

مدلسازی حرارتی و بهبود انتقال حرارت در موتورهای SR

حسین روحانی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

جواد فیض

استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

کارو لوکس

استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۴/۴/۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۱۲/۱۹، تاریخ تصویب ۸۵/۳/۲۰)

چکیده

موتورهای سویچ رلوکتانسی توجه بسیاری را به دلیل خواص منحصر بفردشان به خود جلب کرده اند. حرارت تولید شده توسط اتلافات موجب کاهش عمر و کارایی موتور می شود. بنابراین طراحی بهینه بر مبنای مدلسازی حرارتی به بهبود عملکرد و افزایش عمر ماشین کمک می کند. در ای مقاله ابتدا یک مدل حرارتی فشرده از موتورهای سویچ رلوکتانسی بر مبنای مدار معادل مقاومتهای حرارتی هدایتی و جابجایی بدست آمده است. این مدل در طراحی بهینه پارامتری ابعاد موتور مورد استفاده قرار گرفته است. از طرف دیگر استفاده از فنها و دمنده ها در موتور موجب بروز مشکلات تکنیکی و اقتصادی می شود. بنابراین یک طرح ابداعی پیشنهاد شده است که در آن روتور خودش به عنوان فن داخلی عمل کرده و موجب خنک شدن موتور می شود. مقادیر تقریبی بهینه برای این طرح بدست آمده اند.

واژه های کلیدی: موتور سویچ رلوکتانسی، مدل سازی حرارتی، طراحی بهینه، هواکش محوری، مقاومت معادل حرارتی

مقدمه

الکتريکی و طراحی بهینه حرارتی آنها به انجام رسیده است. بدین منظور از روشهای حل عددی نظیر روش اجزا محدود و نیز روشهای تحلیلی استفاده شده است. در مراجع [۲،۴]، تلفات هسته و مسی در موتور SR محاسبه شده اند. توزیع میدان حرارتی در مرجع [۱] مورد بررسی قرار گرفته است. در مراجع [۶،۵] یک مدل تحلیلی براساس مدار معادل حرارتی موتورهای الکتريکی بدست آمده است. در [۷] این مدل برای موتورهای SR و به منظور تحلیل رفتار گذرای حرارتی آنها بسط داده شده است. اخیراً تحلیل حرارتی و طراحی بهینه موتورهای SR به روش اجزا محدود انجام شده است [۹،۸].

مدل فشرده حرارتی از موتورهای SR شامل مدار آنالوگ از مقاومتهای، خازنهای حرارتی و منابع حرارت می باشد. در این مدلها کل ساختار مکانیکی ماشین به اجزای متعدد تقسیم می شود. مدل حرارتی فرعی برای هر یک از این اجزا بدست می آید و با اتصال این مدلها فرعی، یک مدل کلی برای موتور الکتريکی بدست می آید. دمای هر

اتلافات حرارتی در ماشینهای الکتريکی باعث تولید حرارت و افزایش دما در اجزا مختلف آنها می شود و این عوامل باعث کاهش عمر ماشین و گاهی از کارافتادگی آن می گردد. افزایش دما در ماشین می تواند باعث صدمه دیدن عایق سیم پیچ شود [۱] که این به نوبه خود موجب بروز تنشهای حرارتی غیرمجاز، نویز صوتی، کاهش بازده و حتی تغییر تئورانسهای مجاز می شود. از طرفی کاهش مقاومت حرارتی موتور موجب کاهش دما و انتقال حرارت بهتر در موتور می گردد [۲].

مدلسازی حرارتی موتور نقش مهمی در طراحی بهینه ایفا می کند. روشهای خنک کاری ماشین از جمله استفاده از هواکش و دمنده می تواند باعث خنک کردن اجزای مختلف ماشین و افزایش عمر آن شود. اما در بسیاری از ماشینها فضای کافی برای تعبیه هواکش وجود ندارد. به علاوه اضافه کردن سیستم تهویه می تواند تا ۶۰٪ قیمت ماشین را افزایش دهد [۳].

تلاشهای بسیاری برای مدلسازی حرارتی موتورهای

در این صورت ۸۴٪ تلفات در یوگ استاتور، ۸٪ در دندانه‌های استاتور، ۳٫۳٪ در دندانه‌های روتور و ۴٫۷٪ در هسته روتور خواهد بود.

۳- تلفات اصطکاکی: این تلفات نتیجه حرکت نسبی روتور نسبت به استاتور و نیز جریان هوا روی روتور بخاطر چرخش آن است. رابطه تجربی برای محاسبه این تلفات به صورت زیر است [۷]:

$$a = (rpm) + b(rpm)^2$$

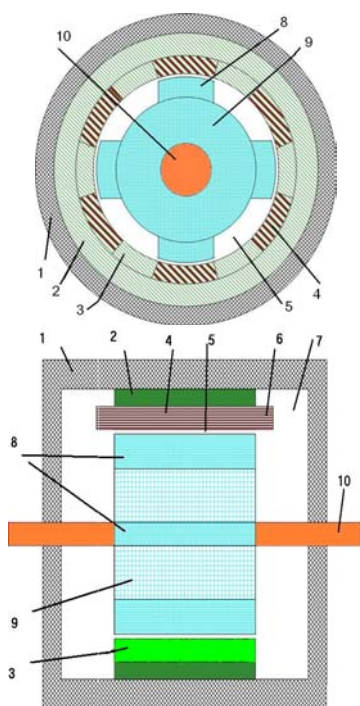
$$P_{fric} = arpm + brpm^2 \quad a = 0.0118 \quad b = 0.0000143$$

(۴)

این تلفات باید بصورت منابع گرما بین قسمت‌های مختلف موتور پخش شود.

مقاومت‌های حرارتی قسمت‌های مختلف موتور

ساختار موتور را می‌توان به ده قسمت کوچکتر شامل: ۱- بدنه ۲- طوقه استاتور ۳- دندانه‌های استاتور ۴- سیم پیچ‌ها ۵- فاصله هوایی ۶- سیم پیچ‌های انتهایی ۷- هوای درون موتور ۸- دندانه‌های روتور ۹- هسته روتور ۱۰- میله محوری، تقسیم کرد.



شکل ۱: نمایی از اجزای مختلف موتور SR.

مقاومت حرارتی استوانه‌های توخالی

انتقال حرارت هدایتی در استوانه‌های توخالی شامل

یک از اجزای موتور توسط حل دستگاه معادلات دیفرانسیل مدار معادل حرارتی کل موتور بدست می‌آید. در این تحقیق در نهایت یک تغییر ساختاری در هندسه موتور بنحوی ایجاد می‌شود که طی آن روتور خود به صورت یک هواکش محوری عمل کند که باعث کاهش افزایش دما در اجزای داخلی موتور از طریق به جریان انداختن هوا از میان روتور و استاتور می‌گردد. در اثر این تغییرات هندسی در موتور، جریان محوری هوا در فاصله هوایی برقرار می‌شود. دمای اجزای موتور با حل تحلیلی تقریبی هواکش محوری بدست می‌آید. این تغییرات منجر به طراحی مطلوبتر موتورهای SR خواهد شد.

محاسبه اتلاف حرارتی در موتور SR

اتلافات حرارتی در موتور SR را به سه دسته می‌توان تقسیم کرد:

۱- تلفات مسی: عبور جریان از سیم پیچ‌های استاتور باعث تولید حرارت و افزایش دما در آن می‌گردد. اگر شکل موج جریان در هر فاز استاتور به صورت مستطیلی فرض شود، اتلافات حرارتی در سیم پیچ به صورت زیر قابل محاسبه است [۷]:

$$P_{cu} = \sum_{p=1}^m R_p \bar{I}_p^2, \quad \bar{I}_p = \frac{I_p}{\sqrt{m}}$$

(۱)

برای جریان معادل در m فاز رابطه فوق می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود (با صرفنظر کردن از اثرات همپوشانی و جریان غیرمستطیلی)

$$P_{cu} = R_p I_p^2$$

(۲)

۲- تلفات هسته: مدار مغناطیسی بسیار پیچیده موتور SR محاسبه تحلیلی تلفات هسته را بسیار مشکل می‌کند. این تلفات بستگی به شکل موج جریان، زاویه، مدت زمان کلید زنی و عملکرد درایو دارد. رابطه نیمه تجربی برای تلفات هسته موتور SR به صورت زیر است [۲].

$$P_{core} = af^b \left(\frac{V}{f}\right)^c$$

(۳)

برای موتورهای 6/4 به توان 4kW ضرایب a, b و c به صورت زیرند:

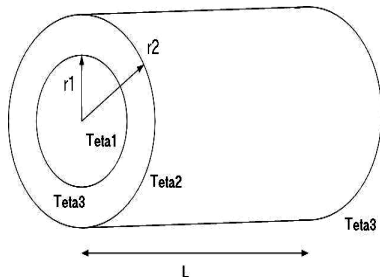
$$a = 0.01477 \quad b = 1.328 \quad c = 1.726$$

گردند [۷]. از روابط (۶-۹) در محاسبه مقاومتهای حرارتی رسانایی (R2~R15, R28~R37) در اجزای فلزی استوانه ای استفاده شده است.

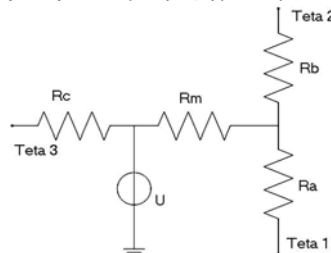
در مقاله حاضر موتور SR به دو صورت بررسی می‌شود. حالت اول وقتی که سطوح جانبی بدنه پوشیده است و هوا نمی‌تواند از میان آن عبور کند و در این صورت در پوشها به صورت صفحات حلقوی ضخیم مدلسازی می‌شوند و در حالت دوم سطوح جانبی پوشیده نیست و هوا می‌تواند با اجزای داخلی موتور در تماس باشد. در این صورت فرض می‌شود که بدنه و یاتاقانها با تیغه‌هایی به هم مربوط شده‌اند که این تیغه‌ها به صورت پره (Fin) مدل می‌شوند. در پره های مستطیلی با طول محدود انتقال حرارت از معادله دیفرانسیل زیر محاسبه می‌شود [۱].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{hP}{kA_c}(T - T_\infty) = 0 \quad (10)$$

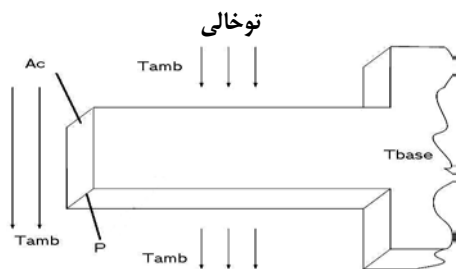
که در آن P محیط سطح مقطع عرضی پره و A_c مساحت آن است. شرایط مرزی به صورت انتقال حرارت جابجایی در طرفین و انتقال حرارت هدایتی در دو انتها در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۲: شرایط مرزی در اطراف استوانه توخالی.



شکل ۳: مقاومتهای معادل حرارتی هدایتی برای استوانه.



شکل ۴: پره مستطیلی در محیط.

منبع حرارت با شرایط مرزی متقارن به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} (k \frac{\partial T}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

که در آن \dot{q} حرارت تولید شده در واحد حجم است. با حل معادله دیفرانسیل فوق با شرایط مرزی مطابق شکل (۲) در حالت ماندگار مدار معادل حرارتی استوانه به صورت زیر قابل تبیین است:

$$R_a = \frac{1}{2\pi k_r L} \left(\frac{2r_2^2 \ln(r_2/r_1)}{r_2^2 - r_1^2} - 1 \right) \quad (6)$$

$$R_b = \frac{1}{2\pi k_r L} \left(1 - \frac{2r_1^2 \ln(r_2/r_1)}{r_2^2 - r_1^2} \right) \quad (7)$$

$$R_c = \frac{L}{6\pi k_a (r_2^2 - r_1^2)} \quad (8)$$

$$R_m = \frac{1}{4\pi (r_2^2 - r_1^2) k_r L} \left((r_2^2 + r_1^2) - \frac{4r_1^2 r_2^2 \ln(r_2/r_1)}{r_2^2 - r_1^2} \right) \quad (9)$$

که در آن k_r و k_a ضرایب انتقال حرارت هدایتی در جهات محوری و شعاعی هستند که در اینجا مقدار یکسانی دارند. از میان اجزای مختلف ماشین بدنه، طوقه استاتور و هسته روتور به صورت استوانه توخالی و دندانه روتور، دندانه استاتور و سیم پیچ‌ها به صورت کمان استوانه‌ای توخالی در نظر گرفته می‌شوند که در آنها مقاومت حرارتی معادل متناسب با طول کمان خواهد بود. فرض اخیر تنها در صورتی معتبر است که گرادیان دما در جهت محیطی استوانه‌ها در مقایسه با گرادیان دما در جهت محوری و شعاعی قابل چشم پوشی باشد. تحقیق‌های قبلی چنین فرضی را ممکن می‌دانند [۷]. میله محوری را می‌توان به صورت یک میله با انتقال حرارت یک بعدی در نظر گرفت. در نهایت شیارهای استاتور را پر شده با سیم پیچ می‌توان فرض کرد. سیم پیچ‌های شماره ۴ و ۶ را به ترتیب به صورت کمان استوانه‌ای توخالی و صفحه حلقوی ضخیم می‌توان در نظر گرفت. باید توجه داشت که در اجزای ورقه‌ای مانند روتور، استاتور و سیم پیچ بهتر است که مقاومت‌های حرارتی در جهت مورد نظر به ضریب تصحیح $S=0.906$ تقسیم

$$\begin{cases} Nu_D = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.333} & , Re_D < 500000 \\ Nu_D = (0.037 Re^{0.8} - 871) Pr^{0.333} & , Re_D \geq 500000 \end{cases} \quad (17)$$

در هر دو حالت جابجایی اجباری و طبیعی، مقاومت حرارتی جابجایی کلی بدنه با هوای اطراف (R1) بصورت زیر در می آید:

$$R_{convection} = (\pi L_b k_f Nu_{cylinder} + 0.5 \pi D k_f Nu_{plates} + h_{fin} A_{fin} N_{fin})^{-1} \quad (18)$$

در موتور SR بدون درپوش در سطوح جانبی بدنه موتور به صورت یک سطح استوانه‌ای تنها در نظر گرفته می‌شود و از مقاومت سطوح دایره‌ای جانبی صرفنظر می‌شود (R22). بدین دلیل در محاسبه (R23, R24, R25, R26, R37)، دمای هوای درون ماشین (شماره ۷) با دمای هوای محیط یکسان در نظر گرفته می‌شود. انتقال حرارت جابجایی در فاصله هوایی به علت چرخش سریع روتور به صورت انتقال حرارت توسط جریان توربولنت میان دو استوانه دوار در نظر گرفته می‌شود. در این حالت انتقال حرارت در جهت محوری نسبت به انتقال حرارت در جهت شعاعی ناچیز خواهد بود. انتقال حرارت جابجایی حول استوانه دوار شامل منبع حرارتی به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۳-۱۵].

در [۷] بر مبنای جریان توربولنت در فاصله هوایی فرض شده است که هوای میان روتور و استاتور با سرعت برابر با روتور دوران کند. بنابراین عدد نوسلت برای انتقال حرارت جابجایی میان هوا در فاصله هوایی و استاتور به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$Nu_D = 0.0296 Re_D^{0.8} Pr^{0.333} \quad (19)$$

از آنجا که سرعت روتور و هوا در فاصله هوایی تقریباً یکی است، انتقال حرارت میان روتور و هوای فاصله هوایی به صورت هدایت فرض می‌شود. بنابراین مقاومت حرارتی میان روتور و فاصله هوایی (R18) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_{airgap-rotor} = \frac{L_G}{2N_r A_r L_r k_f} \quad (20)$$

مقاومت حرارتی میان هسته روتور و سطوح جانبی دندانه روتور با فاصله هوایی (R19) نیز با روابط مشابهی قابل بیان هستند. مقاومت‌های حرارتی میان دندانه‌های استاتور و سیم پیچ‌ها با فاصله هوایی (R16, R17) نیز با این فرض

مقاومت‌های حرارتی جابجایی

در انتقال حرارت جابجایی مقاومت معادل حرارتی جابجایی به صورت است:

$$R_{convection} = \frac{T_{surface} - T_{ambient}}{\dot{q}} = \frac{1}{hA} = \frac{L}{Nu_L k_f A} \quad (11)$$

که در آن h ضریب انتقال حرارت جابجایی است و عدد نوسلت (Nusselt)، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} Nu_L &= \frac{hL}{k_f} = f(Re, Pr) \\ Re &= \frac{VL\rho}{\mu} \\ Pr &= \frac{c_p \mu}{k} \end{aligned} \quad (12)$$

این رابطه برای انتقال حرارت اجباری است. در حالت انتقال حرارت طبیعی رابطه:

$$\begin{aligned} Nu_D &= \frac{hL}{k_f} = f(Ra, Pr) \\ Ra &= \frac{L^3 \rho^2 g \beta c_p \Delta \theta}{\mu k_f} \end{aligned} \quad (13)$$

معتبر است. در این روابط L طول مشخصه، k_f ضریب رسانایی سیال، V سرعت سیال، ρ چگالی سیال، μ لزجت سیال، g شتاب ثقل، c_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال، β ضریب تراکم پذیری سیال و $\theta \Delta$ تغییرات دمای سیال است. همچنین، در روابط بالا Re عدد رینولدز^۱، Ra عدد رایلی^۲ و Pr عدد پرانتل^۳ است. در موتور SR با درپوش در سطوح جانبی، بدنه موتور به صورت یک استوانه افقی در جریان هوا در نظر گرفته می‌شود. در حالت جابجایی طبیعی برای سطوح استوانه‌ای می‌توان نوشت:

$$Nu_{cylinder} = (0.6 + 0.387 Ra_D^{0.166} (1 + 7211 Pr^{-0.5625})^{-0.296})^2 \quad (14)$$

و برای سطوح جانبی عمودی می‌توان نوشت:

$$Nu_{plates} = (0.825 + 0.387 Ra_D^{0.166} (1 + 0.671 Pr^{-0.5625})^{-0.296})^2 \quad (15)$$

جابجایی اجباری برای سطوح استوانه‌ای را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$Nu_{cylinder} = 0.3 + 0.62 Re_D^{0.5} Pr^{0.333} (1 + 0.00039 Re_D^{0.625})^{0.8} (1 + 0.543 Pr^{-0.667})^{-0.25} \quad (16)$$

و برای سطوح جانبی عمودی می‌توان نوشت [۱۰]:

هستند (به جز مقاومت‌های R12, R14 که مربوط به عایق حول سیم پیچ هستند). حل این مدار منجر به حل یک دستگاه ۱۶ معادله ۱۶ مجهولی می‌شود. جوابهای این دستگاه افزایش دما در اجزاء مختلف ماشین را ارائه می‌دهند (جدول ۳).

جدول ۱: خصوصیات موتور مورد مطالعه.

توان اسمی	5.5 hp
سرعت اسمی	3000 rpm
ولتاژ تغذیه	510V
جریان فاز	20 A
تعداد دندانه استاتور	6
تعداد دندانه روتور	4
شعاع محور	1.9 cm
شعاع یوغ روتور	3.45 cm
شعاع دندانه روتور	4.5 cm
طول فاصله هوایی	0.03 cm
ضخامت بدنه جانبی	1 cm
شعاع سیم	0.5 mm
شعاع داخلی یوغ استاتور	6.95 cm
شعاع خارجی یوغ استاتور	8.5 cm
کمان دندانه روتور	46 degrees
کمان دندانه استاتور	38 degrees
مقاومت سیم پیچ فاز	0.5 Ω
شعاع خارجی یوغ بدنه	10 cm
طول روتور	11.4 cm
طول استاتور	10.8 cm
طول بدنه	30 cm
ضریب هدایت آلومینیم	237 $W/(m^2 k^\circ)$
ضریب هدایت آهن	80.2 $W/(m^2 k^\circ)$
ضریب هدایت مس	401 $W/(m^2 k^\circ)$

قابل توجه است که صحت فرمولبندی فوق وابسته به مراجع [۷،۶] می‌باشد. در [۷،۶] صحت مدل ساخته شده بر مبنای روش فوق مورد تایید قرار گرفته است. در این تحقیق کلیه فرضیات و محاسبات بر مبنای این مراجع بوده و با استفاده از روابط پیشرفته تر (۱۴-۲۱) برگرفته از مراجع [۱۴-۱۰] تقریب بهتری از مساله بدست آمده است. در مراجع [۷،۶] مدلسازی برای یک موتور خاص انجام شده است ولی در این تحقیق به منظور

که سرعت هوای فاصله هوایی برابر سرعت روتور است، قابل محاسبه هستند. در این حالت با توجه به ضخامت بسیار کم فاصله هوایی می‌توان جریان توربولنت اخیر را به صورت جریان هوایی از روی صفحه تخت محاسبه نمود. پس معادلات (۱۹،۱۱) می‌توانند عدد نوسلت و مقاومت حرارتی را برای این انتقال حرارت نشان دهد.

برای مدلسازی انتقال حرارت جابجایی میان هوای داخل ماشین و روتور و استاتور، هر دو انتقال حرارت جابجایی اجباری و طبیعی در نظر گرفته می‌شوند. برای طوقه استاتور، سیم پیچ‌های انتهایی و بدنه از مدل انتقال حرارت جابجایی طبیعی در اطراف صفحه‌های تخت عمودی استفاده می‌شود که در آن معادله (۱۵) قابل اعمال است. برای روتور از مدل انتقال حرارت اجباری در اطراف صفحه تخت عمودی استفاده می‌شود که در آن معادله (۱۷) قابل اعمال است. در این حالت چرخش روتور در نزدیکی هوا عامل ایجاد سرعت نسبی میان روتور و هوای داخل ماشین است. در این صورت شعاع موثر، عدد رینولدز متوسط، ضریب جابجایی متوسط و مقاومت حرارتی متوسط (R22, R23, R24, R25, R26, R37) به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{r} = \frac{\int r dA}{\int dA}$$

$$Re_L = \frac{\rho \pi^2 \bar{r}^2 rpm}{15\mu}$$

$$\bar{h} = \frac{Nu_L k_f}{2\pi \bar{r}}$$

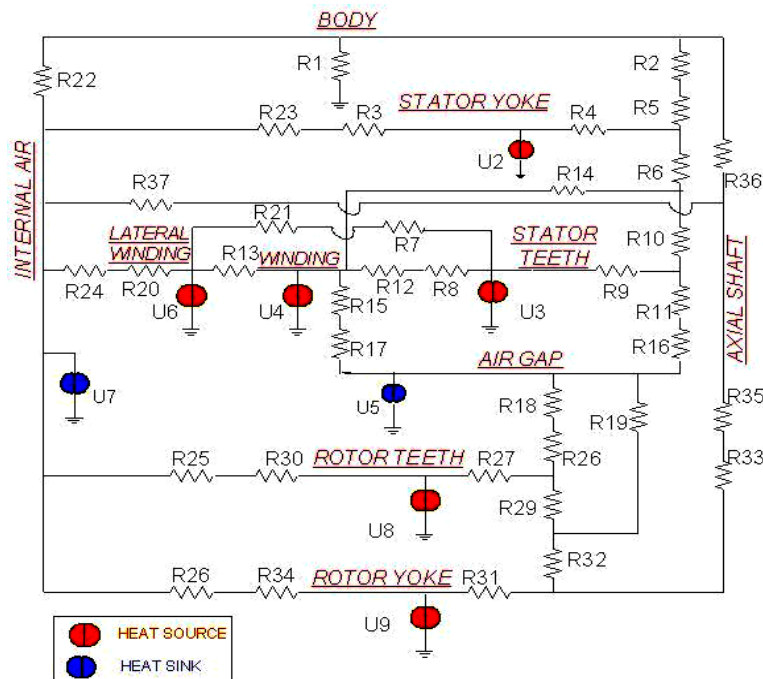
$$\bar{R} = \frac{1}{hA} = \frac{2\bar{r}}{Nu_L k_f (r_{outer}^2 - r_{inner}^2)}$$

(۲۱)

مدار معادل حرارتی در موتور SR

در موتور SR با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) و خصوصیات و ضرایب بدست آمده برای دمای حالت ماندگار تخمین زده شده، می‌توان مدار معادل حرارتی را برای موتور SR برای محاسبه دماهای حالت ماندگار بدست آورد (شکل ۵).

مقاومت‌های حرارتی بدست آمده در این مدار در جدول (۲) آورده شده اند. جدول (۲) نشان می‌دهد که مقاومت‌های مربوط به انتقال حرارت جابجایی بسیار بزرگتر از مقاومت‌های مربوط به انتقال حرارت هدایتی



شکل ۵: مدار معادل حرارتی موتور.

جدول ۳: افزایش دمای قسمتهای مختلف ماشین SR.

شماره جزء	جابجایی طبیعی	جابجایی اجباری (سرعت هوا) (m/s)	جابجایی اجباری (سرعت هوا) (m/s)
1	80.5239	56.6594	14.3331
2	82.1495	58.2850	15.9587
3	85.3072	61.4428	19.1164
4	99.8286	75.9642	33.6379
5	83.7967	59.9323	17.6059
6	99.0917	75.2272	32.9009
7	85.8680	62.0036	19.6772
8	81.9284	58.0640	15.7377
9	81.4054	57.5410	15.2146
10	80.8292	56.9647	14.6384

یک طراحی ابداعی: روتور در نقش فن داخلی (روتور مارپیچ)

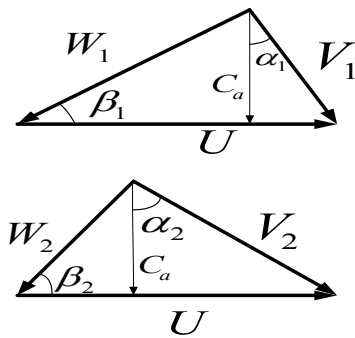
جدول (۳) افزایش دمای اجزاء مختلف موتور SR

را نشان می‌دهد. این اجزا برای کارایی بهتر باید در حین کارکرد ماشین توسط یک هواکش خنک شوند که این کار می‌تواند باعث افزایش قیمت ماشین شود [۳]. از طرفی کمبود فضای مورد نیاز ممکن است موجب بروز مشکلاتی در تعبیه هواکش گردد. در بخش بعد یک کاربرد ابتکاری از روتور شرح داده می‌شود که در آن روتور حول محورش قدری پیچانده می‌شود. این پیچش می‌تواند باعث دستیابی به گرادیان فشار هوا در دو طرف روتور گردد. این

بررسی پارامترهای گوناگون بر انتقال حرارت موتور و در نهایت طراحی بهینه موتور نیاز به مدل معتبر در بازه وسیع تغییرات پارامترهای ابعادی و فیزیکی می‌باشد. اصلاحات انجام شده در روابط (۱۴-۲۱) منجر به تقریب بهتری در کل بازه تغییرات ابعادی و فیزیکی شده است. حل دقیق صرفا با روشهای عددی ممکن می‌باشد.

جدول ۲: مقاومتهای حرارتی محاسبه شده.

R1	0.2162	R11	0.0144
R2	0.0004	R12	0.8437
R3	0.0298	R13	0.0139
R4	0.0014	R14	0.8965
R5	0.0038	R15	0.0050
R6	0.0044	R16	5.2567
R7	0.0402	R17	9.0798
R8	0.0329	R18	0.3102
R9	0.0041	R19	14.4272
R10	0.0108	R20	0.0581
R21	0.0581	R31	0.0036
R22	4.7526	R32	0.0092
R23	6.3484	R33	0.0137
R24	6.4868	R34	0.0909
R25	54.9804	R35	0.0103
R26	34.6406	R36	0.0135
R27	0.0466	R37	0.0100
R28	0.0089		
R29	0.0106		
R30	0.1826		



شکل ۷: فن محوری: مثلث سرعتها.

با فرض سرعت میانگین ثابت برای دندانه روتور، سرعت ورودی هوا، شعاع متوسط دندانه و مساحت ثابت سطح میان دندانه‌ها می‌توان نوشت:

$$c_a = \frac{u}{\tan(\alpha_1) + \cot(\beta_1)} \quad (22)$$

$$w_1 = \frac{c_a}{\sin(\beta_1)} \quad \& \quad v_1 = \frac{c_a}{\cos(\alpha_1)} \quad (23)$$

$$\tan(\alpha_2) = \frac{u}{c_a} - \cot(\beta_2) \quad (24)$$

$$w_2 = \frac{c_a}{\sin(\beta_2)} \quad \& \quad v_2 = \frac{c_a}{\cos(\alpha_2)} \quad (25)$$

که در آنها u سرعت خطی دندانه روتور، v_1 و v_2 سرعت سیال در حین ورود و خروج از فضای میان دندانه‌ها، w_1 و w_2 سرعت‌های نسبی ورود و خروج سیال از فضای میان دندانه‌ها، c_a مولفه محوری از سرعت سیال میان دو دندانه هستند. فاصله میان دو دندانه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$t = \left(\frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_r}{2} \right) (r_{\min} + r_{\max}) \quad (26)$$

که در آن r_{\min} و r_{\max} به ترتیب شعاع نوک و پایه دندانه روتور هستند. دبی سیال عبوری از میان دندانه‌ها عبارتست از:

$$Q = c_a A = c_a (\pi - N_r \beta_r) (r_{\max}^2 - r_{\min}^2) \quad (27)$$

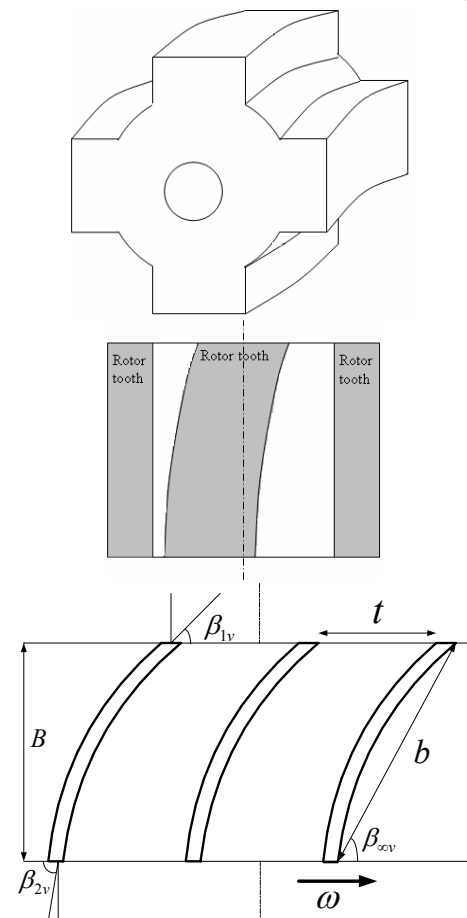
میزان نرخ انرژی داده شده به سیال از طریق روتور عبارتست از:

گرادیان فشار جریان هوا را از یک طرف به طرف دیگر روتور عبور می‌دهد و این جریان هوا از میان فاصله هوایی به صورت محوری عبور می‌کند و باعث خنک شدن روتور، استاتور و سیم پیچ‌ها می‌گردد. خنک‌کاری و کاهش دما از دو طریق افزایش عدد رینولدز و نیز انتقال هوای داغ از فاصله هوایی به بیرون انجام می‌شود.

مدلسازی روتور به عنوان هواکش محوری

به منظور مطالعه جریان سیال از میان فاصله هوایی روتور به صورت یک هواکش محوری مدلسازی می‌شود [۱۷، ۱۶]. فرض شود که خط میانی دندانه روتور با محور روتور موازی نیست و زاویه ورودی دندانه‌های روتور β_{1v} و زاویه خروجی آن β_{2v} است (شکل ۶).

بنابراین جریان هوا در این فرآیند قدری پیچ خواهد خورد. در این حالت عملکرد هواکش محوری توسط تئوری آبشاری^۴ مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. با توجه به مثلث سرعتها می‌توان تغییرات اندازه و جهت سرعت هوا از میان دندانه‌های روتور را مطالعه کرد (شکل ۷).



شکل ۶: فن محوری: ابعاد.

است که بدون حضور پره راهنما صفر در نظر گرفته می‌شود. بعلاوه β_1, β_2 زوایای ورود و خروج هوا می‌توانند با زوایای دندانه یعنی β_{1v}, β_{2v} معادل گرفته شوند. هر چند در زاویه حمله i داریم: $\beta_2 = \beta_{2v} - i, \beta_1 = \beta_{1v} - i, \beta_\infty = \beta_{\infty v} - i$ در آن $\beta_\infty, \beta_{\infty v}$ زوایای متوسط پیش دندانه و سیال می‌باشند.

انتقال حرارت روی روتور ماریچ

انتقال حرارت جابجایی در فاصله هوایی ناشی از جریان محوری هوا را می‌توان با انتقال حرارت جابجایی داخل یک کانال و جریان توربولنت مدل کرد [۱۰].

$$Nu_D = \frac{f(Re_D - 1000)Pr}{8 + 35.92(Pr^{0.667} - 1)f^{0.5}} \quad (35)$$

عدد نوسلت در جریان آرام ($Re_{D_h} \leq 2300$) برابر است با ($Nu_D = 4.36$). با توجه به طول کم کانال نسبت به قطر هیدرولیکی آن، رابطه (۳۵) باید به صورت زیر اصلاح شود [۱۲]:

$$Nu_D^* = Nu_D \left(1 + \frac{2.14D_h}{b} \right) \quad (36)$$

بعلت زیری اصلاح دیگر باید در این مزبور صورت گیرد [۱۲]:

$$Nu_D^{**} = Nu_D^* \left(\frac{f}{f_{smooth}} \right)^n \quad \& \quad n = 0.68 Pr^{0.215} \quad (37)$$

اگر نسبت $\frac{f}{f_{smooth}}$ بزرگتر از چهار باشد همان عدد چهار برای آن در رابطه قرار می‌گیرد. پس ضریب انتقال حرارت جابجایی به صورت زیر خواهد بود [۱۲]:

$$h_{axial} = \frac{Nu_D^{**} k_f}{D_h} \quad (38)$$

این ضریب انتقال حرارت بر مقاومت حرارتی جابجایی بین فاصله هوایی و سایر اجزا موتور تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین مقاومت حرارتی جابجایی کلی میان فاصله هوایی و اجزا مختلف موتور به صورت زیر تغییر خواهد کرد (جدول ۵ و ۴):

$$\dot{E}_{in} = T \cdot \omega = \rho Q u c_a (\cot(\beta_1) - \cot(\beta_2)) \quad (28)$$

از طرفی توان داده شده به هوا از طرف روتور از طریق معادله انرژی قابل محاسبه است [۱۶]:

$$\dot{E}_{in} = \frac{\rho Q (V_2^2 - V_1^2)}{2} + \rho Q c_p (T_2 - T_1) + \rho Q \Delta p_{fric} \quad (29)$$

که در آن C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا و Δp_{fric} افت هد در اثر عبور هوا از کانال میان دندانه‌های روتور است. اختلاف فشار در مقاطع ورودی و خروجی عبارتست از [۱۳]:

$$\Delta p_{fric} = (f \frac{b}{D_h} + 0.5 + 0.5) \frac{\rho c_a^2}{2} \quad (30)$$

که در آن b طول کانال و f ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ است که توسط فرمول هالند قابل محاسبه است [۱۳].

$$f = \left(-1.8 \log_{10} \left(\left(\frac{\varepsilon}{3.7D_h} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re_{D_h}} \right) \right)^{-2} \quad (31)$$

اگر سطح داخل کانال هموار در نظر گرفته شود. ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ به صورت زیر هم قابل محاسبه می‌شود:

$$f_{smooth} = (0.79 \ln(Re_{D_h} - 1.64))^{-2} \quad (32)$$

در رابطه فوق f_{smooth} ضریب اصطکاک در کانال هموار، ε زبری نسبی کانال، Re_{D_h} عدد رینولدز و D_h قطر معادل هیدرولیکی کانال است [۱۳].

$$D_h = \frac{2t(r_{max} - r_{min})}{(t + r_{max} - r_{min})} \quad (33)$$

با چشم پوشی از افزایش دمای ناشی از پیچش هوا در کانال، زوایای دندانه‌های روتور باید شرایط زیر را (ناشی از معادله انرژی) ارضا کنند:

$$\rho Q u c_a (\cot(\beta_1) - \cot(\beta_2)) \geq \rho Q \Delta p_{fric} \quad (34)$$

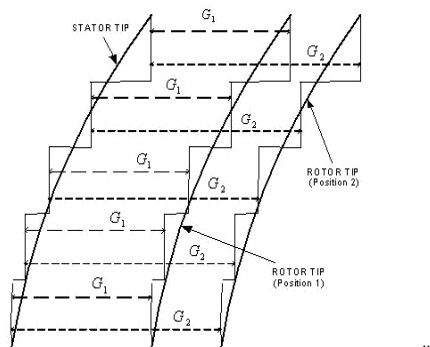
در رابطه اخیر هر چه طرف چپ معادله کوچکتر باشد بهتر است. دلیل این امر صرف انرژی کمتر و در نتیجه افت کمتر بازده موتور است [۱۸، ۱۹]. α_1 زاویه پره راهنما

حرارتی در فاصله هوایی و هوای درون ماشین در مدار معادل حرارتی جایگزین خواهد شد (شکل ۵).

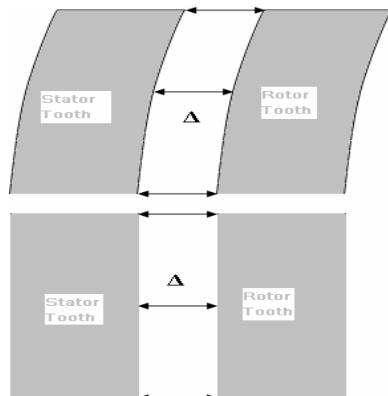
$$\dot{E}_{\text{sink}} = \rho Q c_p (T_{\text{hot air}} - T_{\text{ambient}}) \quad (41)$$

طراحی تقریبی زاویه ها در روتور ماریچ

اصولاً تعیین پارامترهای موثر در پره‌های هواکش محوری و کمپرسورها نیازمند به محاسبات تحلیلی و نیز در اختیار داشتن داده‌های تجربی است [۱۷-۱۹]. اما یک اختلاف اساسی میان طراحی هواکش و کمپرسور محوری و طرح اخیر وجود دارد. در اینجا هدف عمده ماریچ کردن روتور، عبور جریان محوری هوا از روی دندانه‌های روتور با صرف کمترین میزان انرژی از سوی روتور است. اما در یک هواکش یا کمپرسور محوری واقعی هدف عبور میزان معینی از سیال با اختلاف فشار معین در دو سوی هواکش یا کمپرسور است. بنابراین در SRM هدف طراح صرفاً عبور هوا از روی روتور با صرف کمترین میزان انرژی است.



(الف)



(ب)

شکل ۸: تقریب دو بعدی قطبهای ماریچ.

پس طراحی تقریبی ابعاد هندسی دندانه ها بدون نتایج تجربی می‌تواند قابل قبول باشد. تنها قید عمده در

$$R_{\text{convection}} = (h_{\text{axial}} A_{\text{axial}} + h_{\text{rotational}} A_{\text{rotational}})^{-1} \quad (39)$$

جدول ۴: مقایسه مقاومتهای حرارتی اجزای مختلف در روتور

ساده و ماریچ برحسب $^{\circ}K/W$ در جابجایی طبیعی.

سیم پیچ	هسته روتور	مقاومت بین فاصله هوایی و
2.5055	14.4272	دندانه معمولی ($Rpm = 500$)
2.0060	5.6641	دندانه ماریچ

سیم پیچ	هسته روتور	مقاومت بین فاصله هوایی و
1.0404	4.4272	دندانه معمولی ($Rpm = 1500$)
0.9533	6.0968	دندانه ماریچ

جدول ۵: مقایسه مقاومتهای حرارتی اجزای مختلف در روتور

ساده و ماریچ برحسب $^{\circ}K/W$ در جابجایی اجباری.

سیم پیچ	هسته روتور	مقاومت بین هوای داخل فنجانک
4.3107	23.0201	انتهایی و دندانه معمولی ($Rpm = 500$)
3.5416	16.2817	دندانه ماریچ

سیم پیچ	هسته روتور	مقاومت بین هوای داخل فنجانک
1.7900	9.5589	انتهایی و دندانه معمولی ($Rpm = 1500$)
1.4901	6.9085	دندانه ماریچ

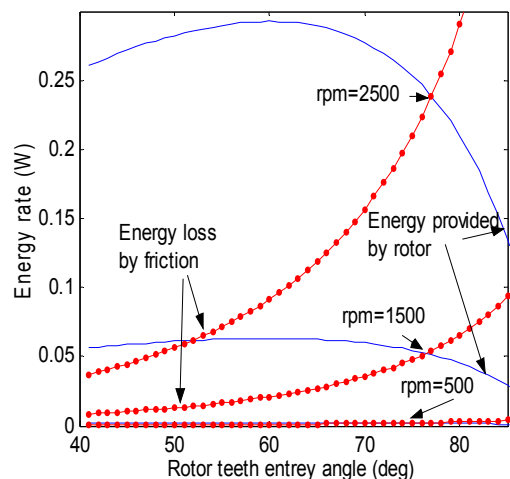
بر اثر کارکرد هواکش محوری هوای داخل ماشین با اجزایی همچون سیم پیچ، استاتور و روتور مواجه خواهد شد. این امر میزان انتقال حرارت میان برخی اجزای موتور و هوای داخل ماشین را افزایش خواهد داد. انتقال حرارت جابجایی میان سطوح جانبی روتور، استاتور و سیم پیچ ها در این حالت با انتقال حرارت جابجایی اجباری در جوار صفحات دایروی عمودی مدلسازی می‌شود [۱۳].

$$Nu_D = 0.228 Re_D^{0.731} Pr^{0.333} \quad \& \quad h = \frac{Nu_D k_f}{D_h} \quad (40)$$

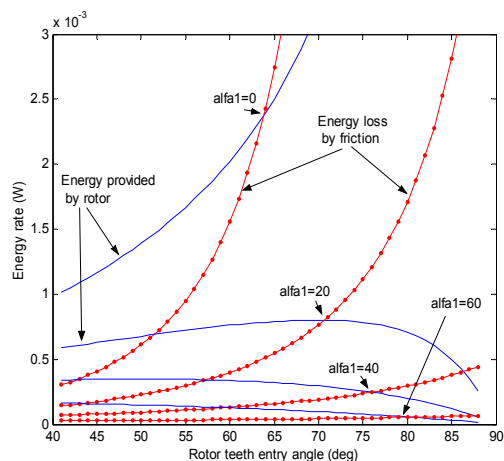
در ضمن در این حالت علاوه بر اینکه مقدار مقاومت های حرارتی در اثر کارکرد روتور ماریچ به صورت هواکش محوری کاسته می‌شود، خروج هوای داغ و جایگزینی آن با هوای سرد نقش چاه حرارتی را ایفا می‌کند. این چاه

به منظور کمینه سازی میزان انرژی مصرفی هوای ورودی به هواکش باید با یک زاویه ورودی معین α_1 وارد هواکش گردد. این زاویه تقریباً برابر با زاویه پره راهنما قبل از روتور است [۱۷]. این پره باید به صورت ثابت و بدون هیچ قید دیگری قبل از روتور نصب گردد. مقدار بهینه α_1 و β_1 با توجه به شکلهای (۹ و ۱۰) بدست می‌آیند. شکلهای (۱۱ تا ۱۴) اثر روتورهای مارپیچ بر کاهش دمای سیم پیچ موتور را نشان می‌دهند. به عنوان مثال برای موتور SR مورد نظر با سرعت روتور 500 rpm، زاویه‌های مورد نظر برای روتور عبارتند از:

$$\alpha_1 = 40^\circ \text{ \& \ } \beta_1 = 75^\circ \text{ \& \ } \beta_2 = 88^\circ$$



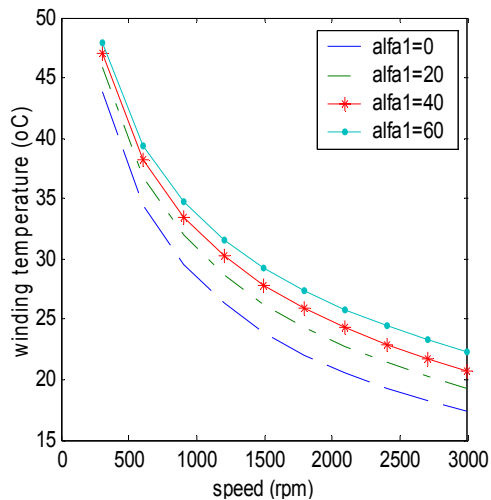
شکل ۹: افت انرژی اصطکاکی و انرژی تامین شده توسط روتور برحسب زوایای ورودی β_1 در سرعت‌های مختلف روتور.



شکل ۱۰: افت انرژی اصطکاکی و انرژی تامین شده توسط روتور برحسب زوایای ورودی β_1 در زوایای مختلف ورودی در پره راهنما α_1 .

طراحی موتور SR می‌تواند عدم کاهش عمده بازده موتور باشد. این مشکل می‌تواند با استفاده از مفهوم مارپیچ کردن دندانه‌های استاتور حول محور دوران موتور دقیقاً به اندازه مارپیچ دندانه‌های روتور حل شود. در [۲۰] ثابت شده است که عملکرد روتور و استاتور مارپیچ را می‌توان با عملکرد تعدادی دندانه با خط مرکزی موازی محور دوران موتور تخمین زد (مطابق شکل ۸). شکل (۸-ب) نشان می‌دهد که مارپیچ بودن دندانه استاتور، دقیقاً به اندازه زاویه مارپیچ روتور، فاصله هوایی را در طول دندانه تغییر نمی‌دهد و حتی می‌توان آنرا دقیقاً به اندازه مقدار آن در موتور اولیه بدون مارپیچ تعیین کرد. پس مارپیچ کردن روتور و استاتور در مقدار فاصله هوایی موثر اثری ندارد و خواص الکترو مغناطیسی موتور را تخریب نمی‌کند. از طرفی در [۲۰] با استفاده از مدل سه بعدی المان محدود ثابت شده است که عملکرد سه بعدی دندانه‌های مارپیچ مشابه عملکرد دو بعدی تعدادی دندانه با خط مرکزی موازی محور دوران موتور می‌باشد.

با فرض فوق، مطابق شکل (۸) می‌توان دریافت که در دندانه‌های روتور و استاتور مارپیچ با زاویه و منحنی های یکسان روتور و استاتور، فاصله خط مرکزی دندانه روتور از خط مرکزی دندانه استاتور در سراسر طول استاتور و روتور یکسان است. پس عملکرد الکترو مغناطیسی موتور با دندانه های روتور و استاتور مارپیچ دقیقاً معادل عملکرد موتور عادی است و مارپیچ کردن دندانه ها منجر به کاهش راندمان و گشتاور موتور نخواهد شد. به طور کلی برای کمینه سازی تغییرات در ساختار موتور سعی می‌شود که زاویه‌های مارپیچ دندانه‌های روتور و استاتور کمترین تغییر از وضعیت عادی موتور را داشته باشند. بدین منظور زاویه‌های ورودی و خروجی دندانه‌ها (پره‌های هواکش محوری) حتی الامکان نزدیک به ۹۰ درجه اختیار می‌شوند. از طرف دیگر، به منظور عبور مقدار معین هوا از میان پره‌های هواکش محوری نیاز به تأمین میزان معین انرژی از طرف روتور می‌باشد. این میزان انرژی متناسب با $\beta_2 - \beta_1$ یعنی تفاضل زوایای ورودی و خروجی پره‌های روتور است. بر اساس دو اصل ذکر شده β_2 زاویه خروجی حدود 85-90 درجه (نزدیک به 90 درجه) انتخاب شده و β_1 زاویه ورودی با توجه میزان انرژی موردنیاز برای غلبه بر اصطکاک مقاوم در برابر عبور جریان محوری هوا تعیین می‌گردد (شکل های ۲۲ ، ۲۱).



شکل ۱۴: افزایش دما در سیم پیچ بر حسب سرعت روتور با روتورهای مارپیچ در زوایای ورودی مختلف پره راهنما α_1 .

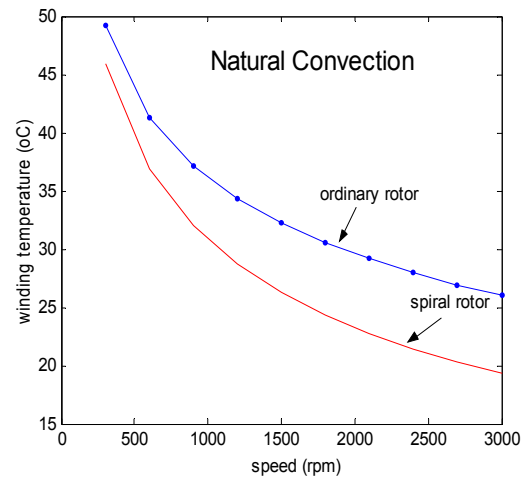
کاربرد مدلسازی حرارتی در طراحی بهینه موتور SR

در دهه های گذشته تحقیقات بسیاری در طراحی بهینه موتور SR انجام شده است که در آنها مشخصات ابعادی موتور از جمله فاصله هوایی و پهنای قطب های روتور و استاتور با هدف بهبود مشخصات الکترومغناطیسی موتور از جمله راندمان و گشتاور تولیدی بهینه شده اند [۲۲،۲۱]. در این تحقیقات عموماً بهینه سازی با اهداف مکانیکی در نظر گرفته نشده است. مدلسازی پارامتری حرارتی موتور، بررسی عملکرد حرارتی موتور را در محدوده وسیع کاری و بهینه سازی آنرا ممکن می سازد.

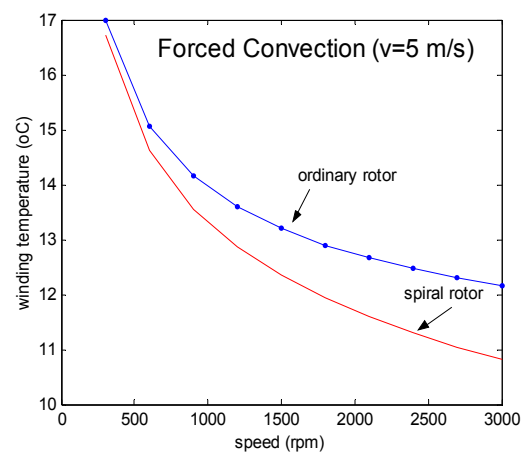
در [۲۳] یک طراحی بهینه بر اساس مشخصات مکانیکی موتور SR از جمله حجم، حرارت و ارتعاش انجام شده است که در آن تابع بهینگی به صورت زیر است.

$$A = \frac{f}{\alpha} + \frac{\beta}{V} + \frac{\gamma}{T_{\max}} \quad (42)$$

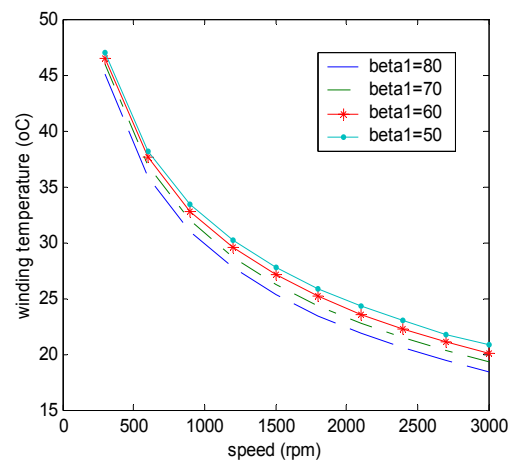
در رابطه فوق f فرکانس طبیعی مود دوم، V حجم موتور و T_{\max} دمای ماکزیمم سیم پیچ است. فرکانسهای طبیعی استاتور با استفاده از مدل نوروفازی محلی خطی از داده های المان محدود قابل محاسبه اند [۲۴]. مدل نوروفازی محلی خطی [۲۴] دقیقتر از مدل تحلیلی تقریبی [۲۳] عمل کرده است و در این تحقیق از آن



شکل ۱۱: افزایش دما در سیم پیچ بر حسب سرعت روتور با روتورهای ساده و مارپیچ در شرایط انتقال حرارت جابجایی طبیعی.



شکل ۱۲: افزایش دما در سیم پیچ بر حسب سرعت روتور با روتورهای ساده و مارپیچ در شرایط انتقال حرارت جابجایی اجباری با $(V_{\text{AIR}}=5 \text{ m/s})$.



شکل ۱۳: افزایش دما در سیم پیچ بر حسب سرعت روتور با روتورهای مارپیچ در زوایای ورودی مختلف β_1 .

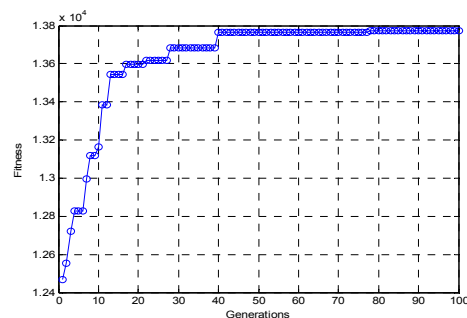
نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا یک مدل حرارتی بر مبنای معادل مقاومت‌های حرارتی موتور SR ارائه شد که می‌تواند در فرآیند طراحی بهینه مکانیکی موتور مورداستفاده قرار گیرد. در این میان ثابت شد که از اثر مقاومت‌های حرارتی هدایتی موتور در مقابل مقاومت‌های حرارتی جابجایی آن می‌توان صرف‌نظر کرد. پس اجزا فلزی موتور می‌توانند به صورت اجسام فشرده حرارتی در نظر گرفته شوند. به علاوه، نشان داده شد که مقاومت حرارتی جابجایی خارجی موتور بیشترین اثر را در میان سایر مقاومت‌های حرارتی بر انتقال حرارت موتور دارد. به منظور خنک کردن موتور بدون استفاده از یک هواکش خارجی، یک طراحی ابتکاری پیشنهاد شد که طی آن روتور و استاتور به صورت مارپیچ در می‌آیند و تا حدی حول محور دوران موتوری می‌پیچند تا روتور به صورت یک هواکش محوری عمل کند. در اینحالت، روتور همزمان با چرخش خود می‌تواند موتور را بیشتر خنک کند. ثابت شد که چنین طراحی تقریبی به منظور خنک‌سازی موتور موجب کاهش بارده و گشتاور تولیدی متوسط موتور نخواهد شد. سرانجام ابعاد استاتور به منظور حصول کمترین دما، کمترین وزن و بیشترین فرکانس طبیعی بهینه شد.

استفاده شده است. در این تحقیق صرفاً جنبه‌های حرارتی و ارتعاشی موتور به صورت مجزا از جنبه‌های الکترومغناطیسی در نظر گرفته شده است. لذا بمنظور جلوگیری از تخریب خواص الکترومغناطیسی موتور، ابعادی که بر عملکرد الکترو مغناطیسی موتور تاثیر دارند (از جمله فاصله هوایی و پهنای قطب‌های روتور و استاتور) ثابت نگه داشته شده اند و صرفاً ابعادی مثل شعاع، ضخامت و طول طوقه استاتور که اثری چندانی بر عملکرد الکترومغناطیسی موتور ندارند، بعنوان متغیر بهینه سازی در نظر گرفته شده اند. برای بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و مقادیر زیر برای مشخصات ابعادی بدست آمده اند:

$$\begin{aligned} r &= 0.0865 \text{ m} & t &= 0.0350 \text{ m} \\ L &= 0.1000 \text{ m} & V &= 0.0011 \text{ m}^3 \\ f &= 13774 \text{ Hz} & T_{\max} &= 93.8 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

که در آن r شعاع متوسط طوقه استاتور، t ضخامت طوقه استاتور و L طول طوقه استاتور است (شکل ۱۵). قابل توجه است که مقادیر بهینه با توجه به نظر طراح در مورد ضرایب α و β و γ در این تصمیم گیری چند معیاره می‌توانند متفاوت باشند [۲۵].



شکل ۱۵: همگرایی به مقدار بهینه.

مراجع

- 1- Faiz, J. and Dadgari, A. (1992). "Heat distribution and thermal calculations for a switched reluctance motor." *Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia, IE Aust. & IREE Aust.*, Vol. 12, No.4, PP. 349-361.
- 2 - Faiz, J. and Sharifian, M. B. B. (1994). "Core losses estimation in a multiple teeth per stator pole switched reluctance motor." *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 30, No. 2, PP. 189-195.
- 3 - Wood, S. E. and Greenwood, D. (1991). "Force ventilated motors advantages in fixed variable speed application." *5th International Conference on Electrical Machines and Drives*, PP. 276-280.
- 4 - Materu, P. N. and Krishnan, R. (1992). "Estimation of switched reluctance motors losses." *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 28, No.3, PP. 668-679.
- 5 - Liu, Z. J., Howe, D., Mellor, P. H. and Jenkins, M. K. (1993). "Thermal analysis of permanent magnet machines." *Proc. of 6th Int. Conf. on Electrical Machines & Drives*, PP. 359-364.

- 6 - Mellor, P. H., Roberts, D. and Turner, D. R. (1991). "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design." *Electric Power Application, IEE Proc.-B*, Vol. 138, No.5, PP. 205-218.
- 7 - Faiz, J., Iranpour, R. and Pillay, P. (1998). "Thermal model for a switched reluctance motor of TEFC during steady-state and transient operation." *Journal of Electric Machines and Power Systems*, Vol. 26, No.1, PP. 77-92.
- 8 - Inamura, S., Sakai, T., and K. Sawa, K. (2003). "A Temperature rise analysis of switched reluctance motor due to the core and copper loss by FEM." *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 39, No.3, PP. 1154-1557.
- 9 - Wu, W., Dunlop, J. B., Collocott, S. J. and Kalan, B. A. (2003). "Design Optimization of a Switched Reluctance Motor by Electromagnetic and Thermal Finite-Element Analysis." *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 39, No. 5.
- 10 - Incropera, F. P. and Dewitt, D. P. (2002). *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- 11 - Bejan, A. (1993). *Heat transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- 12 - Kays, W. M. and Crawford, M. E. (1993). *Convective heat and mass transfer*, McGraw-Hill.
- 13 - White, F. M. (1991). *Viscous fluid flow*. McGraw-Hill, Inc., New York.
- 14 - Ozerdem, B. (2000). "Measurement of heat transfer Coefficient for a horizontal cylinder rotating in quiescent air." *Int. Comm. on Heat & Mass Transfer*, Vol. 27, No.3, PP.389-395.
- 15 - Sayd-Ahmad, M. E. (1999). "Forced convection heat transfer of a Robertson-stiff fluid between two coaxial rotating cylinder." *Int. Comm. on Heat & Mass Transfer*, Vol. 26, No.5, PP. 695-704.
- 16 - Cherkassky, V. M. (1980). *Pumps, Fans, Compressors*, Mir publication, Moscow.
- 17 - Montazerin, N. (2000). *Turbomachinery*, Amirkabir Univ. of Tech., Tehran.
- 18 - Jorgensen, R. (1999). *Fan Engineering: An Engineer's Handbook*, Howden Buffalo Inc., New York.
- 19 - Bleier, F. P. (1997). *Fan Handbook, Selection, Application & Design*, McGraw-Hill Inc., New York.
- 20 - Mueller, M. A. (1998). "Switched reluctance machines with rotor screw." *Proc. of Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM)*, Istanbul, Turkey, PP. 1680-1685.
- 21 - Faiz, J. and Finch, J. W. (1993). "Aspects of design optimization for switched reluctance motors." *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 4, PP. 704-713.
- 22 - Faiz, J. (1992). "A review of the performance prediction and design techniques for switched reluctance motors." *Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia, IE Aust. & IREE Aust.*, Vol. 12, No. 3, PP. 258-266.
- 23 - Momen, M. F. (2004). *Thermal analysis and design of switched reluctance and brushless permanent magnet machines*, PhD dissertation, University of Akron, USA.
- 24 - Rouhani, H., Bahrami, M. N., Araabi, B. N. and Lucas, C. (2005). "Evolutionary based optimal design of SR motors via neurofuzzy modeling of natural frequencies of cylindrical shells." to appear in *International Journal of Computational Methods*.
- 25 - Abraham, A., Lain, L. and Goldberg, R. (2005). *Evolutionary multiobjective optimization*, Springer, London

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Reynolds

2 - Rayleigh

3 - Prandtl

4 - Cascade