{m}_r}{\rho \Delta z_r} + \frac{\dot{m}_s}{\rho \Delta z_s} \quad (9)$$

$$\bar{w} A \frac{d\bar{v}}{dz} = 2\pi R \left[\sqrt{\frac{f_r}{8}} \sqrt{\left(\frac{f_r}{8} (V - \bar{v})^2 + \left(\frac{f_z}{8}\right) \bar{w}^2\right)} (V - \bar{v}) - 2\pi R \left[\sqrt{\frac{f_r}{8}} \sqrt{\left(\frac{f_s}{8}\right) \bar{v}^2 + \left(\frac{f_z}{8}\right) \bar{w}^2} \right] \bar{v} + \right. \quad (10)$$

$$\frac{m_r^*}{\rho \Delta z_r} (1 - k_v) (V - \bar{v}) - \frac{m_s^*}{\rho \Delta z_s} (1 - k_v) \bar{v}$$

که در اینجا m_r^* و m_s^* دبی جرمی تزریقی از روتور و استاتور هستند. Δz_s و Δz_r فواصل محوری جریان تزریقی هستند، k_v نسبت سرعت مماسی تزریقی به سرعت مماسی متوسط نسبی شکاف است.



شکل ۷- جریان در شکاف با تزریق هوای خنک کننده

۲-۳-۳- مدلسازی جریان در الکتروموتور

به منظور مدلسازی در الکتروموتور از معادلات دیفرانسیلی بقاء جرم یا پیوستگی و بقاء مومنوم اندازه حرکت طبق روش ل بررسی جریان سیالات استفاده شده است. معادلات پایه فوق به شرح زیر میباشد.

معادله بقاء جرم یا پیوستگی

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho v) + \frac{\rho v}{\tau} = S_m \quad (11)$$

در معادله (۱)، ρ جرم حجمی، x_i محورهای مختصات هندسی، u_i مولفه های سرعت در جهات هندسی

مختلف و S_m جرم اضافه شده در اثر تبخیر بخار ناشی از فاز دوم (نظیر قطرات مایع و ...) می باشد.

معادله بقای مومنوم یا ناویه استوکس، در شکل کلی آن به صورت زیر میباشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho.u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho.u_i.u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho.g_i + F_i \quad (12)$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad \text{که در آن داریم:}$$

در جریان خاص جریان دو بعدی متقارن شکل نهایی معادله به صورت معادله ۳ میباشد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho.v) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r.\rho.u.v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r.\rho.v.v) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r.\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r.\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{v}) \right) \right] - 2\mu \frac{v}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \bar{v}) + \rho \frac{w^2}{r} + F_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho.u) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r.\rho.u.u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r.\rho.v.u) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r.\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{v}) \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r.\mu \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned}$$

(13)

البته در پروژه از شکل پایه سه بعدی معادله سه بعدی ناویه استوکس برای حل جریان استفاده شده است.

۳-۳-۳- مدلسازی اغتشاش (Turbulence) در جریان هوای الکتروموتور

نرم افزار Fluent امان استفاده از مدل‌های مختلف اغتشاش را به شرح زیر فراهم می‌سازد.

• مدل *K - Epsilon* (Standard *K - ε*)

• مدل *K - Epsilon* (RNG *K - ε*)

• مدل *K - Epsilon* (Realizable *K - ε*)

• مدل *Reynolds Stress Model*

یک واقعیت نامناسب در ارتباط با جریان سیالات، این نکته را بیان می‌کند که نمیتوان مدل خاصی از

اغتشاش را در تمامی مسایل بکار برد و انتخاب مدل اغتشاش بستگی به موارد فیزیک جریان مورد بررسی،

تجربیات قبلی، دقت مورد نظر، امکانات کامپیوتری موجود (نوع، حافظه و سرعت) دارد. به منظر انتخاب مدل مناسب می بایستی از توانایی ها و محدودیت‌های انتخاب‌های مختلف دید روشنی داشت.

به منظور مدل‌سازی اغتشاش در ابتدا معادیه ناویه استوکس در شرایط گذرا (بدلیل ماهیت ناپایداری اغتشاش) با استفاده از روش متوسط گیری رینولدز (Reynolds Averaging) به معادلات ناویه استوکس متوسط گیری شده (RANS Reynolds Averaging Navier-Stokes) تبدیل می شوند. اصول کار به شرح زیر میباشد.

برای مولفه های سرعت داریم :

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (14)$$

در معادله فوق \bar{u}_i و u'_i ترمهای متوسط و لحظه ای سرعت در جهت های سه گانه هندسی می باشند. برای فشار و سایر مقادیر اسکالر نیز داریم :

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (15)$$

که در آن ϕ یک کمیت اسکالر نظیر فشار، انرژی و ... میباشد با جایگذاری مقادیر فوق در معادلات پیوستگی و مومنوم و متوسط گیری نسبت به زمان خواهیم داشت

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

معادلات فوق معادلات متوسط گیری شده رینولدز ناویه استوکس (RANS) می باشند.

معادلات فوق دارای شکل مشابه با معادله ناویه استوکس اصلی یا لحظه ای دارند. تنها تفاوت آنها ظهور

ترمهای سرعت و دیگر پارامترها به صورت متوسط گیری شده زمانی در معادلات و نیز ترم اضافی $e.u'_i.u'_j$ بیان کننده اثرات توربولانس می باشد.

هدف از مدل‌سازی مختلف توربولانس نیز بیان معادلات کمکی برای ترم فوق و قابل حل پذیر شدن معادلات اصلی به کمک معادلات کمکی می‌باشد. همانطور که گفته شده در نرم افزار FLUENT مدل‌های مختلفی پیش بینی شده است که یکی از قویترین مدل‌ها که کاربرد صنعتی گسترده دارد مدل (RNG, K-Epsilon) می‌باشد. در این مدل از دو معادله برای مدل‌سازی اغتشاش با ضرایب تجربی مناسب استفاده میشود و در پروژه حاضر نیز از مدل (RNG, K-Epsilon) در محاسبات استفاده شده است.

دلیل اساسی، ساده تر بودن و صنعتی بودن مدل فوق بوده است که به ویژه با توجه به محدودیتهای سخت افزاری پروژه (عدم استفاده از کامپیوترهای بزرگ با حافظه و سرعت بالا) تنها مدل قابل استفاده نیز همین مدل بوده است. ضمناً مدل فوق در حالت‌هایی که سیرکولاسیون بالا باشد، مانند مدل الکتروموتورها، دقت خوبی دارد که در حالت مسئله مورد بررسی ما تقریباً صادق است.

۳-۳-۴ - مدل‌سازی انتقال حرارت و جرم در الکتروموتور

در نرم افزار FLUENT انتقال حرارت مغشوش، با استفاده از مفهوم تشابه رینولدز (Reynolds Analogy) مدل‌سازی شده است. معادله انرژی حاصل از روش فوق به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(k + \frac{C_p \cdot \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right] + S_h \quad (17)$$

که در معادله فوق E انرژی کل و $(\tau_{ij})_{eff}$ تانسور با معادله زیر می‌باشد

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$$

ترم $(\tau_{ij})_{eff}$ بیان کننده گرمایش حاصل از لزجت بوده که معمولاً با روش حل کننده کوپل شده در نرم افزار حل می‌شوند (Coupled Solver).

مدل‌سازی انتقال جرم مغشوش نیز به روش مشابه و با مقدار پیش فرض عدد اشمیت برابر ۰/۷ انجام میشود. لازم به تذکر است که انتقال حرارت و جرم بصورت پیش فرض در حل کننده FLUENT لحاظ نشده بلکه در بخش پانل لزجت (Viscous Model Panel) فعال میشود.

۳-۳-۵- مدل‌سازی انتقال حرارت تشعشع در الکتروموتور

با توجه به اهمیت انتقال حرارت تشعشعی در کوره بویلر می‌بایستی مدل‌سازی آن نیز انجام شود. در نرم افزار FLUENT مدل‌های متفاوتی جهت انتقال حرارت تشعشع پیش بینی شده است که عبارتند از :

- مدل انتقال حرارت تشعشعی مجزاء (DTRM)
- مدل P-1
- مدل Rosseland
- مدل مختصات مجزاء تشعشع (Discrete Ordinates)

در پروژه حاضر به دلیل مزایای مدل P-1 نظیر سادگی حل، زمان کم و پدیده Scattering در تشعشع ناشی از احتراق این مدل جهت محاسبات کوره انتخاب شده است. ضمناً مدل فوق برای کلیه هندسه‌هایی که دارای ضخامت نوری بالا میباشند (Optically Thick) قابل استفاده بوده و دقت دارد که شرایط مزبور در الکتروموتور مورد نظر برقرار بوده بنابراین مدل دارای دقت بسیار خوبی میباشد. معادله پایه انتقال حرارت تشعشعی به صورت زیر میباشد.

$$\frac{dI(r,s)}{ds} + (a + \sigma_s).I(r,s) = a.n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s').\phi(s,s').d\Omega'$$

معادلات مدل P-1 در راهنمای نرم افزار آمده است.

اساس مدل P-1 به پایه بسط شدت تشعشع به صورت سری های عمودی کروی هارمونیک می‌باشد. اگر تنها چهار ترم در سری فوق استفاده شود معادله زیر برای فلاکس تشعشعی بدست می‌آید.

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G$$

در معادله فوق a ضریب جذب σ_s ، ضریب پراش Scattering، G تشعشع برخوردی (Incident Radiation) و C ضریب معادله فاز خطی، غیر ایزنوتروپیک (Linear-anisotropic phase function) میباشند. با معرفی پارامتر زیر

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s}$$

معادله ۱۰ بصورت زیر ساده میشود .

$$q_r = -\Gamma \nabla G$$

که در آن معادله انتقال برای G به صورت زیر میآید.

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0$$

در معادله فوق σ ثابت اسفان بولتزمن میباشد.

نرم افزار FLUENT معادله فوق را برای شدت تشعشع محلی در حالتی که مدل P-1 فعال می باشد حل میکند. با ترکیب معادلات خواهیم داشت :

$$-\nabla q_r = aG - 4a\sigma T^4$$

مقدار ∇q حاصل از معادلات مستقیماً در معادلات انرژی جایگزین می شود.

۳-۳-۶ - صحت اعتبار مدل (Model Validation)

برای ارزیابی صحت مدل ریاضی و فیزیکی به کار رفته اولاً دمای خروجی با دمای اندازه گیری شده مقایسه گردید که دقت قابل قبولی را نشان می دهد. همچنین نتایج بدست آمده با نتایج تحلیلی تجربی جریان مقایسه گردید که در مرجع [10] ارائه شده است

فصل چهارم

اعمال شرایط مرزی به معادلات حاکم بر مسئله

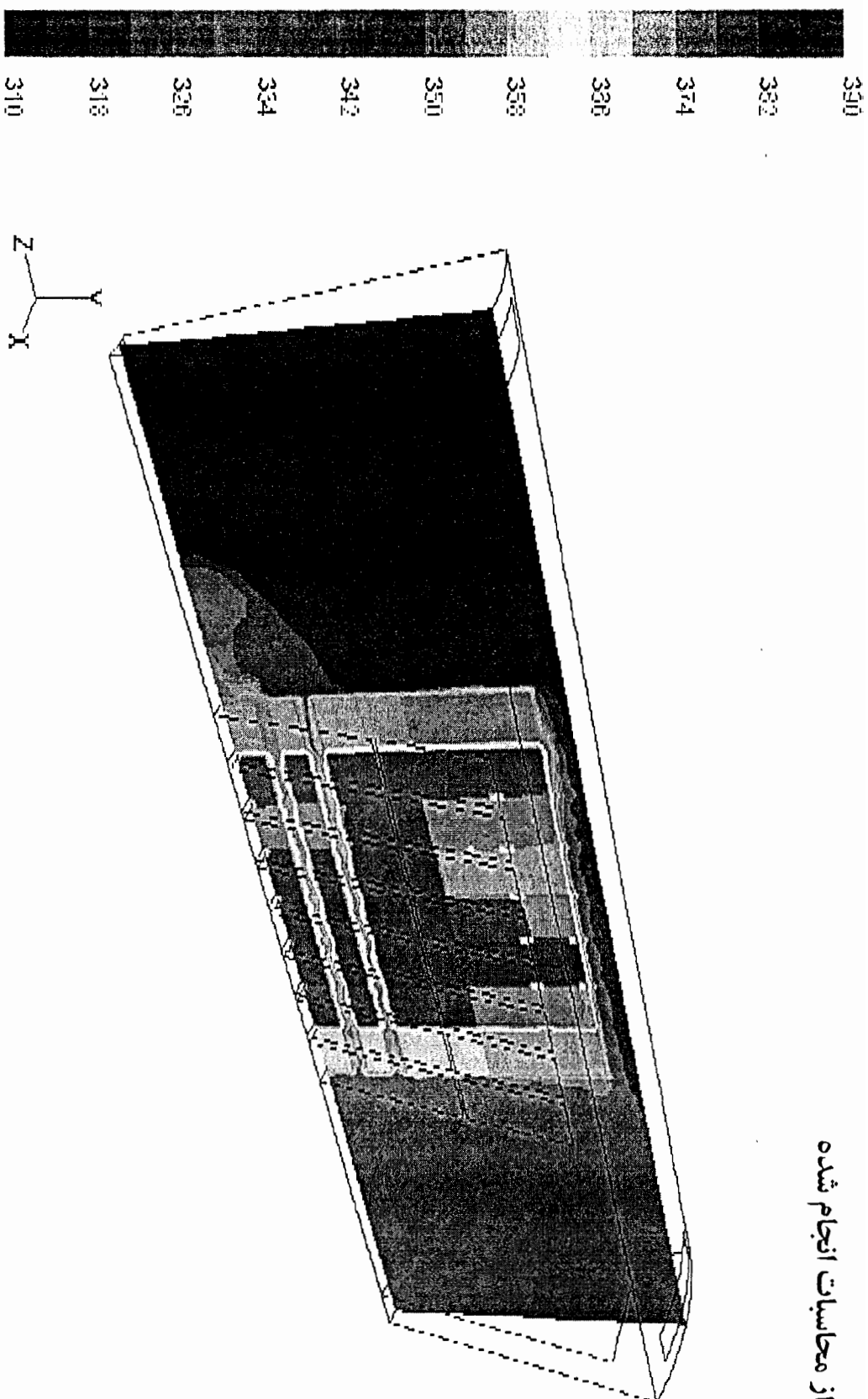
انتقال حرارت در الکتروموتور

در نرم افزار FLUENT می توان شرایط مرزی بسیار متنوعی را به معادلات پایه فیزیکی حاکم نظیر سرعت، فشار، دبی، دما و ... معین نمود. شرح کامل شرایط مرزی فوق در راهنمای نرم افزار آمده است. از مجموعه شرایط مرزی، شرایط مرزی زیر انتخاب و به معادلات حاکم اعمال شده است.

- با توجه به دبی هوای ورودی لازم برای خنک کاری و هندسه ورودی، سرعت هوای ورودی محاسبه و معلوم فرض شده است.
- اختلاف فشار مورد نیاز برای جبران تلفات فشار محاسبه و در شرایط مرزی فن به عنوان Pressure-Jump ثابت تعریف شده است.
- سرعت دورانی روتور (شافت و هسته روتور) با توجه به محاسبات الکتریکی بدست آمده و معلوم شده است.

- با توجه به اینکه شرایط خروجی هوا برای ما نامشخص است، خروجی هوای داخل موتور بصورت Out_flow تعریف شده است تا شرایط خروجی توسط نرم افزار FLUENT محاسبه شود.
- با توجه به اینکه ۱/۱۲ مدل کامل در نظر گرفته شده است و با توجه به هندسه مدل شرایط مرزی Periodic و از نوع Rotational در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از محاسبات انجام شده



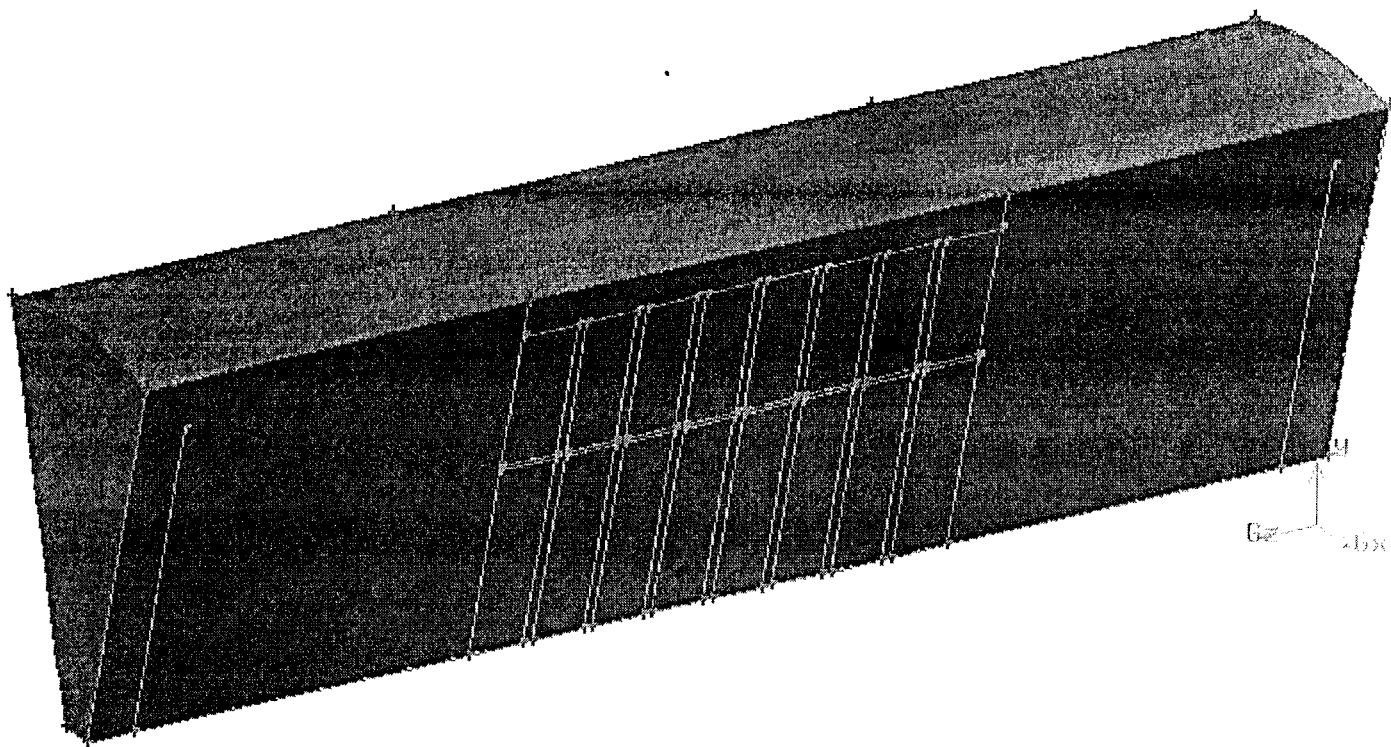
شکل ۸- توزیع دمای هوا بر حسب کلومین

همانطور که ملاحظه میشود با در نظر گرفتن دبی 0.3 Kg/s برای این قطاع 1/12 از کل مدل دمای داخل الکتروموتور در برخی از نواحی روتور و استاتور به نزدیکی 120 °C میرسد. این دما ممکن است که برای انواعی از عایقها قابل تحمل باشد ولی بر راندمان الکتروموتور اثر منفی گذاشته و باعث کاهش عمر مفید آن میشود، لذا میتوان نتیجه گرفت که این طراحی مناسب نمی باشد و باید تغییری در نحوه خنک کاری داده شود.

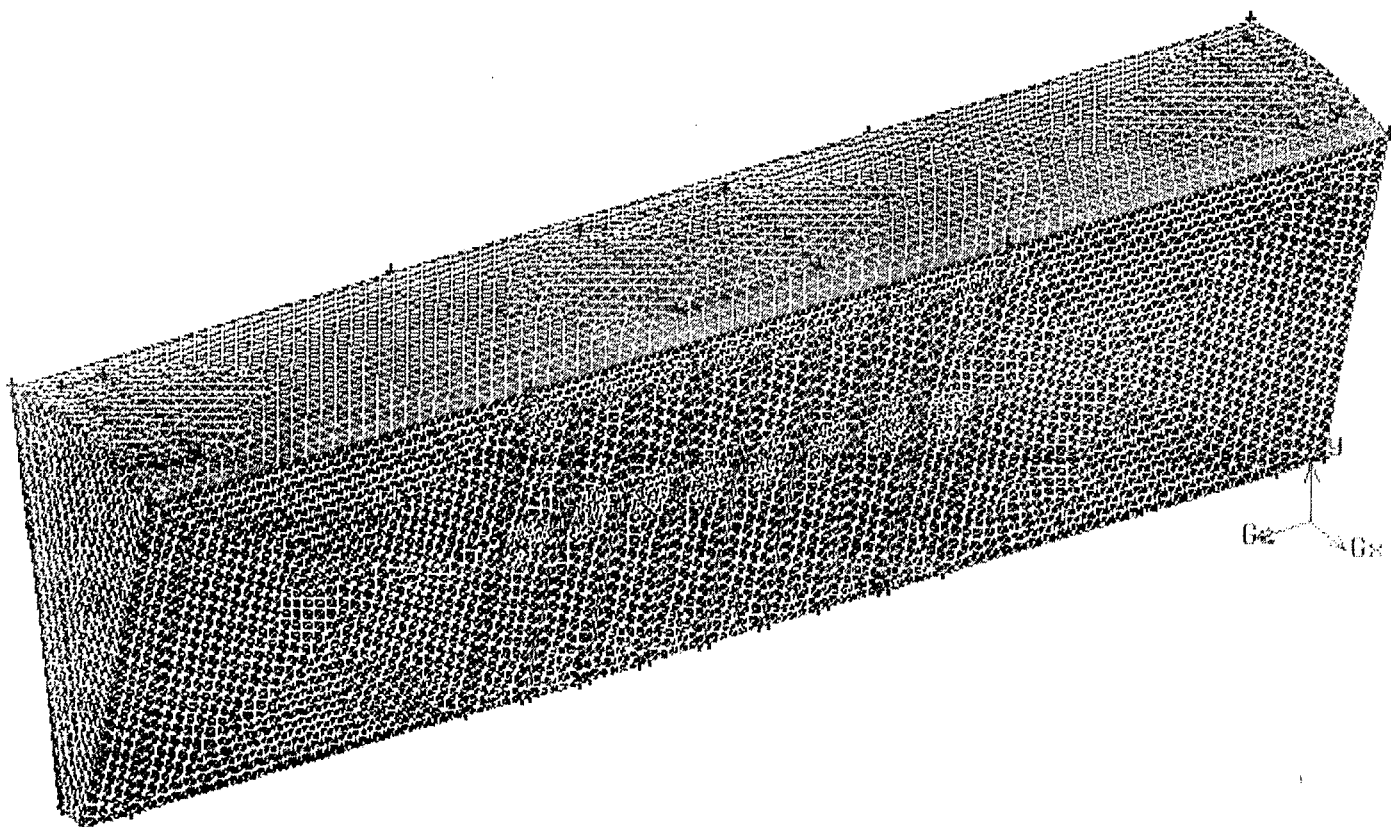
با بررسی های انجام شده بر روی نتایج حاصل از تحلیل مدل اولیه ، به این نتیجه رسیدیم که باید تغییرات زیر را در سیستم خنک کاری اعمال کنیم :

- ورودی هوای از ابتدای الکتروموتور باید به وسط موتور منتقل شود.
- دو خروجی هوا در ابتدا و انتهای الکتروموتور باید در نظر گرفته شود.
- دو فن یکسان باید در قسمت ابتدایی و انتهایی الکتروموتور باید در نظر گرفته شود.
- فاصله موجود بین سطح خارجی استاتور و پوسته باید از دو طرف استاتور دور تا دور بسته شود تا تمامی هوای ورودی به الکتروموتور از لابلای برشهای شعاعی استاتور عبور کند.

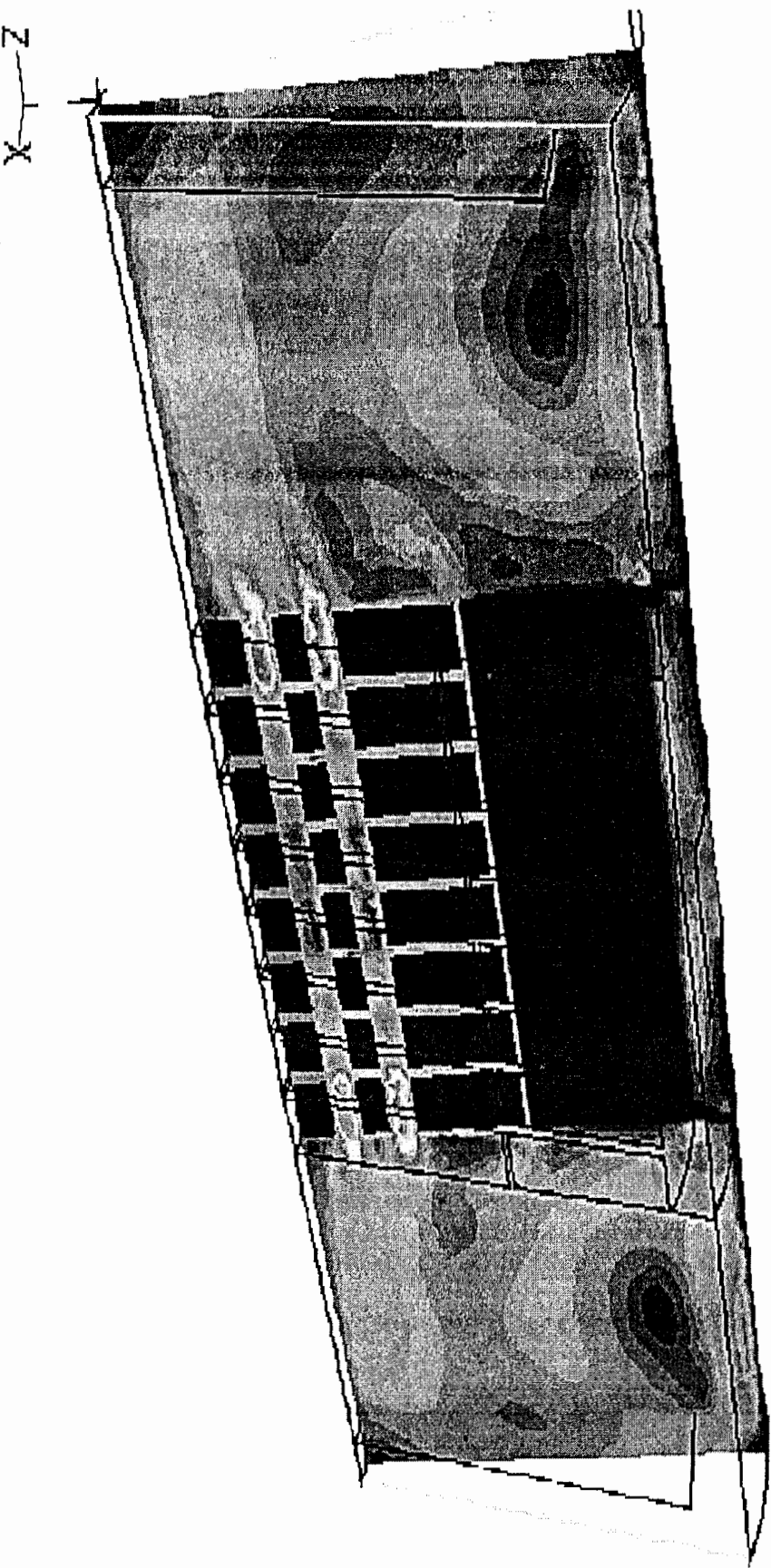
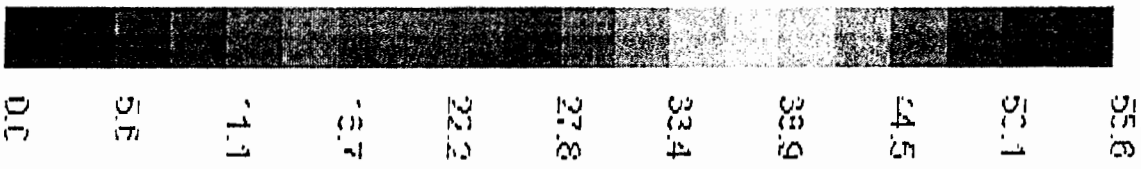
با اعمال تغییرات فوق مدل نهایی به صورت در می آید



شکل ۹- مدل هندسی تصحیح شده



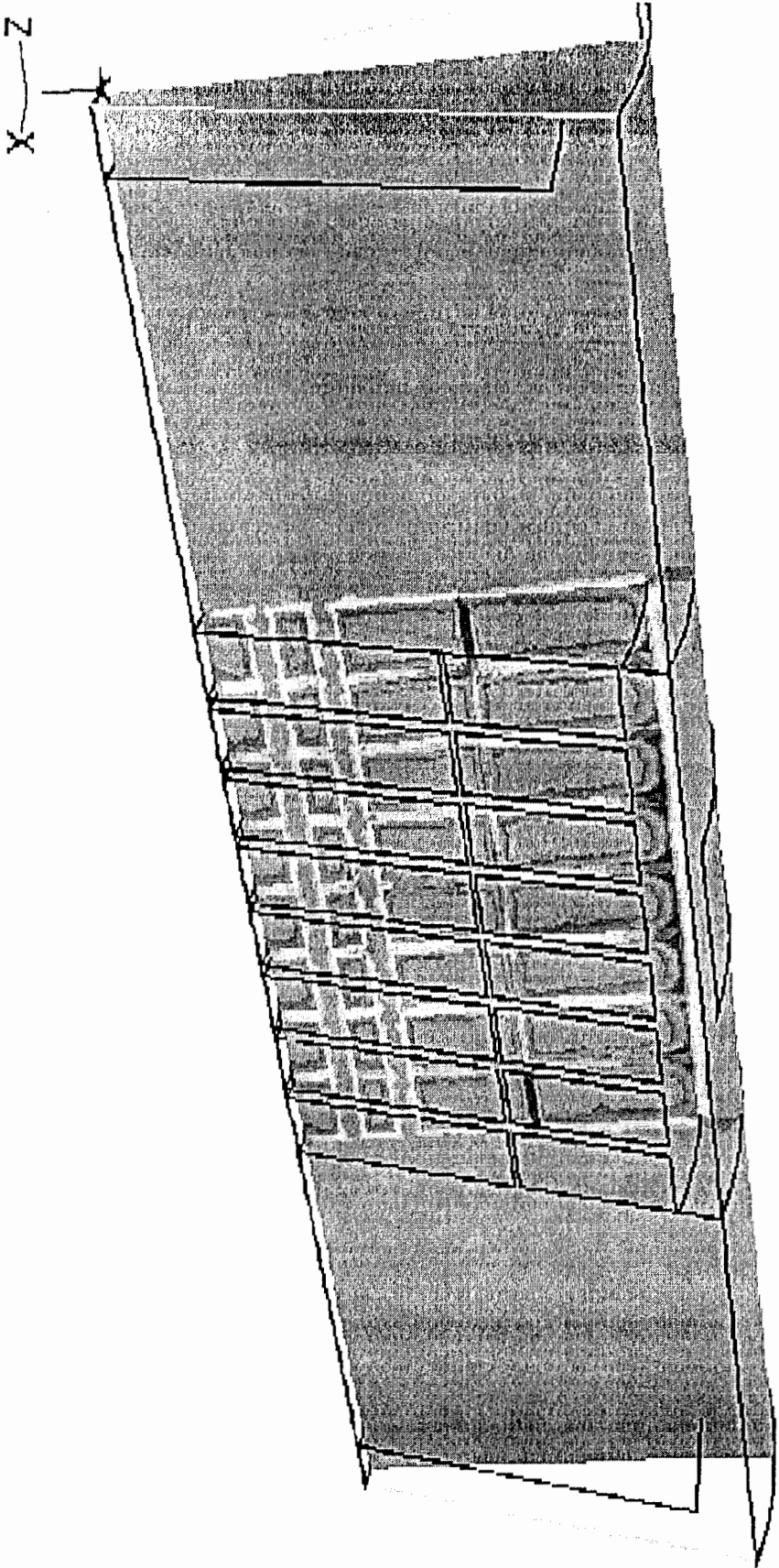
شکل ۱۰- مدل شبکه ای تصحیح شده



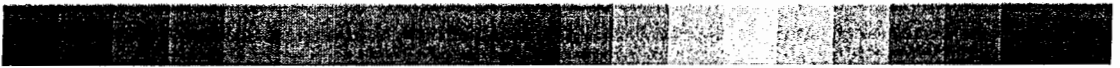
شکل ۱۱- توزیع اندازه سرعت هوا (m/s)



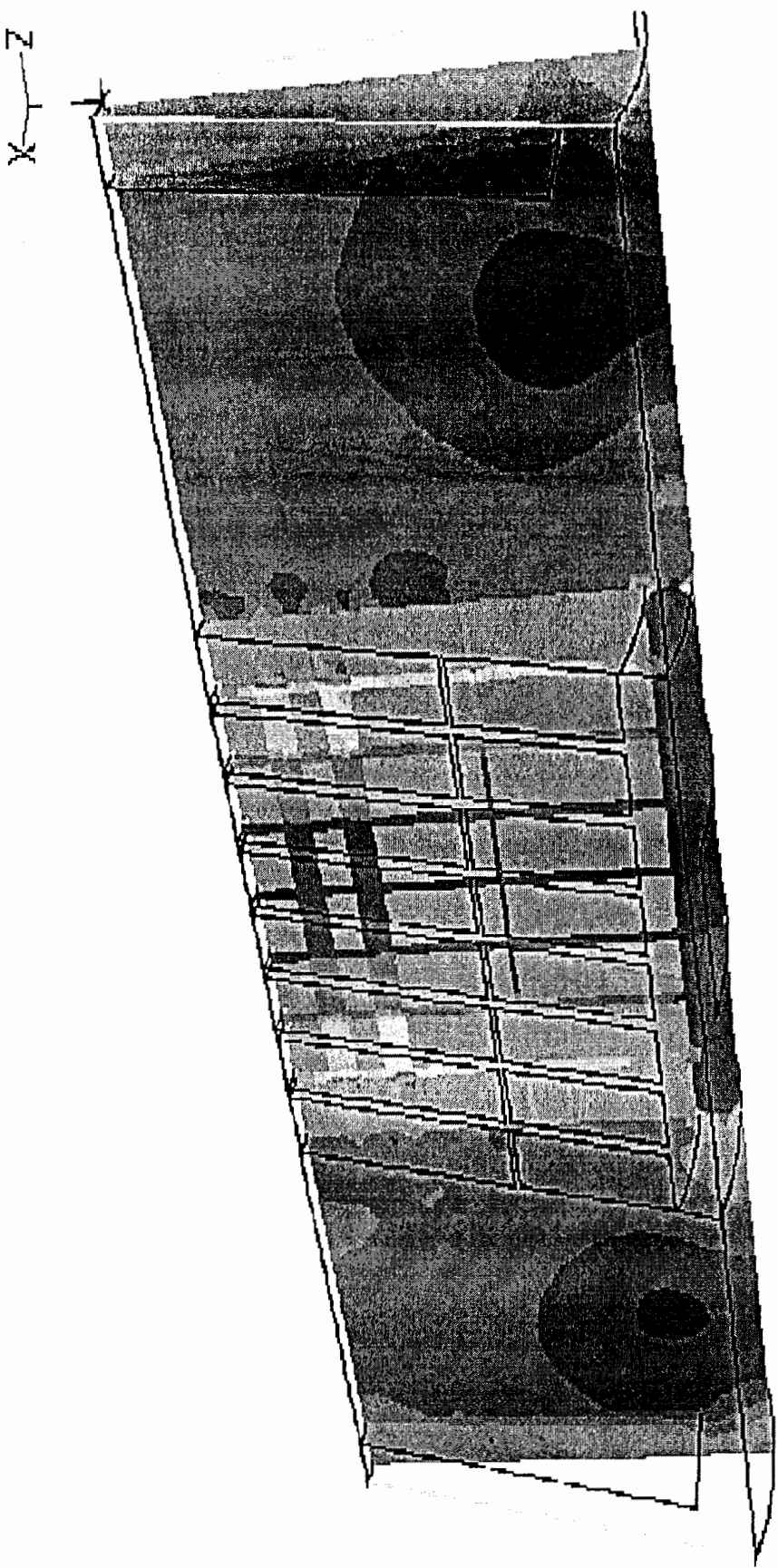
5748.1
4538.2
3248.7
2238.9
1492.2
-0.5
-1150.3
-2300.0
-3449.7
-4539.5
-5749.2



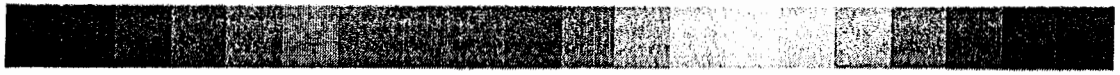
شکل ۱۲- توزیع شار حرارتی



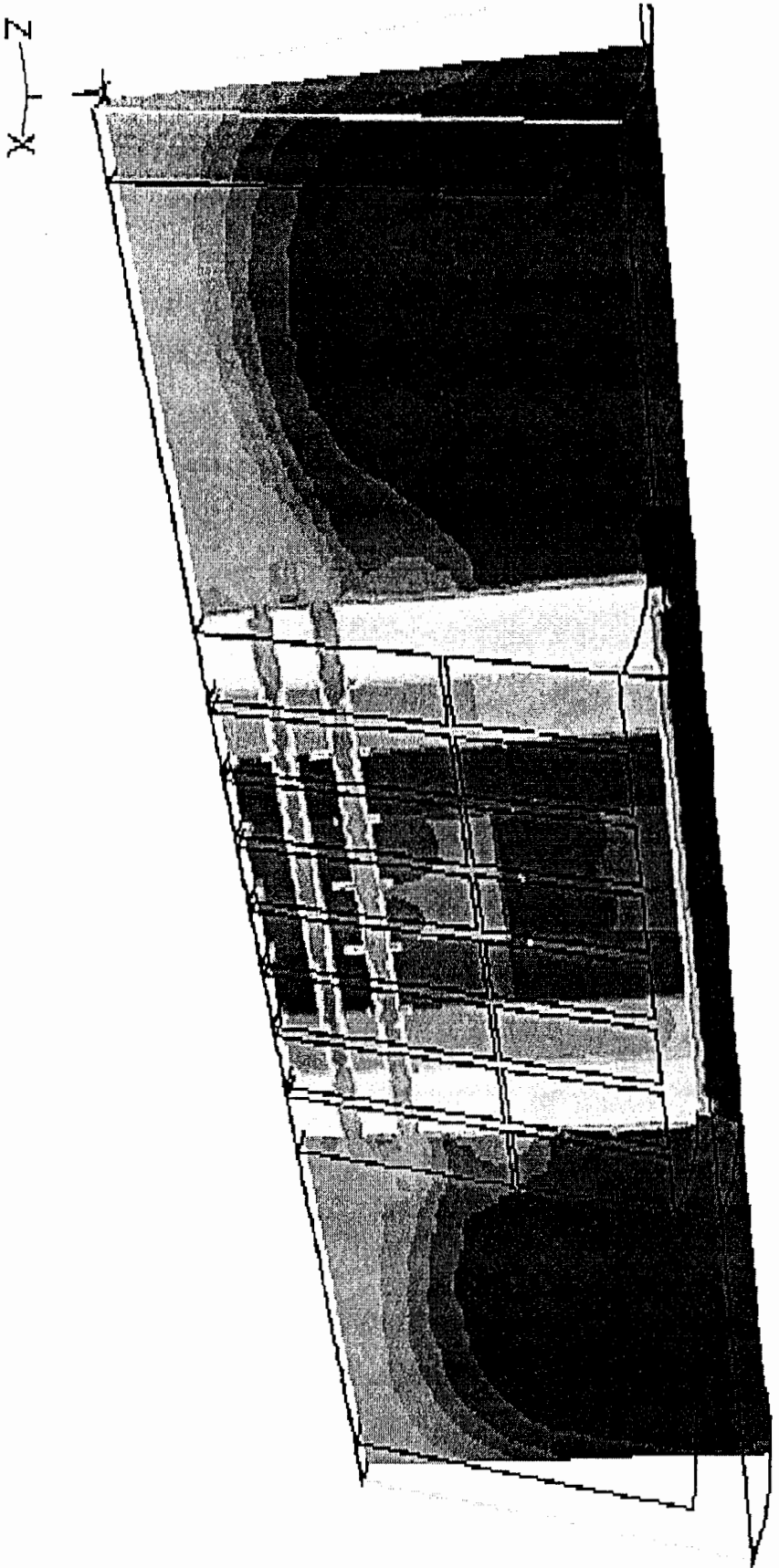
2557.3
2166.1
1762.7
1365.3
967.9
570.5
173.
-224.3
-621.7
-1019.1
-1413.5



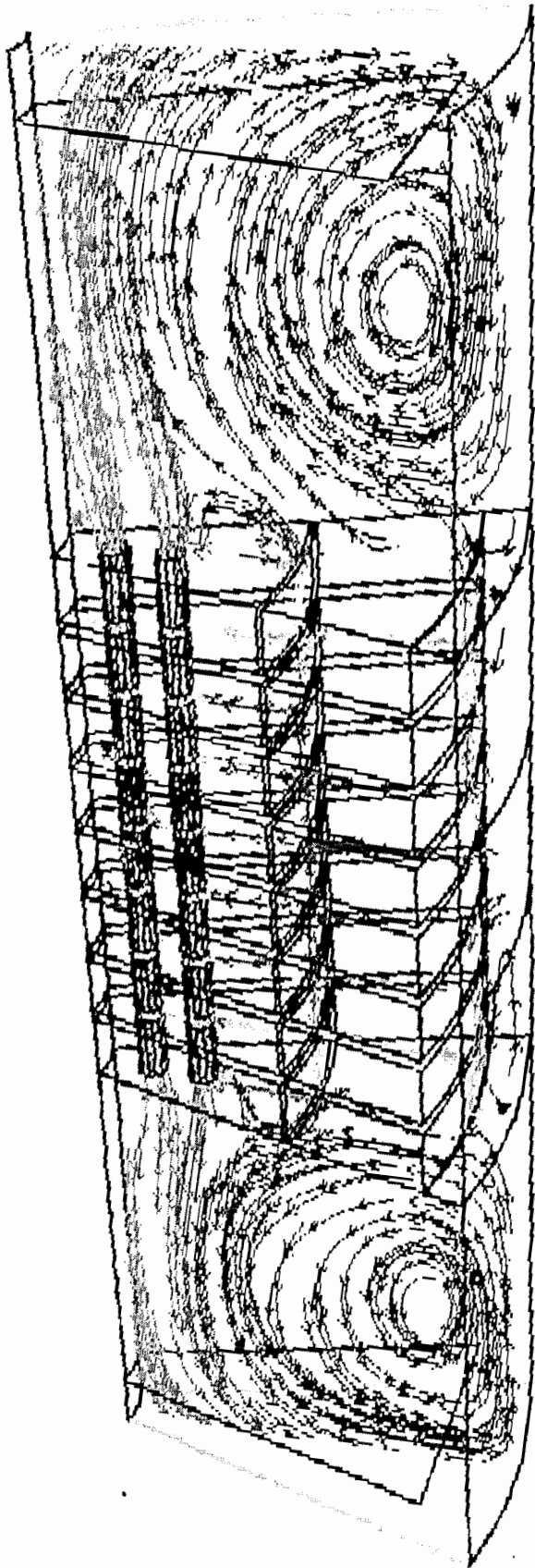
شکل ۱۳- توزیع فشار استاتیکی هوا



352 -
356 5
357 7
346 5
347 3
336 1
330 3
325 6
320 2
315 2
310 1



شکل ۱۴- توزیع دمای هوا بر حسب کلورین



شکل ۱۵- خطوط جریان هوا

فصل پنجم

آشنایی با نرم افزار B-Jac

این نرم افزار محصول شرکت AspenTech میباشد و از جمله قویترین نرم افزارها در زمینه طراحی مبدلهای حرارتی میباشد. این نرم افزار قابلیت طراحی مبدلهایی با انواع سیال خنک کن را دارا میباشد. بخش Aeotran این نرم افزار مختص طراحی مبدلهایی با سیال خنک کن گازی میباشد. Aeotran قابلیت محاسبه تعداد فن (مکنده یا دمنده) مورد نیاز، نوع و تعداد فن مورد نیاز و همچنین ابعاد و تعداد لوله مبدل را دارا میباشد.

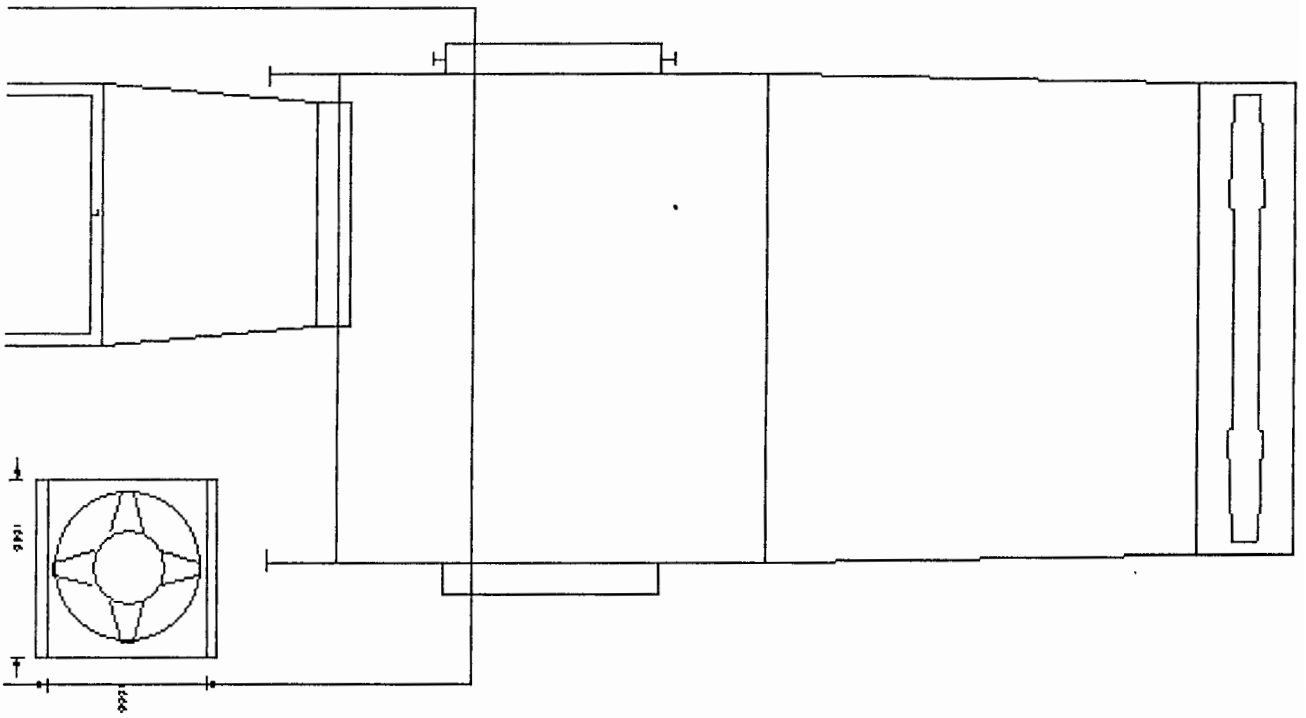
۵-۱ - پارامترهای طراحی مبدل

جهت طراحی مبدل باید مقادیر برخی پارامترها را مشخص کنیم. این مقادیر در زیر آورده شده اند. باید خاطر نشان کنیم که مقادیر ذیل با ضریب اطمینان در بحرانی ترین حالت در نظر گرفته شده اند.

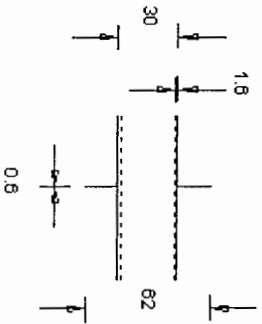
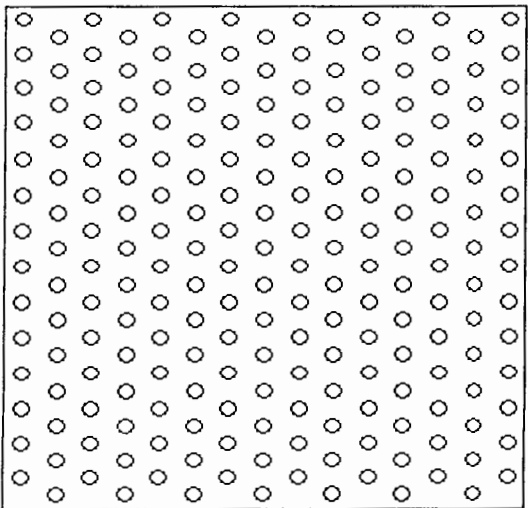
- مقدار دبی هوای مورد نیاز برای خنک ردن الکتروموتور طبق محاسبات انجام شده توسط نرم افزار FLUENT برابر 4 Kg/s در نظر گرفته شده است.
- دمای هوای ورودی به موتور 400C و دمای خروجی هوای موتور با توجه به محاسبات نرم افزار FLUENT 470C بدست آمده است.
- دمای هوای خنک کن مبدل در ورودی 380C و دمای خروجی 420C فرض شده اند.
- حد نهایی طول شبکه لوله های مبدل با توجه به طول موتور 1100 mm در نظر گرفته شده است.
- فن مورد استفاده در مبدل بصورت مکش در نظر گرفته شده است.

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

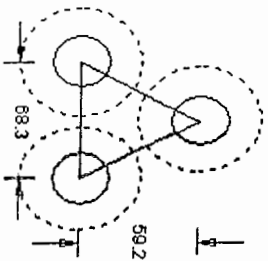
1	Company:						
2	Location:						
3	Service of Unit:			Our Reference:			
4	Item No.:			Your Reference:			
5	Date:	Rev No.:	Job No.:				
6	Size & Type	1762 / 2159.45	Type	Induced	Number of Bays	2	
7	Surf/Unit-Finned Tube	853.55	m2	Bare Tube	79.17	m2	
8	Heat exchanged	40206	W	MTD, Eff	4.28	C	
9	Transfer rate	11	Bare, Service	118.7	Clean	121	W/(m2*K)
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE						
11	Fluid Circulated			In/Out			
12	Total Fluid Entering	kg/s	4	Density, Liq	kg/m3	/	
13			In/Out	Density, Vap	kg/m3	1.09 / 1.12	
14	Temperature	C	50 / 40	Specific Heat, Liq	kJ/(kg*K) /		
15	Liquid	kg/s	/	Specific Heat, Vap	kJ/(kg*K) 1.005 / 1.005		
16	Vapor	kg/s	4 / 4	Therm. Cond, Liq	W/(m*K) /		
17	Noncondensat	kg/s	/	Therm. Cond, Vap	0.028 / 0.027		
18	Steam	kg/s	/	Freeze Point	C		
19	Water	kg/s	/	Bubble / Dew point	/		
20	Molecular wt, Vap	/			Latent heat	kJ/kg	
21	Molecular wt, NC	/			Inlet pressure (absolute)	1.011	bar
22	Viscosity, Liq	mPa*s /			Pres Drop, Allow/Calc	0.404 / 0.206	
23	Viscosity, Vap	0.019 / 0.019			Fouling Resistance	m2*K/W	
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE						
25	Air Quantity, Total	10.0028 kg/s			Altitude	m	
26	Air Quantity/Fan	m3/s			Temperature In	38	C
27	Static Pressure	111.05 mmH2O			Temperature Out	42	C
28	Face Velocity	4.67 m/s	Bundle velocity	10.3 kg/s/m2	Design Ambient	C	
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION						
30	Design pressure	1.44 bar	Test Pressure			Design temperature	83.89 C
31	TUBE BUNDLE		Header		Tube		
32	Size	1762	Type	Plug	Material	Carbon Steel	
33	Number/bay	2	Material	Welded			
34	Tube Rows	15	Passes	3	OD	30 Min Thk.	1.65 mm
35	Arrangement	Mixed or horizontal	Plug Mat.	No./Bun 210 Lng 1 m			
36	Bundles	1 par 2 ser	Gasket Mat.	Pitch 8.35 / 59.19 Staggered			
37	Bays	2 par 1 ser	Corr. Allow.	3.18 mm			Fin
38	Bundle frame	Inlet Nozzle 1 254 mm		Type	Embedded		
39	MISCELLANEOUS	Outlet Nozzle 1 254 mm		Material	Carbon Steel		
40	Struct. Mount.	Special Nozzles			OD	62 Tks	0.58 mm
41	Surf. Prep	Rating			No.	197 #/m	Des Temp C
42	Louvers	TI	PIPIPIPI				Code
43	Vibration Switches	Chem Cleaning			Stamp	Specs	API 661
44	MECHANICAL EQUIPMENT						
45	Fan, Mfr., Model	Driver, Type		Speed Reducer, Type			
46	No./Bay	1	RPM	Mfr.	Mfr. & Model		
47	Dia.	914.4	Blade(s)	4	No./Bay		
48	Pitch	Angle		RPM	Rating		
49	Blade(s)	914.4	Hub	457.2	Enclosure	Ratio	
50	hp/Fan	Min Amb		V/Phase/Hz	Support		
51	Control Action on Air Failure-				Louvers		
52	Degree Control of Outlet Process Temperature						
53	Recirculation				Steam Coil		
54	Plot Area	m2	Drawing No.	Wt. Bundle	3671.4	Wt. Bay	8553 kg
55	Notes:						
56							
57							
58							



- 15 14
- 14 14
- 13 14
- 12 14
- 11 14
- 10 14
- 9 14
- 8 14
- 7 14
- 6 14
- 5 14
- 4 14
- 3 14
- 2 14
- 1 210



70
70
70



بحث و نتیجه گیری

نتایج بدست آمده نشان می دهد که دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ابزار قدرتمندی در تجزیه تحلیل انتقال حرارت در داخل موتور می باشد. نتیج حاصل از آن کمک شایان توجهی در بهبود سیستم خنک کاری (Cooling System) موتورهای الکتریکی می نماید. نتایج خروجی حاصل از تحلیل عددی به ما امکان طراحی مناسب مبدل حرارتی بسته برای موتور را خواهد داد. اطمینان از نتیج عددی به گونه ای دغدغه های طراح را در مورد طراحی مبدل بسته رفع می کند که با خاطر جمع و با خطای بسیار اندکی دمای تمامی نقاط داخل موتور را پیش بینی کند. به عنوان مثال در طراحی اولیه سیستم خنک کاری مورد نظر، ورودی هوا از یک طرف و خروجی آن از انتهای دیگر (روش متداول در اکثر موتورهای الکتریکی کوچک و متوسط) در نظر گرفته شده بود. اما نتیجه محاسبات عددی حاکی از بالا بودن دما در بعضی نقاط نزدیک به انتهای موتور بود. البته دما در انتهای موتور بدلیل جریان های برگشتی و گردابه ای اندکی پایین می آمد ولی در نزدیکی های خروج، دمای بعضی از قسمتها بسیار بالا می رفت و این امر منجر به بازنگری طراحی سیستم خنک کاری و در نهایت انتخاب سیستم صلیبی (ورود هوا از وسط و خروج آن از دو انتها) گردید. با این

روش همان طور که در شکل ۱۲ مشخص شده است، دمای هیچ نقطه از مقادیر مجاز بالا نرفته و می توان از سیستم با اطمینان استفاده کرد.

طراحی مبدل با نرم افزار بسیار نیرومند B-JAC که محصول شرکت Aspen Tech می باشد، طراحی مبدل را با دقت و حساسیت خوبی امکان پذیر ساخته است.

نهایتا کارهای انجام شده، راه گشای صنعت جدیدی می باشد که استفاده واقعی فرآورده های علمی دانشگاه را در صنعت مقذور ساخته است.

منابع

۱. ماشینهای الکتریکی، تئوری عملکرد و کاربردها
تالیف : پروفسور بیم بهارا
ترجمه : دکتر سلطانی، دکتر لسانی
انتشارات : قائم ۱۳۸۱
۲. ماشینهای الکتریکی، ویرایش پنجم
تالیف : فیتز جرالد، کینلسکی ، اومنس
انتشارات : مشهد، نیما ، سال ۱۳۸۱
3. FLUENT User Guide, Vol. 1.2 , 2001, Fluent Inc.
4. BJAC Manual, Aspen Technology Inc.
5. Control of electronic machine ventilation using artificial intelligence, PHD. thesis , Radek Vlach, Czech 2002.
6. E. Serre, P. Bontoux & R. Kotarba, "Numerical Simulation of the Transition in *Three-Dimensional Rotating Flows with Walls: Boundary Layers Instability*", International Journal of Fluid Dynamics (2001) Vol 5
7. Barbara Watel, Souad Harmand, Bernard Desmet, "*Influence of fin spacing and rotational speed on the convective heat exchanges from a rotating finned tube*", International Journal of Heat and Fluid Flow 21 (2000)
8. Edson J. Soares, M^oonica F. Naccache, Paulo R. Souza Mendes, "*Heat transfer to viscoplastic materials flowing axially through concentric annuli*", International Journal of Heat and Fluid Flow 24 (2003)
9. Abrahamson, S., Eaton, J., Koga, D., 1989. "*The flow between shrouded corotating disks*". Phys. Fluids A 1, 241-251.
10. R.E. Mayle, S.Hess, C.Hirsch, J.von Wolfersdorf, "*Rotor-Stator gap flow analysis and experiments*", IEEE Transsaction on Energy Conversion, Vol 13, No.2, June 1998.

پیوست (۱) :

Summary Report

Version: 3d, segregated, rngke (3d, segregated, RNG k-epsilon)

Release: 6.0.12

Title :

Models

Model	Settings
Space	3D
Time	Steady
Viscous	RNG k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
RNG Differential Viscosity Model	Disabled
RNG Swirl Dominated Flow Option	Enabled
Heat Transfer	Enabled
Solidification and Melting	Disabled
Radiation	None
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

Zones

name	id	type
------	----	------

stator.1	2	solid
rotor.1	3	solid
flow.1	4	fluid
rotor_w-shadow	52	wall
stator_w-shadow	51	wall
f_periodic	6	periodic
periodic.18	8	periodic
periodic.19	10	periodic
periodic.20	12	periodic
periodic.21	14	periodic
periodic.22	16	periodic
periodic.23	18	periodic
periodic.24	20	periodic
periodic.25	22	periodic
periodic.26	24	periodic
periodic.27	26	periodic
periodic.28	28	periodic
periodic.29	30	periodic
periodic.30	32	periodic
periodic.31	34	periodic
periodic.32	36	periodic
periodic.33	38	periodic
motor_out	39	outflow
motor_in	40	mass-flow-inlet
shell_w	41	wall
stator_w	42	wall
rotor_w	43	wall
shaft_w	44	wall
side_w	45	wall
fan.1	46	fan
default-interior	48	interior
shaft_w:001	1	wall
default-interior:047	47	interior

default-interior:049 49 interior

Boundary Conditions

stator.1

Condition	Value
Material Name	copper
Specify source terms?	yes
Source Terms	((energy (constant . 160000) (profile ((
Specify fixed values?	no
Fixed Values	((temperature (inactive . #f) (constant . 0) (profile (((
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1

rotor.1

Condition	Value
Material Name	copper
Specify source terms?	yes
Source Terms	((energy (constant . 160000) (profile (((
Specify fixed values?	no
Fixed Values	((temperature (inactive . #f) (constant . 0) (profile (((

Motion Type 0
 X-Velocity Of Zone 0
 Y-Velocity Of Zone 0
 Z-Velocity Of Zone 0
 Rotation speed 0
 X-Origin of Rotation-Axis 0
 Y-Origin of Rotation-Axis 0
 Z-Origin of Rotation-Axis 0
 X-Component of Rotation-Axis 0
 Y-Component of Rotation-Axis 0
 Z-Component of Rotation-Axis 1

flow.1

Condition	Value
-----------	-------

Material Name	air
---------------	-----

Specify source terms?	no
-----------------------	----

Source Terms	((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) ((
--------------	---

Specify fixed values?	no
-----------------------	----

Local Coordinate System for Fixed Velocities no

Fixed Values ((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile))
(y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0)
(profile)) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0)
(profile
Motion Type 0

X-Velocity Of Zone 0

Y-Velocity Of Zone 0

Z-Velocity Of Zone 0

Rotation speed 0

X-Origin of Rotation-Axis 0

Y-Origin of Rotation-Axis 0

Z-Origin of Rotation-Axis 0

X-Component of Rotation-Axis 0

Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0

X-Coordinate of Point on Cone Axis	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0
Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0
Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0

C1 Coefficient for Power-Law 0

Porosity 1

Solid Material Name aluminum

rotor_w-shadow

Condition	Value
-----------	-------

Wall Thickness	0
----------------	---

Heat Generation Rate	0
----------------------	---

Material Name	copper
---------------	--------

Thermal BC Type	3
-----------------	---

Temperature	300
-------------	-----

Heat Flux	0
-----------	---

Convective Heat Transfer Coefficient	0
--------------------------------------	---

Free Stream Temperature	300
-------------------------	-----

Enable shell conduction?	no
--------------------------	----

Wall Motion	1
-------------	---

Shear Boundary Condition	0
--------------------------	---

Define wall motion relative to adjacent cell zone?	no
--	----

Apply a rotational velocity to this wall?	yes
---	-----

Velocity Magnitude	0
--------------------	---

X-Component of Wall Translation	1
---------------------------------	---

Y-Component of Wall Translation	0
---------------------------------	---

Z-Component of Wall Translation	0
---------------------------------	---

Define wall velocity components?	no
----------------------------------	----

X-Component of Wall Translation	0
---------------------------------	---

Y-Component of Wall Translation	0
---------------------------------	---

Z-Component of Wall Translation	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature	300
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	100
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Surface tension gradient	0

stator_w-shadow

Condition	Value
Wall Thickness	0
Heat Generation Rate	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	3
Temperature	300
Heat Flux	0
Convective Heat Transfer Coefficient	0
Free Stream Temperature	300
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no

Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature	300
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Surface tension gradient	0

f_periodic

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic?	yes
------------------------	-----

periodic.18

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic? yes

periodic.19

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic? yes

periodic.20

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic? yes

periodic.21

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic? yes

periodic.22

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic? yes

periodic.23

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic? yes

periodic.24

Condition Value

Rotationally Periodic? yes

periodic.25

Condition Value

Rotationally Periodic? yes

periodic.26

Condition Value

Rotationally Periodic? yes

periodic.27

Condition Value

Rotationally Periodic? yes

periodic.28

Condition Value

Rotationally Periodic? yes

periodic.29

Condition Value

Rotationally Periodic? yes

periodic.30

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic?	yes
------------------------	-----

periodic.31

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic?	yes
------------------------	-----

periodic.32

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic?	yes
------------------------	-----

periodic.33

Condition	Value
-----------	-------

Rotationally Periodic?	yes
------------------------	-----

motor_out

Condition	Value
-----------	-------

Flow rate weighting	1
---------------------	---

motor_in

Condition	Value
-----------	-------

Mass Flow Specification Method	0
Mass Flow-Rate	0.30000001
Mass Flux	1
Average Mass Flux	1
Upstream Torque Integral	1
Total Temperature	310
Supersonic/Initial Gauge Pressure	0
Direction Specification Method	1
Coordinate System	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Turbulence Specification Method	3
Turb. Kinetic Energy	1
Turb. Dissipation Rate	1
Turbulence Intensity	0.099999994
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	1
Turbulent Viscosity Ratio	10

shell_w

Condition	Value
Wall Thickness	0
Heat Generation Rate	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	1

Temperature	300	
Heat Flux	0	
Convective Heat Transfer Coefficient	0	
Free Stream Temperature	300	
Enable shell conduction?	no	
Wall Motion	0	
Shear Boundary Condition	0	
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes	
Apply a rotational velocity to this wall?	no	
Velocity Magnitude	0	
X-Component of Wall Translation	1	
Y-Component of Wall Translation	0	
Z-Component of Wall Translation	0	
Define wall velocity components?	no	
X-Component of Wall Translation	0	
Y-Component of Wall Translation	0	
Z-Component of Wall Translation	0	
External Emissivity	1	
External Radiation Temperature	300	
Wall Roughness Height	0	
Wall Roughness Constant	0.5	
Rotation Speed	0	
X-Position of Rotation-Axis Origin	0	
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0	
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0	
X-Component of Rotation-Axis Direction	0	
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0	
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1	
X-component of shear stress	0	
Y-component of shear stress	0	
Z-component of shear stress	0	
Surface tension gradient	0	

stator_w

Condition	Value
Wall Thickness	0
Heat Generation Rate	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	3
Temperature	300
Heat Flux	0
Convective Heat Transfer Coefficient	0
Free Stream Temperature	300
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature	300
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0

Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Surface tension gradient	0

rotor_w

Condition	Value
Wall Thickness	0
Heat Generation Rate	0
Material Name	copper
Thermal BC Type	3
Temperature	300
Heat Flux	0
Convective Heat Transfer Coefficient	0
Free Stream Temperature	300
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature	300
Wall Roughness Height	0

Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Surface tension gradient	0

shaft_w

Condition	Value
Wall Thickness	0
Heat Generation Rate	0
Material Name	steel
Thermal BC Type	1
Temperature	300
Heat Flux	0
Convective Heat Transfer Coefficient	0
Free Stream Temperature	300
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0

Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature	300
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Surface tension gradient	0

side_w

Condition	Value
Wall Thickness	0
Heat Generation Rate	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	1
Temperature	300
Heat Flux	0
Convective Heat Transfer Coefficient	0
Free Stream Temperature	300
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0

Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature	300
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Surface tension gradient	0

fan.1

Condition	Value
Flow Direction (-1,0,1)	1
Calculate Pressure-Jump from Average Conditions?	no
Pressure-Jump	((polynomial normal-velocity 0 ((

Limit Polynomial Velocity Range?	no	
Polynomial Range: Minimum Velocity Magnitude		0
Polynomial Range: Maximum Velocity Magnitude		1e+10
Profile Specification of Pressure-Jump?	yes	
Pressure Jump Profile	10000	
Swirl-Velocity Specification?	no	
Radial-Velocity Polynomial Coefficient		()
Tangential-Velocity Polynomial Coefficient		()
Fan Hub Radius	1e-06	
X-Coordinate of Fan Origin	0	
Y-Coordinate of Fan Origin	0	
Z-Coordinate of Fan Origin	0	
X-Component of Fan Axis	1	
Y-Component of Fan Axis	0	
Z-Component of Fan Axis	0	
Profile Specification of Tangential Velocity?	no	
Tangential Velocity Profile	0	
Profile Specification of Radial Velocity?	no	
Radial Velocity Profile	0	

default-interior

Condition	Value
-----------	-------

shaft_w:001

Condition	Value
Wall Thickness	0
Heat Generation Rate	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	1
Temperature	300

Heat Flux	0
Convective Heat Transfer Coefficient	0
Free Stream Temperature	300
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature	300
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Surface tension gradient	0

default-interior:047

Condition Value

default-interior:049

Condition Value

Solver Controls

Equations

Equation Solved

Flow yes

Turbulence yes

Energy yes

Numerics

Numeric Enabled

Absolute Velocity Formulation yes

Relaxation

Variable Relaxation Factor

Pressure 0.30000001

Density 1

Body Forces 1

Momentum 0.5

Turbulence Kinetic Energy 0.69999999

Turbulence Dissipation Rate 0.69999999
 Turbulent Viscosity 1
 Energy 1

Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance	
Pressure	V-Cycle	0.1		
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7	
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7	
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7	
Turbulence Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7	
Turbulence Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7	
Energy	Flexible	0.1	0.7	

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	Standard
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLE
Momentum	First Order Upwind
Turbulence Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	First Order Upwind
Energy	First Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000

Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

Material Properties

Material: steel (solid(

Property	Units	Method	Value(s (
----------	-------	--------	-----------

Density	kg/m3	constant	8030
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	502.48
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	16.27

Material: copper (solid(

Property	Units	Method	Value(s (
----------	-------	--------	-----------

Density	kg/m3	constant	8978
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	381
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	387.6

Material: aluminum (solid(

Property	Units	Method	Value(s (
----------	-------	--------	-----------

Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4

Material: air (fluid(

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m ³	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	1006.43
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	K	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/K	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

پیوست (۲):

تصاویری از الکتروموتور و مبدل حرارتی ساخته شده توسط شرکت توربوژنراتور شاهرود

