



Semnan University



Research Article

Design, Modeling and Optimization of a High-speed Permanent Magnet Synchronous Machine with Retention Sleeve of Rotor using Taguchi Optimization Method

Hossein Parivar ^{a,*}, Ahmad Darabi ^a

^a Department of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 29 October 2022
Revised: 30 December 2022
Accepted: 27 June 2023

Keywords:

High-speed Permanent Magnet Synchronous Machine (HS-PMSM), Retention Sleeve, Finite-Element Method (FEM), Taguchi Optimization Method, Titanium, Cogging Torque.

ABSTRACT

This paper presents a novel method based on the well-known Taguchi optimization method to design and optimize a high-speed permanent magnet synchronous machine (HS-PMSM). An HS-PMSG is analytically designed at the first step, and next, it has been optimized by the Taguchi optimization method and verified through FEM analysis. Results obtained from the electromagnetic and mechanical simulations of HS-PMSG show that in the optimized design: Owing to the reduction in the thicknesses of the retention sleeve (48.05%) and PM (16.66%), as a consequence, the total size and dimensions of the HS-PMSG are reduced. The weight of PM and the retention sleeve are reduced by about 16.31% and 29.28% respectively, and as a result, the total weight of HS-PMSG is reduced by approximately 1.94%. The Joule loss is reduced by about 9.80%. The HS-PMSG efficiency is improved by 0.02%, and finally, the cogging torque is reduced by 22.44%, compared with the initially designed machine.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.28842.2358>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: hosseinparivar72@yahoo.com

How to cite this article:

Parivar, H., & Darabi, A. (2023). Design, Modeling and Optimization of a High-speed Permanent Magnet Synchronous Machine with Retention Sleeve of Rotor using Taguchi Optimization Method. Journal of Modeling in Engineering, 21(75), 161-179. doi: 10.22075/jme.2023.28842.2358

طراحی، مدل سازی و بهینه سازی ساختار یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم سرعت بالای مجهز به روکش محافظ روتور با استفاده از روش بهینه سازی تاگوچی

حسین پریور^{۱*}، احمد دارابی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۷	در این مقاله، یک روش بهینه سازی مبتنی بر روش تاگوچی برای طراحی و بهینه سازی ماشین سنکرون مغناطیس دائم بالا مجهز به روکش محافظ ارائه شده است. در طراحی اولیه و نهایی، عملکرد ماشین در حوزه الکترومغناطیسی و مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده روش اجزاء محدود (FEM) نشان می دهند که در طراحی نهایی، برخی از پارامترها تغییر کرده است که مهم ترین آن ها به این صورت می باشند: ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم به ترتیب ۴۸/۰۵٪ و ۱۶/۶۶٪ کاهش یافته است. این امر منجر به کاهش وزن روکش محافظ ۲۸/۲۹٪، وزن آهنربای دائم ۱۶/۳۱٪ و وزن کل ۱/۹۴٪ شده است. تلفات مس به اندازه ۹/۸۰٪ و تلفات کل ۰/۹۸٪ کاهش پیدا کرده است و گشتاور دندانه ای ۲۲/۰۴۴٪ کاهش و راندمان ۰/۰۲٪ نسبت به طراحی اولیه افزایش پیدا کرده است.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۹	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۶	
واژگان کلیدی:	
ماشین سنکرون مغناطیس دائم	
سرعت بالا،	
روکش محافظ،	
روش اجزاء محدود،	
روش بهینه سازی تاگوچی،	
تیتانیوم،	
گشتاور دندانه ای.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.28842.2358>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

طراحی روتور، دارای چالش هایی است [۴-۵]. یکی از روش های پیشنهادی برای مقابله با نیروی های گریز از مرکز شدید در این ماشین ها، استفاده از روکش محافظ در ساختار روتور است. از جمله مشکلاتی که در هنگام استفاده از روکش محافظ در روتور رخ می دهد، افزایش تلفات ناشی از جریان های گردابی است. یکی از راه های مقابله با این مشکل، کاهش ضخامت روکش محافظ است. اما کاهش ضخامت روکش، از طرفی، منجر به کاهش استحکام مکانیکی روتور می شود. بنابراین، روکش محافظ باید در بهینه ترین حالت طراحی شود تا عملکرد ماشین هم در حوزه مکانیکی و هم در حوزه الکترومغناطیسی تضمین شود

در سالیان اخیر، با افزایش قیمت انرژی، افزایش گازهای گلخانه ای و عوارض ناشی از آن، کمبود انرژی و مشکلات زیست محیطی تبدیل یک چالش جهانی شده است [۱-۲]. یکی از روش ها برای کاهش این مشکلات، جایگزینی ماشین های الکتریکی سنتی با ماشین های الکتریکی جدید با راندمان بالا و عملکرد مناسب تر است [۳]. یکی از این ماشین ها که در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می گیرد، ماشین های سنکرون مغناطیس دائم سرعت بالا^۲ می باشد. مشکلی که وجود دارد این است که این ماشین ها با نیروهای گریز از مرکز زیادی روبرو هستند و طراحی آن ها، به خصوص

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hosseinparivar72@yahoo.com

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود

² High-speed Permanent Magnet Synchronous Machine (HS-PMSM)

استناد به این مقاله:

پریور، حسین، & دارابی، احمد. (۱۴۰۲). طراحی، مدل سازی و بهینه سازی ساختار یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم سرعت بالای مجهز به روکش محافظ روتور با استفاده از روش بهینه سازی تاگوچی. مدل سازی در مهندسی، ۲۱(۷۵)، ۱۶۱-۱۷۹. doi: 10.22075/jme.2023.28842.2358

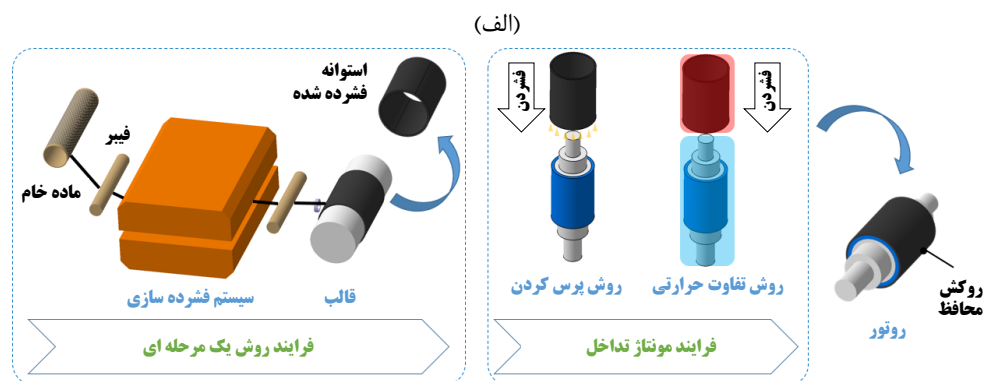
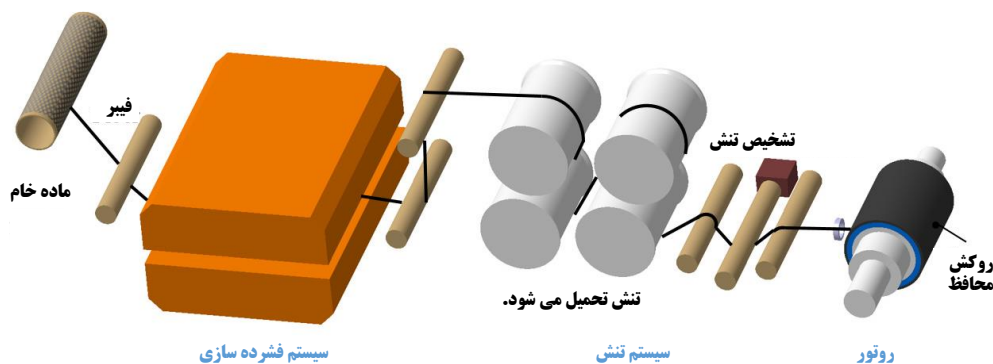
ساختارهای متداول برای طراحی روتور ماشین‌های سرعت بالا به منظور بهینه‌سازی ارائه شده است [۸]. جدول ۱، مزایا، معایب و ویژگی‌های هر کدام از این ساختارهای پیشنهادی را دسته بندی کرده است [۸]. روش‌های زیادی برای طراحی این ماشین‌ها در مراجع مختلف ارائه شده است که مهم‌ترین آنها به شرح جدول ۲ می‌باشند [۲۱-۹].

در این مقاله، یک روش مبتنی بر تاگوجی برای بهینه‌سازی ماشین سنکرون مغناطیس دائم سرعت بالا ارائه شده است. در ابتدا یک ساختار اولیه از ماشین طراحی شده و سپس با روش پیشنهادی بهینه‌سازی می‌شود. برخی از پارامترها در طراحی نهایی، نسبت به طراحی اولیه بهینه شده است. روش اجزاء محدود عملکرد الکترومغناطیسی و مکانیکی روش پیشنهادی را تضمین کرده است.

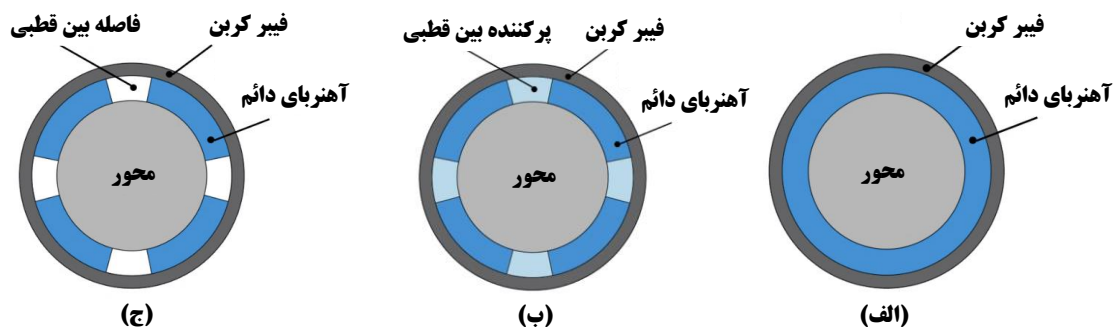
ساختار کلی مقاله به این صورت دسته‌بندی می‌شود. در بخش ۲، ماشین‌های مغناطیس دائم سرعت بالا و نحوه توزیع توان نامی، سرعت چرخشی، حج و ... در این ماشین‌ها شرح داده شده است. در بخش ۳، با توجه به اهمیت تحلیل مکانیکی در این ماشین‌ها، تحلیل تنش روتور انجام شده است. طراحی اولیه ماشین در بخش ۴ شرح داده و روش‌های بهینه‌سازی مختلف در بخش ۵ ارائه شده است.

و یکپارچگی ساختار روتور برای جلوگیری از فروپاشی حفظ شود. روکش‌های محافظ از جنس تیتانیوم، علاوه بر اینکه استحکام مکانیکی مناسبی را فراهم می‌کنند، منجر به کاهش تلفات ناشی از جریان‌های گردابی آهنربای دائم روتور می‌شوند. در مراجع مختلف، روش‌هایی درخصوص طراحی ماشین‌های سنکرون سرعت بالای مغناطیس دائم ارائه شده است. به‌عنوان مثال در مرجع [۶]، یک روش برای بهینه‌سازی این ماشین ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در طرح پیشنهادی تلفات ناشی از جریان‌های گردابی آهنربای دائم، گشتاور دندانه‌ای و تلفات آهن در طرح پیشنهادی، به ترتیب $۸۲/۰۰\%$ ، $۷۳/۰۰\%$ و $۴۴/۷۰\%$ کاهش پیدا کرده است.

در مرجع [۷] از یک روش برای محاسبه تنش‌های اعمالی به روکش محافظ ماشین سرعت بالا استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که گشتاور خروجی نسبت به طراحی اولیه $۲۶/۰۶\%$ بهبود یافته است. گشتاور دندانه‌ای، تلفات ناشی از جریان‌های گردابی روتور و تلفات آهن به ترتیب $۸۷/۱۶۰\%$ ، $۷۰/۰۰\%$ و $۴۴/۵۰\%$ درصد کاهش پیدا کرده است. یکی از روش‌های ساخت روکش محافظ برای استفاده در روتور به‌صورت شکل (۱) خواهد بود. در شکل (۲)



شکل ۱- روش‌های ساخت روکش محافظ برای روتور، الف: روش یک مرحله ای، ب: روش دو مرحله‌ای [۸]



شکل ۲- ساختارهای متداول روتور مجهز به روکش محافظ [۸]، الف: ساختار آهنربای دائم یک پارچه، ب: ساختار آهنربای دائم غیر یکپارچه با ماده پرکننده بین قطبی و ج: ساختار آهنربای دائم غیر یکپارچه بدون ماده پرکننده بین قطبی

جدول ۱- مزایا و معایب ساختارهای متداول روکش محافظ برای بهینه سازی با توجه به شکل ۲ [۸]

نوع	مزایا	معایب
(الف)	ساخت و مونتاژ آسان، استحکام مکانیکی بالا	-
(ب)	کاهش جریان های گردابی	استحکام مکانیکی پایین، هزینه استفاده از ماده پرکننده بین قطبی
(ج)	کاهش جریان های گردابی آهنربای دائم	استحکام مکانیکی پایین

جدول ۲- طراحی ماشین های سرعت بالا در مراجع مختلف [۹-۲۱]

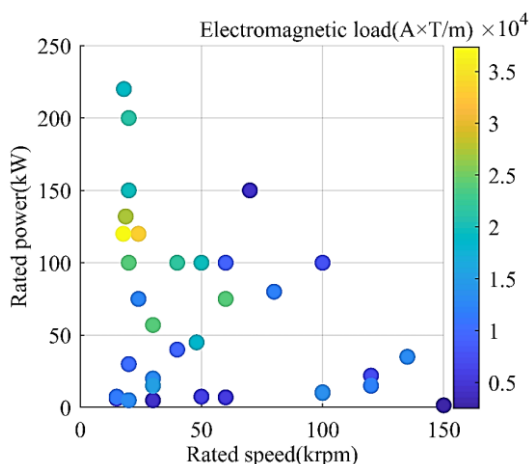
مرجع	توان نامی (kw)	سرعت نامی (krpm)	تعداد قطب	شمار استاتور	g (mm)	L (mm)	نسبت D_{ii}/D_1 (mm)
[۹]	۱۲۰	۱۷/۷۵	۴	۲۴	۲	۱۳۰	۱۰۴/۱۹۵
[۱۰]	۱۰۰	۴۰	۴	۳۶	-	۱۳۸	۸۰/۱۸۰
[۱۱]	۱۰۰	۳۲	۴	۲۴	۵	-	۹۹/۲۳۰
[۱۲]	۸۰	۸۰	۲	۴۴	۳	۱۰۰	۷۰/۱۸۲
[۱۳]	۲۲۰	۱۸	۴	۲۴	-	-	۷۵/۱۲۰
[۱۴]	۲۰	۳۰	۲	۳۶	۳	۹۰	۶۶/۱۳۰
[۱۵]	۱۰	۱۰۰	۲	۲۴	-	۳۶	۴۰/۱۰۴
[۱۶]	۱۰۰	۲۰	۲	۱۸	۱	۱۰۴	۱۰۸/۲۵۰
[۱۷]	۸۰۰	۲۵	۴	۲۴	۳	-	۱۷۰/۳۶۰
[۱۸]	۶/۲	۱۵	۴	۲۴	۱	۱۱۰	۶۲/۱۲۰
[۱۹]	۱۵۰	۱۷	۴	۳۶	۱/۲	۱۴۰	۱۶۰/۳۵۰
[۲۰]	۷/۵	۵۰	۲	۱۸	-	۵۰	۵۵/۱۱۶
[۲۱]	۷۵	۲۴	۲	۲۴	۴	۱۰۰	۱۴۵/۲۴۰

۲- ماشین های مغناطیس دائم سرعت بالا

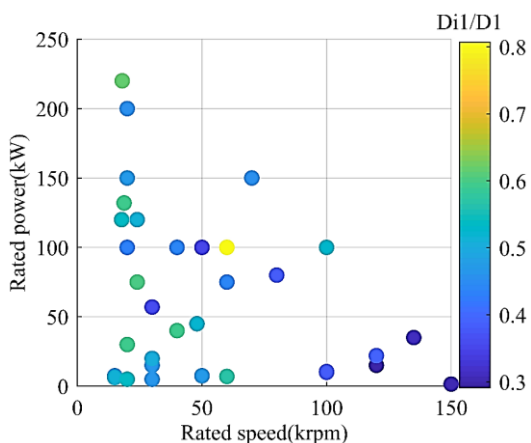
با توجه به کشف مواد مغناطیس دائم این ماشین ها می توانند از چگالی توان بالایی برخوردار باشند. همچنین به دلیل نبود سیستم تحریک، جریان های مغناطیس-شوندگی و تلفات بسیار کم روتور، دارای راندمان بالایی

بخش ۶ طرح مسئله و روش پیشنهادی را شرح می دهد و نتایج حاصل از شبیه سازی در بخش ۷ بررسی و مقایسه شده است. طرح نهایی پیشنهادی در بخش ۸ ارائه و جمع بندی می شود و در نهایت، بخش ۹ نتیجه گیری را در برمی گیرد.

ادامه، تنش روتور مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۵- بارگزاری الکترومغناطیسی در سرعت و توان نامی مختلف [۲۴]

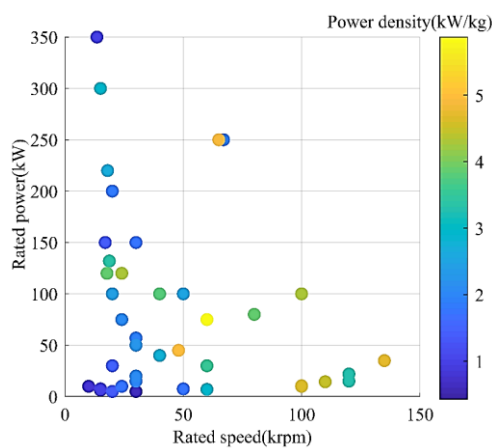


شکل ۶- توزیع D_{i1}/D_1 در سرعت و توان نامی مختلف [۲۴]

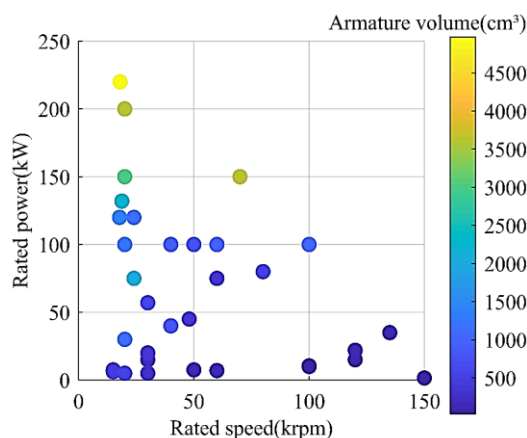
۳- تحلیل تنش روتور

تحلیل تنش روتور، یک روش جامع با شرایط مرزی معین می‌باشد و پارامترهایی از قبیل استحکام مکانیکی ماده، یکپارچگی ساختاری روکش و آهنربای دائم، شرایط الکترومغناطیسی روتور، شرایط حرارتی و ... باید در تحلیل تنش در نظر گرفته شوند. طراحی تنش روتور باید به نحوی باشد که نه تنها استحکام مکانیکی ماده در نظر گرفته شود، بلکه این اطمینان حاصل شود که در هر سرعت چرخشی مجاز، یکپارچگی ساختار روتور از بین نرود [۲۴]. در ماشین‌های سرعت بالا، آهنربای دائم نظر مکانیکی به عنوان آسیب‌پذیرترین بخش روتور از است. یک روکش محافظ با مقاومت مکانیکی بالا، در خارج از سطح آهنرباهای دائم طراحی می‌شود تا از آسیب‌های مکانیکی ناشی از نیروهای گریز از مرکز روی روتور محافظت شود [۲۴]. موضوع دیگر

هستند [۲۲]. بنابراین ماشین‌های طراحی شده کارآمدتر، سبک‌تر و قابل حمل‌تر می‌شوند و در سرعت‌های بالا کاربرد فراوانی دارد. [۲۲]. به‌عنوان مثال، اخیراً فعالیت‌هایی در دانشگاه ETH زوریخ بر روی طراحی ژنراتورهایی با سرعت‌های بالاتر از یک میلیون دور در دقیقه انجام شده است [۲۳]. در مراجع مختلف بر روی پارامترهایی مانند نسبت توان نامی، سرعت چرخشی و ... در این ماشین‌ها گزارش‌هایی ارائه شده است. شکل (۳) تا شکل (۶)، به ترتیب نسبت توان نامی و سرعت چرخشی به چگالی توان مختلف (شکل ۳)، حجم استاتور در سرعت و توان نامی مختلف (شکل ۴)، توزیع بارگزاری الکترومغناطیسی در سرعت و توان نامی مختلف (شکل ۵) و نسبت D_{i1}/D_1 در سرعت و توان نامی مختلف (شکل ۶) را نشان می‌دهد.

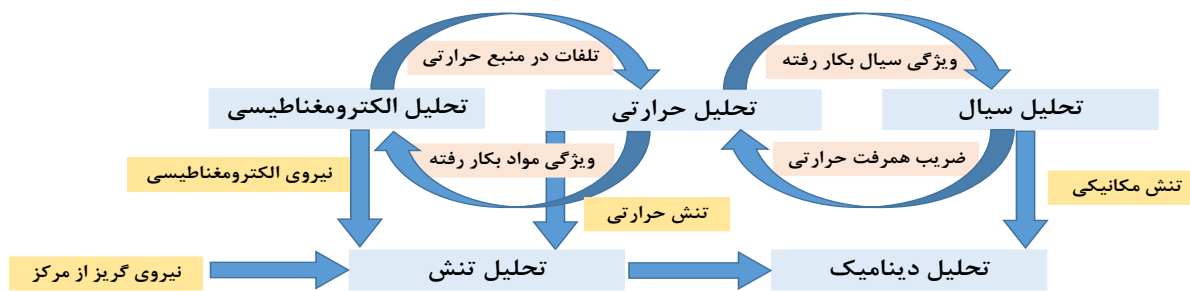


شکل ۳- توزیع چگالی توان در سرعت و توان نامی مختلف [۲۴]



شکل ۴- توزیع حجم استاتور در سرعت و توان نامی مختلف [۲۴]

با توجه به سرعت‌های بالایی که در ماشین‌های مغناطیس دائم سرعت بالا وجود دارد، مطالعات تنش دارای اهمیت زیادی می‌باشد.



شکل ۸- جنبه های طراحی ماشین های سرعت بالا

معادله (۵) خواهد بود.

$$s_{mR} = P_0 \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}\right) \quad (4-f)$$

$$s_{mq} = P_0 \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_1^2}{R_2^2}\right) \quad (4-b)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{mR} - \sigma_{m\theta})^2 + \sigma_{mR}^2 + \sigma_{m\theta}^2]} \quad (5)$$

در معادلات اخیر P_0 بصورت معادله (۶) تعریف می شود.

$$P_0 = \frac{\delta_0}{R_2 \left(\frac{1}{E_m} \times \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \mu_m \right) + \frac{1}{E_s} \left(\frac{R_3^2 + R_2^2}{R_3^2 - R_2^2} + \mu_s \right) \right)} \quad (6)$$

در این معادله، δ_0 نسبت تداخل بین آهنربای دائم و روکش محافظ است. در این بخش، تحلیل مکانیکی روتور ارائه شد. در طراحی ماشین های سرعت بالا هدف، ایجاد همبستگی در تمام زمینه های طراحی ماشین می باشد. شکل (۸) ارتباط بین جنبه های طراحی را نشان می دهد.

۴- طراحی اولیه

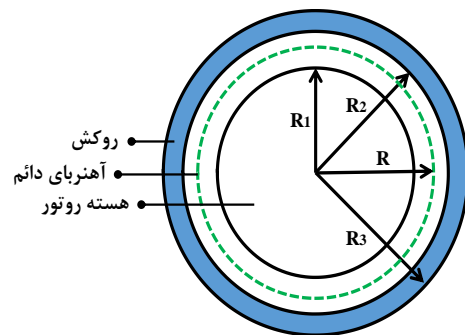
به منظور پیاده سازی روش بهینه سازی پیشنهادی، در این بخش، در ابتدا یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم سرعت بالا مجهز به روکش محافظ طراحی اولیه شده است. پارامترهای مربوط به طراحی و ویژگی های ماشین به صورت جدول ۳ خواهند بود. در طراحی الکترومغناطیسی ماشین با توجه به جنس ماده تیتانیوم که غیر فرو مغناطیس است، روکش به عنوان فاصله ی هوایی اضافی در ماشین عمل خواهد کرد. پارامترهای اولیه طراحی می باشند بصورت زیر تعریف می شوند.

$$J_s = 4 \frac{A}{mm^2}, D = 77mm, L = 80mm, h_m = 3mm$$

برای طراحی روتور تحلیل دینامیکی است که در این بخش مورد بررسی قرار می گیرد.

در این تحلیل، روتور به عنوان یک ساختار ترکیبی از سه استوانه متحدالمرکز نشان داده می شود (شکل ۷)، که شامل هسته روتور، آهنربای دائم و روکش محافظ خواهد بود. با صرف نظر از کرنش محوری، در ابتدا، معادله دینامیکی برای روکش محافظ روتور در تحلیل دینامیکی به صورت معادله ۱، تعریف خواهد شد.

$$\frac{ds_R}{dR} + \frac{s_R - s_q}{R} + r\omega^2 R = 0 \quad (1)$$



شکل ۷- ساختار روتور

تنش در جهت شعاعی و محوری و جابجایی روکش به صورت معادله (۲-الف)، معادله (۲-ب) و معادله (۳) است:

$$s_{SR} = A + \frac{B}{R^2} - \frac{3-m}{8} r\omega^2 R^2 \quad (2-f)$$

$$s_{Sq} = A - \frac{B}{R^2} - \frac{1+3m}{8} r\omega^2 R^2 \quad (2-b)$$

$$u_R = \frac{R}{E} \left[(1-\mu)A - (1+\mu) \frac{B}{R^2} - \frac{1-\mu^2}{8} \rho\omega^2 R^2 \right] \quad (3)$$

تنش در دو جهت شعاعی و محوری آهنربای دائم و تنش معادل به ترتیب به صورت معادله (۴-الف)، معادله (۴-ب) و

$$= 4.609 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

حداکثر شار دندانه استاتور:

$$T_{sc} = \frac{\Phi}{2B_{sc}Ll_f} = \frac{3.705 \times 10^{-3}}{2 \times 1.95 \times 0.08 \times 0.95} = 12.5 \text{mm} \quad (15)$$

ضخامت هسته استاتور:

$$T_{rc} = \frac{\Phi}{2B_{rc}Ll_f} = \frac{3.705 \times 10^{-3}}{2 \times 1.95 \times 0.08 \times 0.95} = 12.5 \text{mm} \quad (16)$$

ضخامت هسته روتور:

$$T_{sw} = \frac{\Phi_{tm}}{B_{st}Ll_f} = \frac{4.609 \times 10^{-4}}{1.95 \times 0.08 \times 0.95} = 3.11 \text{mm} \quad (17)$$

عرض دندانه استاتور:

$$D_{ri} = D - 2(g + h_m + T_{rc}) = 77 - 2(16.5) = 44 \text{mm} \quad (18)$$

در این معادلات، l_f ضریب تورق بوده که با توجه به تجربیات قبلی [۴]، این مقدار بین ۰/۹۵ تا ۱ انتخاب می‌شود.

قطر داخلی روتور:

$$L_m = \frac{3}{\pi} \left(\frac{k_{w1} N_c}{p/2} \right)^2 \frac{\mu_0}{g' k_c} DL = \frac{3}{\pi} \left(\frac{0.95 \times 30}{2/2} \right)^2 \left(\frac{4\pi \times 10^{-7}}{\frac{3.85}{1000} \times 1.012} \right) \times 77 \times 80 \times 10^{-6} = 1.54 \text{mH} \quad (19)$$

اندوکتانس عکس‌العمل استاتور:

$$B_{s1} = \frac{\pi(D + 2(H_{s0} + H_{s1}))}{N_s} - T_{sw} = \frac{\pi(77 + 2(1 + 1))}{18} - 3.11 = 11.02 \text{mm} \quad (20)$$

و پارامتر بازشوندگی دهانه شیار استاتور در گوه:

$$L_{s1s} = 2\mu_0 L_{pq} \frac{N_c^2}{4} \left(\frac{2}{3} \frac{H_{s2}}{B_{s1} + B_{s2}} + 2 \frac{H_{s1}}{B_{s0} + B_{s1}} \right) \left(\frac{1 + \frac{H_{s0}}{B_{s0}}}{1 + 3\beta} \right) \times \frac{30^2}{(1000) \left(2 \times \frac{18}{2 \times 3} \right)} \times \left(\frac{2}{3} \frac{6.22}{11.02 + 22.04} + 2 \frac{1}{2 + 11.02} + \frac{1}{2} \right) \times \frac{1 + 3 \times 1}{4} = 0.033 \text{mH} \quad (21)$$

فاصله هوایی مؤثر برابر خواهد بود با:

$$R_m = \frac{D}{2} - g = \frac{77}{2} - 1 = 37.5 \text{mm} \quad (7)$$

$$R_r = R_m - h_m = 37.5 - 3 = 34.5 \text{mm} \quad (8)$$

$$g' = g_1 + g_2 = g + \frac{h_m}{\mu_r} = 1 + \frac{3}{1.05} = 3.85 \text{mm} \quad (9)$$

گام شیار:

$$\tau_t = \frac{2\pi R_s}{N_s} = \frac{77 \times \pi}{18} = 13.43 \quad (10)$$

و ضریب کارتر:

$$K_c = \frac{\tau_t}{\tau_t - \gamma g'} = \frac{13.43}{13.43 - 0.042 \times 3.85} = 1.012 \quad (11)$$

جدول ۳- پارامترهای ماشین

توان	۴۰ کیلووات
سرعت	۶۰ هزار دور بر دقیقه
تعداد شیار استاتور	۱۸
تعداد قطب	۲
هسته استاتور و روتور	VACOFLUX 48
آهنربا	نئودیمیوم (NEOREC 50H (TDK
سیم پیچی استاتور	COPPER
فریم	آلومینیوم
روکش محافظ	تیتانیوم

ثابت γ :

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left[\frac{B_{s0}}{2g} \tan^{-1} \left(\frac{B_{s0}}{2g} \right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{B_{s0}}{2g} \right)^2} \right] = \frac{4}{\pi} \left[\left(\frac{2}{2 \times 3.85} \right) \tan^{-1} \left(\frac{2}{2 \times 3.85} \right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2}{2 \times 3.85} \right)^2} \right] = 0.042 \quad (12)$$

و در نهایت شعاع داخلی مؤثر استاتور:

$$R_{se} = R_s + (K_c - 1)g' = \frac{77}{2} + (1.012 - 1)(3.85) = 38.54 \text{mm} \quad (13)$$

$$\Phi = \pi \frac{D}{p} L \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} B_n \cos(n\theta) d\theta = \pi \frac{0.077}{2} \times 0.08 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (0.65) d\theta = 3.705 \times 10^{-3} \text{Wb}$$

پارامتر شار بر قطب تولیدی توسط آهنربای دائم:

$$\Phi_{tm} = \pi \frac{0.077}{30} \times 0.08 \int_{-\frac{\pi}{9}}^{\frac{\pi}{9}} (0.65) d\theta \quad (14)$$

جدول ۴- پارامترهای طراحی اولیه ماشین

پارامترهای هندسی (تمام ابعاد بر حسب میلی متر می باشند)				
۲	بازشوندگی دهانه شیار	۳۸/۵۴	شعاع داخلی مؤثر استاتور	۷۷
۳۷/۵	شعاع روتور	۴۴	قطر داخلی روتور	۱۳/۶۳
۱۲/۵	ضخامت هسته استاتور	۸۰	طول محوری ماشین	۱
۱۳۳/۲۶	قطر خارجی استاتور	۳	ضخامت آهنربای دائم	۳/۱۱
۱۱/۰۲	بازشوندگی دهانه شیار استاتور	۳/۸۵	فاصله هوایی مؤثر	۳۴/۵
۱۳/۱۹	بازشوندگی شیار استاتور در پایین	۱/۴۷	ضخامت فریم	۳/۸۵
وزن ماشین (تمامی پارامترها بر حسب کیلوگرم می باشد)				
۴۱/۱۴	وزن هسته روتور	۵/۶۸	وزن دندانه های استاتور	۳۰/۸
۲/۳۹	وزن روکش محافظ	۳/۴۷	وزن آهنربای دائم	۲/۶۴
۱۵۰۰	حجم ماشین (سانتی متر مکعب)	۶۴/۶۴	وزن کلی ماشین	۲/۲۵
تلفات (بر حسب وات)				
۴۰۰	تلفات بادخوری و اصطکاک	۵۲۸/۹۶	تلفات آهن	۱۰۳/۸۳
پارامترهای مدار معادل (میلی هانری) و راندمان (/.)				
۱/۵۴	اندوکتانس عکس العمل آرماتور	۰/۰۳۳	اندوکتانس نشتی شیار	۰/۰۵
۰/۷۰۳	اندوکتانس نشت سیم پیچ انتهایی	۰/۷۳۶	اندوکتانس نشت استاتور	۹۷/۴۸

$$\frac{\pi}{2} \left(\left(\frac{133.26}{2} + t_{frame} \right)^4 - \left(\frac{133.26}{2} \right)^4 \right) = \frac{50 \times 50.4 \times \left(\frac{133.26}{2} + t_{frame} \right)}{190 \times 10^6} \rightarrow t_{frame} = 1.47 \text{mm}$$

در نهایت، ضخامت فریم:

$$MSD = \frac{(y_1 - m)^2 + \dots + (y_n - m)^2}{\sum_{n=1}^n (y_n - m)^2} \quad (25)$$

در نتیجه، اندوکتانس نشتی استاتور برابر با ۰/۷۳۶ میلی هانری خواهد بود. مقادیر دقیق B_{s2} ، H_{s2} و J_s با توجه به بخش قبل به ترتیب برابر با ۱۳/۱۹، ۱۳/۶۳، میلی متر و ۳/۹۳ آمپر بر میلی متر مربع است. در این بخش، طراحی اولیه ماشین انجام شده است و پارامترهای آن بصورت جدول ۴ خواهند بود.

۵- روش های بهینه سازی

پیچیدگی ساختار ماشین های الکتریکی، طراحی بهینه آنها را به یک کار دشوار و چالش برانگیز تبدیل کرده است. در بسیاری از موارد مشخصات طراحی با یکدیگر تضاد دارند. به عنوان مثال، چگالی توان بالا و حجم آهنربای کم، غیرخطی بودن مواد و روابط پیچیده بین بسیاری از

برای محاسبه اندوکتانس های نشتی، لازم است پارامتر بازشوندگی دهانه شیار استاتور در پایین شیار را برابر با $(2 \times B_{s1})$ و ارتفاع گوه تا پایین شیار استاتور را برابر با $(2 \times T_{sw})$ فرض کنیم. مقادیر دقیق آنها را در مراحل بعدی بدست خواهند آمد. در مرحله اول، اندوکتانس نشتی شیار استاتور برابر با:

$$A_s = \frac{B_{s1} + B_{s2}}{2} \times H_{s2} = \frac{11.02 \times 22.04}{2} \times 6.22 \quad (22)$$

$$= 102.81 \text{mm}^2$$

مساحت شیار استاتور:

$$L_{sle} = \frac{1}{2} p q \mu_0 \left(T_{sw} + \frac{B_{s1} + B_{s2}}{2} \right) \left(\frac{3N_c}{N_s} \right)^2 \log \quad (23)$$

$$\left(\frac{\left(T_{sw} + \frac{B_{s1} + B_{s2}}{2} \right) \sqrt{\pi}}{\sqrt{2A_s}} \right) = \frac{1}{2} (2) \left(\frac{18}{2 \times 3} \right) \times$$

$$4\pi \times 10^{-7} \times \left(3.11 + \frac{11.02 + 22.04}{2} \right) \left(\frac{3 \times 30}{18} \right)^2$$

$$\times \log \left(\frac{\left(3.11 + \frac{11.02 + 22.04}{2} \right) \times \sqrt{\pi}}{\sqrt{2 \times 102.81}} \right) = 0.703 \text{mH}$$

اندوکتانس نشتی سیم پیچ انتهایی استاتور:

$$\frac{\pi}{2} \left(\left(\frac{D_o}{2} + t_{frame} \right)^4 - \left(\frac{D_o}{2} \right)^4 \right) \quad (24)$$

هدف ارزیابی می‌شوند و یک نسبت برازندگی^۹ تعیین می‌شود. ۴- اعضای از جمعیت فعلی برای تولید نسل استفاده می‌شود. ۵- ترکیب برای تولید نسل بعدی کروموزوم‌ها انجام می‌شود. ۶- جهش تصادفی کروموزوم‌ها در نسل جدید، ۷- مراحل ۳ تا ۶ تکرار می‌شود تا معیار خاتمه برآورده شود [۲۶].

به‌عنوان مثال، در [۲۶] از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی ماشین مغناطیس دائم سرعت بالا استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش در بهینه‌سازی ماشین‌های به‌خوبی عمل می‌کند [۲۶].

۵-۳- روش بردار بهینه^۸

در این روش، چندین هدف تعیین می‌شود که باید به‌طور همزمان، حداکثر یا حداقل شوند. یکی از روش‌های حل مسائل، تبدیل مسئله چندهدفه به یک مسئله مقیاسی با استفاده از روش‌های وزنی است. این روش، اولین بار توسط دانشمند ایتالیایی بنام ویلفرد پاره‌تو^۹ (۱۸۴۸-۱۹۲۳) معرفی شد و بطور کلی، به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷].

$$\begin{cases} f_j(\vec{x}) \leq f_j(\vec{x}^*) & \text{for all } j \in \{1, \dots, m\} \\ f_j(\vec{x}) < f_j(\vec{x}^*) & \text{for at least one } j \in \{1, \dots, m\} \end{cases}$$

از این روش، به‌عنوان مثال در مرجع [۲۷] استفاده شده است و هدف، افزایش توان خروجی همراه با کاهش حجم آهنربای دائم مورد استفاده در ماشین است. روش بردار بهینه ارائه شده در [۲۷] منجر به کاهش ۱۶/۰۰٪ در حجم آهنربای شده است.

۵-۴- روش ازدحام ذرات^{۱۰}

این روش، در سال ۱۹۹۵ میلادی توسط کندی و ابرهات^{۱۱} [۲۷] ارائه شد و بر اساس الگوهای رفتاری ازدحام زنبورها در یک مزرعه است که سعی در مکان‌یابی منطقه با بیشترین تراکم گل دارند. این روش در بهینه‌سازی مسائل پیچیده چندبعدی در زمینه‌های مختلف بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی به‌خوبی عمل می‌کند. به‌عنوان مثال در مرجع [۲۸] از این روش استفاده شده است. در ادامه، روش پیشنهادی این مقاله بررسی می‌شود.

پارامترهای هندسی، بهینه‌سازی را تبدیل به یک بهینه‌سازی چند هدفه تبدیل کرده است. به‌همین دلیل، بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی کارآمد نخواهند بود. به‌طور کلی، مسئله بهینه‌سازی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

شروع از پارامترهای طراحی اولیه:

$$\vec{X}_0 = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0D}], \vec{X}_0 \in R^D$$

$$\vec{X}_m = [x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mD}], \vec{X}_m \in R^D$$

و توابع هدف:

$$f(\vec{X}_m) = [f_1(\vec{X}_m), f_2(\vec{X}_m), \dots, f_k(\vec{X}_m)]$$

با محدودیت‌های طراحی:

$$g_i(\vec{X}_m) \leq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, n.$$

و شرایط مرزی که به شرح ذیل تعریف می‌شوند.

$$x_j^{(L)} \leq x_j \leq x_j^{(U)} \text{ for } j = 1, 2, \dots, D,$$

در مراجع مختلف، روش‌های بهینه‌سازی زیادی برای ماشین‌های الکتریکی ارائه شده است که برخی از مهم‌ترین‌های آن‌ها در این بخش شرح داده می‌شوند.

۵-۱- روش کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی^۳

در این روش، بهینه‌سازی با استفاده از جستجوی مستقیم حل می‌شود. در واقع، در این روش، یک تابع جریمه^۴ به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که مقادیر بهینه‌سازی به مقدار بهینه نزدیک شوند. به‌عنوان مثال، در [۲۵] راندمان (η) به عنوان تابع هدف تنظیم شده است. با افزایش ۱۳/۸٪ در وزن فعال ماشین و با یک حجم ثابت، یک بهبود ۲۶/۰۰٪ در راندمان (η) ماشین حاصل شده است.

۵-۲- روش الگوریتم ژنتیک^۵

در این روش، پارامترهای ماشین با استفاده از مکانیسم‌های تولید مثل، جهش و ... با هدف بهینه‌سازی ساختار ماشین بررسی می‌شوند. در این روش، مراحل به این صورت خواهند بود: ۱- هر راه حل بالقوه مسئله بهینه‌سازی را در یک رشته باینری به نام کروموزوم^۶ رمزگذاری می‌شود. ۲- یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها ایجاد می‌شود. ۳- کروموزوم‌ها با تابع

⁹ Vilfredo Pareto

¹⁰ Particle Swarm Optimization (PSO)

¹¹ Kennedy and Eberhart

³ Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT)

⁴ Penalty Function

⁵ Genetic Algorithm (GA) Method

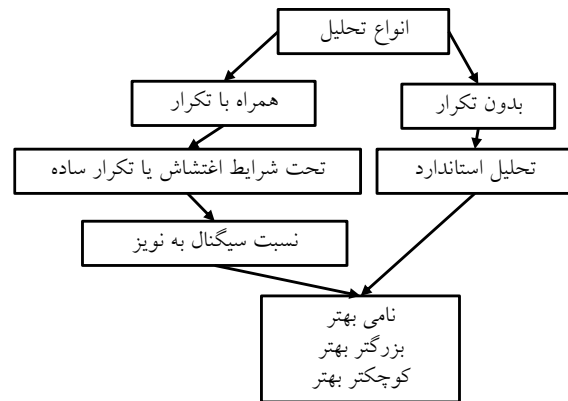
⁶ Chromosome

⁷ Fitness Score

⁸ Vector Optimization (VO) Algorithm

۶- طرح مسئله و روش پیشنهادی

در اواخر ۱۹۴۰ میلادی، دکتر تاگوچی مفاهیم آماری جدید را نیز مطرح کرد که ابزارهای با ارزشی در بهینه سازی و بهبود کیفیت در صنایع مختلف بود. این روش دارای مفاهیم و اصطلاحاتی می باشد که در ادامه شرح داده خواهند شد.



شکل ۹: روش بهینه سازی تاگوچی

فاکتور، عامل یا متغیری است که تاثیر آن بر سیستم مورد مطالعه بررسی می شود. فاکتورهای کنترل، پارامترهایی هستند که در شرایط نامی و طبیعی مسئله مورد کنترل می باشند و فاکتورهای اغتشاش، در واقع فاکتورهایی هستند که کنترل آن ها در شرایط طبیعی مسئله، سخت و پرهزینه می باشد. سطوح هر فاکتور هم تمامی حالاتی است که برای یک فاکتور تعریف می شود. پاسخ، مشخصه ای است که در پایان آزمایش اندازه گیری شده و شرایط بهینه سازی بر اساس نزدیک بودن به اهداف این پاسخ مشخص می شوند. در حالت کلی، در روش تاگوچی سه نوع پاسخ داریم:

۱- نامی-بهتر: هدف، نزدیک شدن به معیار طراحی می باشد. در این حالت، هدف اصلی کاهش انحراف از یک مقدار خاص می باشد و به صورت معادله (۲۶) تعریف می شود:

$$MSD = \frac{(y_1)^2 + \dots + (y_n)^2}{n} = \frac{\sum_{n=1}^n (y_n)^2}{n} \quad (26)$$

۲- بزرگتر-بهتر: حد بالای اندازه گیری مدنظر است:

$$MSD = \frac{(\frac{1}{y_1})^2 + \dots + (\frac{1}{y_n})^2}{n} = \frac{\sum_{n=1}^n (\frac{1}{y_n})^2}{n} \quad (27)$$

۳- کوچکتر-بهتر: حد پایین اندازه گیری مدنظر است.

$$S/N = 10 \log_{10}(\frac{\bar{Y}^2}{S^2}) \quad (28)$$

آزمایش تاگوچی، اغلب، از یک فرآیند بهینه سازی دو مرحله ای استفاده می کند. در حالت کلی، فلوچارت روش

تاگوچی را می توان بصورت شکل (۹) طراحی کرد.

جدول ۵- تعداد کل آرایه ها در روش تاگوچی

ت. حداکثر فاکتورها				ت. فاکتور	ت. سطر	آرانه متعامد
۵	۴	۳	۲			
-	-	-	۳	۳	۴	L ₄
-	-	-	۷	۷	۸	L ₈
-	-	۴	-	۴	۹	L ₉
-	-	-	۱۱	۱۱	۱۲	L ₁₂
-	-	-	۱۵	۱۵	۱۶	L ₁₆
-	۵	-	-	۵	۱۶	L ₁₆
-	-	۷	۱	۸	۱۸	L ₁₈
۶	-	-	-	۶	۲۵	L ₂₅
-	-	۱۳	-	۱۳	۲۷	L ₂₇
-	-	-	۳۱	۳۱	۳۲	L ₃₂
-	۹	-	۱	۱۰	۳۲	L ₃₂
-	-	۱۲	۱۱	۲۳	۳۶	L ₃₆
-	-	۱۳	۳	۱۶	۳۶	L ₃₆
۱۱	-	-	۱	۱۲	۵۰	L ₅₀
-	-	۲۵	۱	۲۶	۵۴	L ₅₄
-	-	-	۶۳	۶۳	۵۴	L ₅₄
-	۲۱	-	-	۲۱	۶۴	L ₆₄
-	-	۴۰	-	۴۰	۸۱	L ₈₁

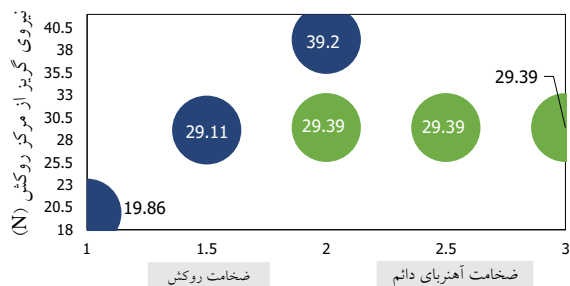
جدول ۶- آرایه های متعامد استاندارد و متداول در روش تاگوچی

پنج سطحی	چهار سطحی	سه سطحی	دو سطحی
L ₂₅ (5 ⁶)	L ₁₆ (4 ⁵)	L ₉ (3 ⁴)	L ₄ (2 ³)
	L ₃₂ (4 ⁹)	L ₂₇ (3 ¹³)	L ₈ (2 ⁷)
	L ₆₄ (4 ²¹)	L ₈₁ (3 ⁴⁰)	L ₁₂ (2 ¹¹)
			L ₁₆ (2 ¹⁵)
			L ₃₂ (2 ³¹)
			L ₆₄ (2 ⁶³)
			L ₁₂₈ (2 ¹²⁷)

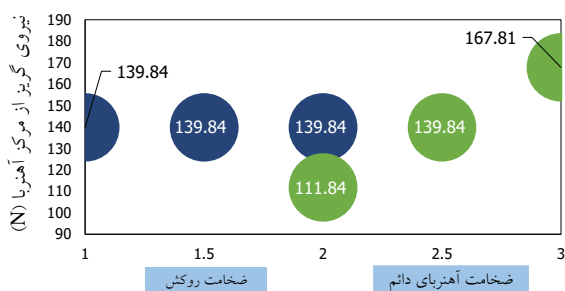
در مرحله اول، از نسبت S/N (سیگنال به نویز) برای شناسایی عوامل کنترل کننده برای کاهش تغییرات استفاده می شود. در مرحله دوم، فاکتورهای کنترلی که تاثیر کم و یا ناچیز بر نسبت S/N دارند، برای رسیدن به هدف شناسایی می شود. اگر کاهش تغییرپذیری پیرامون مقداری

روکش محافظ و آهنربای دائم و تعداد آزمایش‌ها برابر با ۹ آزمایش خواهند بود. \dot{W}_1 و \dot{W}_2 به ترتیب ضخامت روکش محافظ و ضخامت آهنربای دائم را در هر مرحله از آزمایش‌های تاگوچی نشان می‌دهند.

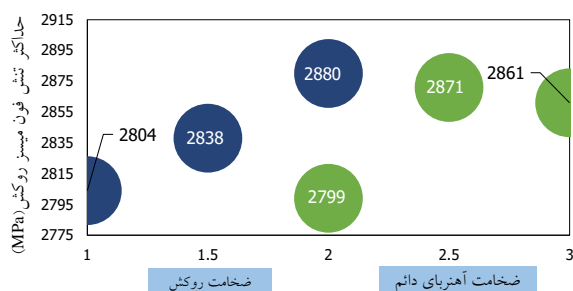
در ادامه نتایج حاصل از روش تاگوچی شرح داده خواهند شد. با توجه به جدول ۷، تعداد آزمایش‌ها، با دو فاکتور به نام



شکل ۱۰- تأثیر ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم بر روی نیروی گریز از مرکز روکش محافظ (C₁)



شکل ۱۱- تأثیر ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم بر روی نیروی گریز از مرکز آهنربای دائم (C₂)



شکل ۱۲- تأثیر ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم بر روی حداکثر تنش فون میسر روکش محافظ (C₃)

ضخامت روکش و ضخامت آهنربای دائم در نرم افزار MINITAB پیاده سازی شده است. بعد از پیاده سازی روش تاگوچی با آرایه متعامد سه سطحی ($L_9(3^4)$) در نرم افزار، نتایج زیر بدست می‌آیند. به عنوان اولین پارامتر برای بررسی، نیروی گریز از مرکز روکش محافظ بررسی می‌شود. این پارامتر نسبت به سطوح \dot{W}_1 و \dot{W}_2 به صورت شکل (۱۰) تغییر خواهد کرد. با توجه به شکل (۱۰)، با افزایش ضخامت

خاص مدنظر باشد، باید کاهش واریانس و منطبق کردن میانگین بر مقدار به صورت: پیدا کردن مقادیر بهینه‌ی طراحی:

$$S/N = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right) - \left(\frac{1}{n} \right) \right] \quad (29)$$

و تعدیل برای اندازه نمونه‌های کوچکتر به صورت:

$$S/N = -10 \log_{10} [MSD] = -10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{n=1}^n (y_n)^2}{n} \right] \quad (30)$$

جدول ۷- آرایه متعامد سه سطحی $L_9(3^4)$ برای پیاده سازی

سطح‌ها	فاکتورها				آزمایش‌ها
	\dot{W}_2	\dot{W}_1	ض. آهنربای دائم	ض. روکش	
۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱/۵	۲	۱	۱	۲
۳	۲	۳	۱	۱	۳
۴	۲/۵	۱	۲	۱	۴
۵	۲/۵	۱/۵	۲	۲	۵
۶	۲/۵	۲	۳	۲	۶
۷	۳	۱	۱	۳	۷
۸	۳	۱/۵	۲	۳	۸
۹	۳	۲	۳	۳	۹

اگر هدف کاهش یا حداقل کردن پاسخ باشد، به صورت:

$$S/N = -10 \log_{10} [MSD] = -10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{n=1}^n \left(\frac{1}{y_n} \right)^2}{n} \right] \quad (31)$$

و یا اگر حداکثر کردن متغیر پاسخ باشد، به صورت:

$$S/N = -10 \log_{10} [MSD] = -10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{n=1}^n \left(\frac{1}{y_n} \right)^2}{n} \right] \quad (32)$$

تعریف می‌شود. کل آرایه‌های متعامد (جدول ۵) و آرایه‌های متعامد استاندارد به صورت (جدول ۶) است. با استفاده از آنها، تاثیر بسیاری از پارامترها در روش تاگوچی تعیین می‌شود.

۷- بررسی و مقایسه نتایج

با توجه به جدول ۵ و جدول ۶ و هم‌چنین با توجه به اهمیت پارامترهای مکانیکی مانند، نیروی گریز از مرکز در روتور و تنش و کرنش روتور، برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی یک آرایه متعامد سه سطحی $L_9(3^4)$ مورد نیاز است که ساختار کلی آن به صورت جدول ۷ خواهد بود. آرایه متعامد ضخامت روکش محافظ و آرایه متعامد ضخامت آهنربای دائم و سه سطح به ترتیب، نیروی گریز از مرکز بر روی روکش محافظ و آهنربای دائم، حداکثر تنش معادل فون میسر روکش محافظ و آهنربای دائم و حداکثر کرنش معادل فون میسر

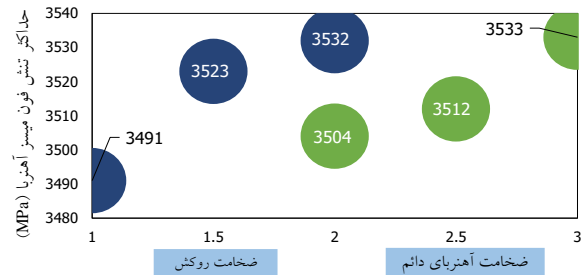
حالت‌های بررسی شده نشان می‌دهد. پارامتر DELTA، تفاوت بین حداکثر و حداقل مقدار در تمام حالت‌های بررسی شده می‌باشد و پارامتر Rank، رتبه‌ی هر DELTA می‌باشد.

جدول ۸- مقادیر DELTA و Rank در تحلیل تاگوچی

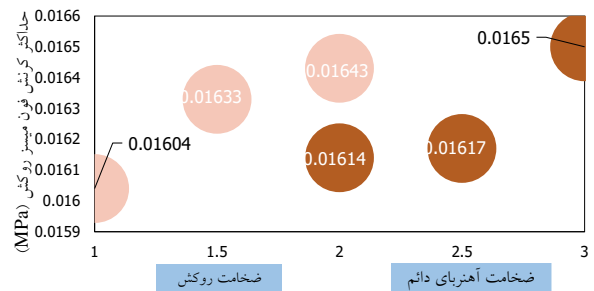
	\dot{w}_2	\dot{w}_1		
C ₁	۰	۱۹/۳۴	DELTA	C ₁
	۲	۱	Rank	
C ₂	۵۵/۹۷	۰	DELTA	C ₂
	۱	۲	Rank	
C ₃	۷۲	۷۶	DELTA	C ₃
	۲	۱	Rank	
C ₄	۲۹	۴۱	DELTA	C ₄
	۲	۱	Rank	
C ₅	۰/۰۰۰۸۶	۰/۰۰۰۸۹	DELTA	C ₅
	۲	۱	Rank	
C ₆	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۳۷	DELTA	C ₆
	۲	۱	Rank	

با توجه به این مقادیر می‌توان اهمیت و تاثیر پارامترهای بدست آمده از روش تاگوچی را بر روی یکدیگر مقایسه کرد. در ادامه شکل (۱۲)، تاثیر ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم بر روی حداکثر تنش فون میسر روکش (C₃) را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۱۲) و جدول ۸ قابل مشاهده است، ضخامت روکش محافظ تاثیر مستقیمی بر حداکثر تنش فون میسر روکش محافظ دارد و تاثیر آن بیشتر از ضخامت آهنربای دائم است. شکل (۱۳)، تاثیر ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم بر روی حداکثر تنش فون میسر روکش محافظ (C₄) را بررسی می‌کند. ضخامت روکش محافظ بر حداکثر تنش فون میسر آهنربای دائم بیشتر از ضخامت آهنربای دائم است و این امر نشان می‌دهد که این پارامتر برای بهینه‌سازی دارای اهمیت است. برای حداکثر کرنش فون میسر روکش محافظ با توجه به شکل (۱۴) و جدول ۸، هر دو پارامتر ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم تاثیر مستقیم دارند اما تاثیر ضخامت روکش محافظ بیشتر است. و در نهایت با توجه به شکل (۱۵)، تاثیر ضخامت روکش محافظ بر روی حداکثر کرنش فون میسر آهنربای دائم از ضخامت آهنربای دائم بیشتر است. ضخامت آهنربای دائم فقط بر روی نیروی گریز از مرکز آهنربای دائم تاثیری بیشتر از ضخامت روکش محافظ ندارد.

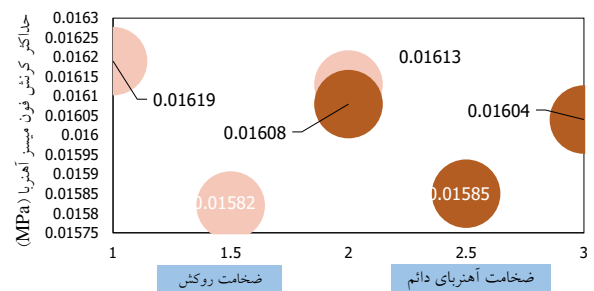
روکش از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر، افزایش ۴۶/۵۷٪ در نیروی گریز از مرکز روکش رخ می‌دهد. از ضخامت ۱/۵ تا ۲ میلی‌متر، این پارامتر، ۳۴/۶۶٪ افزایش دارد. یعنی، با افزایش ضخامت روکش محافظ، نیروی گریز از مرکز آن افزایش می‌یابد و تاثیر مستقیم بر روی هم دارند. ضخامت آهنربای دائم، تاثیری بر نیروی گریز از مرکز روکش محافظ ندارد.



شکل ۱۳- تاثیر ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم بر روی حداکثر تنش فون میسر آهنربای دائم (C₄)



شکل ۱۴- تاثیر ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم بر روی حداکثر کرنش فون میسر روکش محافظ (C₅)



شکل ۱۵- تاثیر ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم بر روی حداکثر کرنش فون میسر آهنربای دائم (C₆)

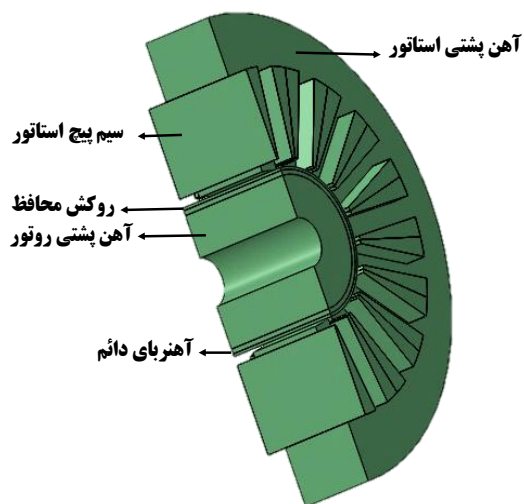
شکل (۱۱) تاثیر ضخامت‌های روکش محافظ و آهنربای دائم بر روی نیروی گریز از مرکز آهنربای دائم را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است ضخامت آهنربای دائم تاثیر مستقیمی بر روی نیروی گریز از مرکز آهنربای دائم دارد و ضخامت روکش محافظ هیچ تاثیری بر روی این پارامتر ندارد. جدول ۸، دو مقادیر DELTA و Rank را برای تمام

جدول ۹- نتایج حاصل از روش پیشنهادی تاگوچی

نیروی گریز از مرکز (نیوتون)			حداکثر تنش فون میسز (مگا پاسکال)			حداکثر تنش فون میسز (مگا پاسکال)		
روکش محافظ			آهنربای دائم			روکش محافظ		
	\dot{W}_1	\dot{W}_2		\dot{W}_1	\dot{W}_2		\dot{W}_1	\dot{W}_2
۱	۱۹/۸۶	۲۹/۱۱	۱	۳۴۹۱	۳۵۰۴	۱	۲۸۰۴	۲۷۹۹
۲	۲۹/۱۱	۲۹/۱۱	۲	۳۵۲۳	۳۵۱۲	۲	۲۸۳۸	۲۸۷۱
۳	۳۹/۲۰	۲۹/۱۱	۳	۳۵۳۲	۳۵۳۳	۳	۲۸۸۰	۲۸۶۱
DELTA	۱۹/۳۴	۰	DELTA	۴۱	۲۹	DELTA	۷۶	۲
Rank	۱	۲	Rank	۱	۲	Rank	۱	۰
نیروی گریز از مرکز (نیوتون)			حداکثر کرنش فون میسز (مگا پاسکال)			حداکثر کرنش فون میسز (مگا پاسکال)		
آهنربای دائم			آهنربای دائم			روکش محافظ		
	\dot{W}_1	\dot{W}_2		\dot{W}_1	\dot{W}_2		\dot{W}_1	\dot{W}_2
۱	۱۳۹/۸۴	۱۱۱/۸۴	۱	۰/۰۱۶۱۹	۰/۰۱۶۰۸	۱	۰/۰۱۶۰۴	۰/۰۱۶۱۴
۲	۱۳۹/۸۴	۱۳۹/۸۴	۲	۰/۰۱۵۸۲	۰/۰۱۵۸۵	۲	۰/۰۱۶۳۳	۰/۰۱۶۱۷
۳	۱۳۹/۸۴	۱۶۷/۸۱	۳	۰/۰۱۶۱۳	۰/۰۱۶۰۴	۳	۰/۰۱۶۴۳	۰/۰۱۶۵۰
DELTA	۰	۵۵/۹۷	DELTA	۰/۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۲۳	DELTA	۰/۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۸۶
Rank	۲	۱	Rank	۱	۲	Rank	۱	۲

جدول ۱۰- نتایج حاصل از روش پیشنهادی تاگوچی در آزمایش های مختلف

شماره آزمایش ها									
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۳	۳	۳	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲	۲	۲	\dot{W}_1 - آرایه ها
۲	۱/۵	۱	۲	۱/۵	۱	۲	۱/۵	۱	\dot{W}_2
۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۲۹/۱۱	۲۹/۱۱	۲۹/۱۱	۱۹/۸۶	۱۹/۸۶	۱۹/۸۶	C ₁
۱۶۷/۸۱	۱۳۹/۸۴	۱۱۱/۸۴	۱۶۷/۸۱	۱۳۹/۸	۱۱۱/۸۴	۱۶۷/۸۱	۱۳۹/۸۴	۱۱۱/۸۴	C ₂
۲۹۱۵	۲۸۷۷	۲۸۴۹	۲۸۰۸	۲۹۲۹	۲۸۰۳	۲۸۶۱	۲۸۰۶	۲۷۴۶	C ₃
۳۵۷۶	۳۵۰۱	۳۵۲۳	۳۴۸۱	۳۵۴۸	۳۵۴۱	۳۵۴۰	۳۴۸۶	۳۴۴۸	C ₄
۰/۰۱۶۶۵	۰/۰۱۶۱۸	۰/۰۱۶۴۷	۰/۰۱۶۴۹	۰/۰۱۶۳۷	۰/۰۱۶۱۳	۰/۰۱۶۳۵	۰/۰۱۵۹۵	۰/۰۱۵۸۳	C ₅
۰/۰۱۶۰۴	۰/۰۱۶۱۶	۰/۰۱۶۱۹	۰/۰۱۵۶۱	۰/۰۱۵۹۰	۰/۰۱۵۹۵	۰/۰۱۶۰۵	۰/۰۱۵۴۹	۰/۰۱۶۱۰	C ₆



شکل ۱۶- ساختار کلی ماشین

۸- طراحی نهایی و جمع بندی نتایج

با توجه به مقادیر بهینه برای ضخامت روکش و آهنربای دائم که در بخش‌های قبلی بدست آمد، در این بخش، طراحی نهایی ماشین انجام می‌شود. چگالی حجمی آهنربای دائم (NdFeB NEOREC50H[®] TDK) و روکش محافظ (Titanium) به ترتیب ۷۵۰۰ و ۴۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ برای آهنربای دائم برابر با ۱۷۰ و برای روکش محافظ ۱۲۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون برای آهنربا (۰/۲۴) و آهنربای دائم (۰/۳۴) و در نهایت، ضریب انبساط حرارتی برای آهنربای دائم برابر با ۴ و برای روکش محافظ برابر با ۹ بر حسب (10⁻⁶/C) خواهد بود.

با توجه به این مقادیر مکانیکی ارائه شده در این بخش، تحلیل مکانیکی مدل بهینه‌سازی شده در نرم افزار تحلیل اجزاء محدود ABAQUS انجام شده است. برش عرضی از ساختار ماشین در نرم افزار SOLIDWORK به صورت شکل (۱۶) و شامل بخش‌های تعیین شده در شکل می‌باشد.

بعد از پیاده‌سازی در نرم افزار ABAQUS برای تحلیل، شکل (۱۷) مقادیر تنش و کرنش فون میسز برای روکش محافظ و آهنربای دائم را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۸) و شکل (۱۹) نرخ تغییرات مقدار حداکثر تنش و کرنش فون میسز را بر حسب تغییرات در ضخامت آهنربای دائم (W₂) نشان می‌دهد. جدول ۱۲ حداکثر تنش تسلیم برای مواد بکار رفته در روتور را نشان می‌دهد. در نهایت، با توجه به شکل (۱۷)، شکل (۱۸) و شکل (۱۹) و جدول ۱۱، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد مکانیکی روش پیشنهادی مناسب است.

بصورت کلی نتایج بدست آمده از روش تاگوچی را می‌توان بصورت زیر دسته بندی کرد.

ضخامت روکش محافظ به اندازه‌ی:

۵/۵۶٪ بر روی حداکثر تنش فون میسز روکش محافظ،

۴۱/۳۷٪ بر روی حداکثر تنش فون میسز آهنربای دائم،

۳/۴۸٪ بر روی حداکثر کرنش فون میسز روکش محافظ،

و ۶۰/۸۶٪ بر روی حداکثر کرنش فون میسز آهنربای دائم،

بیشتر از ضخامت آهنربای دائم تاثیر گذار است.

در حالت کلی، می‌توان نتایج به‌دست آمده از روش تاگوچی را به صورت جدول ۹ و جدول ۱۰ دسته‌بندی کرد. با توجه به اینکه، حداکثر تنش فون میسز آهنربای دائم به‌عنوان یک معیار مناسب برای تحلیل مکانیکی ماشین به حساب می‌آید، با توجه به مقادیر بدست آمده، این پارامتر در آزمایش اول و ششم دارای حداقل مقدار خود می‌باشد. در آزمایش اول ضخامت آهنربای دائم ۲ و روکش ۱ میلی‌متر می‌باشد.

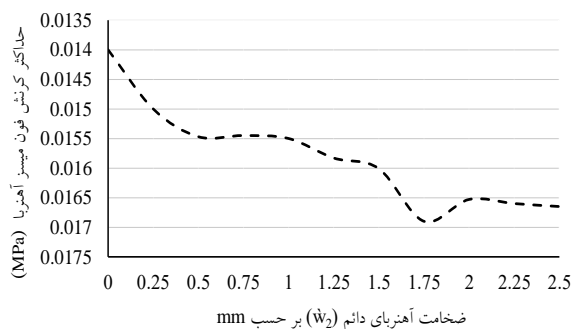
نتایج بدست آمده از روش تاگوچی نشان می‌دهد که در این مقادیر عملکرد ماشین مناسب نمی‌باشد و استحکام مکانیکی مناسب برای روتور تامین نخواهد شد. در آزمایش ششم، حداکثر تنش فون میسز آهنربای دائم از سایر حالت‌های دیگر کمتر است و هم‌چنین، حداکثر کرنش فون میسز آهنربای دائم هم نسبت به سایر حالت‌ها، در محدوده مناسبی قرار دارد.

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل تاگوچی، بهینه ترین مقدار برای دو آرایه متعامد ضخامت روکش محافظ (W₁) و ضخامت آهنربای دائم (W₂) به ترتیب ۲ و ۲/۵ میلی‌متر است. بعد از تعیین پارامترهای بهینه برای مقادیر ضخامت روکش محافظ (W₁) و ضخامت آهنربای دائم (W₂) در این بخش، فرایند بهینه‌سازی به اتمام می‌رسد.

جدول ۱۱- تنش تسلیم برای مواد بکار رفته در روتور

تنش تسلیم بر حسب (مگا پاسکال)	
VACOFLUX 48	۱۹۰-۲۰۰
Titanium	۷۲۹-۸۴۴
NEOREC 50H (TDK) NdFeB	۲۲۰-۲۸۰

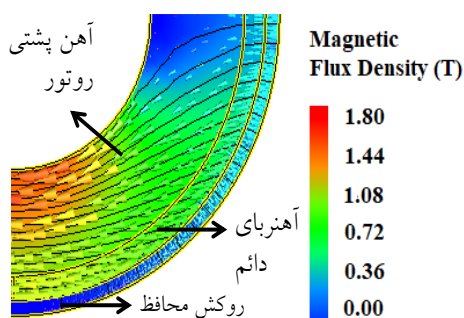
در بخش بعدی، طراحی الکترومغناطیسی و مکانیکی ماشین بر اساس پارامترهای بهینه بدست آمده از بخش‌های قبلی انجام می‌شود و نتایج با استفاده از روش اجزاء محدود اعتبارسنجی می‌شوند.



شکل ۱۹ - میزان تغییرات حداکثر کرنش فون میسز بر حسب تغییرات در $(\dot{W}2)$

۹- نتیجه گیری

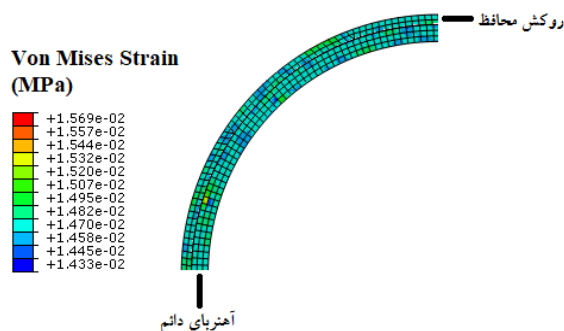
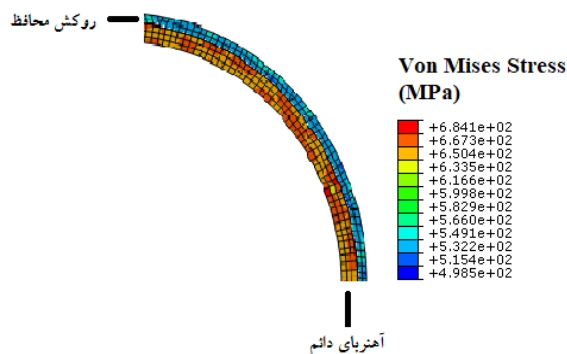
در ماشین های سنکرون مغناطیس دائم سرعت بالا، آهنربای دائم باید در مقابل نیروهای گریز از مرکز در سرعت های بالا محافظت شوند. یکی از این اقدامات، استفاده از روکش محافظ از جنس آلیاژهای غیر مغناطیسی در روتور است. در این حالت، یکی از مشکلاتی که رخ می دهد، افزایش تلفات ناشی از جریان های گردابی در روتور می باشد.



شکل ۲۰ - توزیع چگالی شار مغناطیسی روتور طرح نهایی

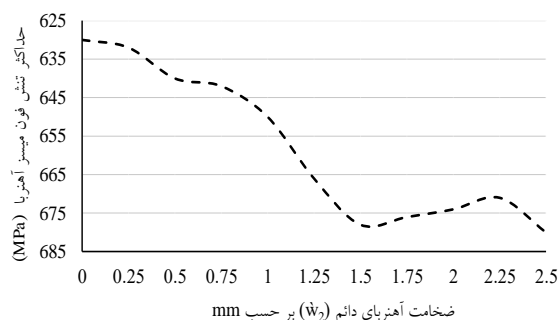
جدول ۱۲ - نتایج بهینه سازی

نرخ تغییرات	ط. نهایی	ط. اولیه	
۴۸/۰۵٪	۲/۰۰	۳/۸۵	ضخامت روکش [mm]
۱۶/۶۶٪	۲/۵۰	۳/۰۰	ضخامت آهنربای دائم [mm]
۲۹/۲۸٪	۱/۶۹	۲/۳۹	وزن روکش [Kg]
۱۶/۳۱٪	۲/۹۱	۳/۴۷	وزن آهنربای دائم [Kg]
۱/۹۴٪	۶۳/۳۸	۶۴/۶۴	وزن کل ماشین [Kg]
۹/۸۰٪	۹۳/۶۵	۱۰۳/۸۳	تلفات مس [w]
۰/۹۸٪	۱۰۲۲/۸۰	۱۰۳۲/۹۸	تلفات کل [w]
۲۲/۴۴٪	۰/۳۸	۰/۴۹	گشتاور دندانه ای
۰/۰۳٪	۹۷/۵۰	۹۷/۴۸	راندمان ^(۱)



شکل ۱۷ - نتایج تحلیل مکانیکی نهایی

ساختار پیشنهادی در سرعت کاری ۶۰ هزار دور بر دقیقه از نظر مکانیکی به درستی عمل می کند و ساختار روتور از هم پاشیده نخواهد شد. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی در حوزه الکترومغناطیسی، در ادامه شکل ۲۰ نحوه توزیع چگالی شار مغناطیسی و نحوه توزیع و جهت گیری خطوط شار را بعد از پیاده سازی و تحلیل ساختار ماشین در نرم افزار JMAG Designer 18.1 نشان می دهد. با توجه به این شکل می توان نتیجه گرفت که عملکرد الکترومغناطیسی طراحی نهایی مناسب بوده و ماشین در نقطه اشباع نخواهد بود. با توجه به طراحی نهایی، برخی از پارامترهای طراحی اولیه تغییر کرده و بهینه شده است که مهم ترین آن ها به شرح جدول ۱۲ خواهد بود.



شکل ۱۸ - میزان تغییرات حداکثر تنش فون میسز بر حسب تغییرات در $(\dot{W}2)$

یکی از راه‌های مقابله با این چالش، کاهش ضخامت روکش محافظ است. کاهش ضخامت روکش محافظ منجر به کاهش این تلفات می‌شود اما در مقابل استحکام مکانیکی روتور کم می‌شود. بنابراین روکش محافظ باید در بهینه ترین حالت طراحی شود تا عملکرد ماشین هم در حوزه مکانیکی و هم در حوزه الکترومغناطیسی مناسب باشد. در این مقاله، در ابتدا یک طراحی اولیه از ماشین انجام شده است. سپس با استفاده از روش بهینه‌سازی تاگوچی، بهینه ترین پارامترها برای ضخامت روکش محافظ (\dot{W}_1) و ضخامت آهنربای دائم (\dot{W}_2) تعیین می‌شود. با استفاده از این پارامترها، طراحی نهایی ماشین انجام می‌شود. مهمترین نتایج بدست آمده به شرح ذیل خواهند بود:

ضخامت روکش محافظ و آهنربای دائم به ترتیب به اندازه ۴۸/۰۵٪ و ۱۶/۶۶٪ کاهش پیدا کرده است. وزن روکش محافظ و وزن آهنربای دائم و وزن کلی ماشین به ترتیب ۲۹/۲۸٪، ۱۶/۳۱٪ و ۱/۹۴٪ کاهش پیدا کرده است. تلفات مس ۹/۸۰٪ و تلفات کل ماشین ۰/۹۸٪ کاهش پیدا کرده است. گشتاور دندانه‌ای نسبت به طراحی اولیه ۲۲/۴۴٪ کاهش یافته است و راندمان ۰/۰۲٪ بهبود پیدا کرده است. عملکرد طراحی نهایی ماشین هم در حوزه مکانیکی و هم در حوزه الکترومغناطیسی با استفاده از روش اجزاء محدود اعتبار سنجی شده است. نتایج بدست آمده از این مقاله برای طراحان و شرکت‌های تولیدی ماشین‌های الکتریکی مناسب خواهد بود.

فهرست علائم

علائم	توضیحات	علائم	توضیحات
f	فرکانس کاری ماشین (Hz)	B_{s1}	شیار استاتور در گوه (mm)
P_{cu}	تلفات مسی استاتور (W)	B_{s2}	شیار استاتور در پایین (mm)
Eff	راندمان ن (%)	δ	تداخل بین روکش محافظ و آهنربا
q	تعداد شیار بر قطب بر فاز	D	قطر استاتور در سمت فاصله هوایی (mm)
r	شعاع فاصله هوایی (mm)	D_I	قطر خارجی استاتور (mm)
T	گشتاور (N.m)	D_r	قطر روتور در سمت فاصله هوایی (mm)
T_{cog}	گشتاور دندانه-ای (N.m)	$E_{e,s}$	مقاومت dc سیم پیچ (Ω)
T_{rc}	ضخامت روتور (mm)	R_m	ضخامت آهنربا و سیم پیچ
T_{sc}	ضخامت استاتور (mm)	n_s	ضریب امنیت
T_{sw}	عرض دندانه	p	تعداد قطب-ها
		P_{core}	تلفات هسته ماشین (W)
		σ_{equ}	تنش معادل (pa)
		A_s	مساحت شیار استاتور (mm^2)
		B_n	n-آمین مؤلفه- هارمونی ک مکانی چگالی شار ف. هوایی باز شوند گی دهانه شیار استاتور در نوک
		R_{DC}	مقاومت dc سیم پیچ (Ω)
		R	شعاع داخلی مؤثر استاتور (mm)
		R_{se}	شعاع داخلی مؤثر استاتور (mm)
		R_r	شعاع خارجی
		L_m	شعاع س عکس العمل
		L	طول محوری ماشین
		L	طول فاصله هوایی فیزیکی (mm)
		L	چگالی شار در دندانه استاتور (T)
		L	مقاومت dc سیم پیچ (Ω)
		L	شعاع داخلی مؤثر استاتور (mm)
		L	شعاع خارجی
		L	شعاع س عکس العمل

استاتور (Kg)	خلاء (H/m)	استاتور (mm)	استاتور (mm)	هسته روتور (mm)	آرماتور (H)
وزن دندان- های	ضریب نفوذپذیری آهنربا (H/m)	ارتفاع گوه شیار استاتور (mm)	وزن فریم ماشین (Kg)	ضخامت فریم ماشین (mm)	اندوکتان س نشتی سیم پیچ انتهایی (H)
W_{st}	μ_r	H_{sl}	W_{fm}	t_{frame}	L_{sle}
وزن سیم- پیچی استاتور (Kg)	فشار مماسی (N/m ²)	ارتفاع گوه تا پایین شیار استاتور (mm)	وزن آهنرب ای دائم (Kg)	گام دندان بر حسب درجه الکتریکی	حداکثر گشتاور اعمالی به محور (N.m)
W_s	P_0	H_s	W_p	α_t	T_{max}
w		i			
وزن کلی ماشین (Kg)	تعداد شیار- های استاتور	آزمایش در روش تاگوچی آزمایش در روش تاگوچی	وزن هسته روتور (Kg)	ضریب انبساط حرارتی (10 ⁻⁶) (°C)	ضخامت آهنربای دائم در مسیر موازی (mm)
W_t	N_s	j	W_{rc}	α_T	\dot{w}_2
l_f	K_c				
ضریب تورق	تنش در جهت شعاعی (σ_R)	چگالی جریان استاتور (A/mm ²)	وزن روکش محافظ (Kg)	جابجایی در جهت شعاعی (mm)	ضخامت روکش (mm)
L_{sl}	σ_R	J_s	W_s	u_R	\dot{w}_1
اندوکتانس نشتی استاتور (H)	تنش در جهت مماسی (σ_θ)	تعداد دور بر فاز برای سیم- پیچ استاتور	وزن هسته	ضریب نفوذپذیری	ارتفاع نوک دندان
L_{sls}	σ_θ	N_c	W_{sc}	μ_0	H_{s0}
اندوکتانس نشتی شیار استاتور (H)					

مراجع

- [1] Rode, Ashwin, Tamma Carleton, Michael Delgado, Michael Greenstone, Trevor Houser, Solomon Hsiang, Andrew Hultgren et al. "Estimating a social cost of carbon for global energy consumption." *Nature* 598, no. 7880 (2021): 308-314.
- [2] Parivar, Hossein, Mojtaba Shivaie, Ahmad Darahi, and Meisam Ansari. "An efficient direct torque control strategy for a doubly fed induction generator (DFIG) in wind energy conversation systems." In 2021 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), pp. 1-5. IEEE, 2021.
- [3] Bensalah, Amina, Georges Barakat, and Yacine Amara. "Electrical generators for large wind turbine: Trends and challenges." *Energies* 15, no. 18 (2022): 6700.
- [4] Parivar, H., and A. Darabi. "Design and Modeling of a High-Speed Permanent Magnet Synchronous Generator with a Retention Sleeve of Rotor." *International Journal of Engineering* 34, no. 11 (2021): 2433-2441.
- [5] Parivar, Hossein, and Ahmad Darabi. "Taguchi Method for Design and Optimization of a High-Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Protected by Retention Sleeve." *Engineering and Applied Sciences* 7, no. 2 (2022): 21-28.
- [6] Khan, Hamid Ali, Faisal Khan, Naseer Ahmad, and Jong-Suk Ro. "Analysis and design of novel high speed permanent magnet machine considering magnet eddy current loss." *IEEE Access* 8 (2020): 135675-135685.
- [7] Khan, Hamid Ali, Faisal Khan, Surat Khan, Naseer Ahmad, Jahangeer Badar Soomro, and Irfan Sami. "Design and performance investigation of 3-slot/2-pole high speed permanent magnet machine." *IEEE Access* 9 (2021): 41603-41614.
- [8] Wang, Wuqiang, Yong Li, Dajun Huan, Xiaodong Chen, Hongquan Liu, Yanrui Li, and Lisha Li. "Research on stress design and manufacture of the fiber-reinforced composite sleeve for the rotor of high-speed permanent magnet motor." *Energies* 15, no. 7 (2022): 2467.

- [9] Duan, Chongwei, Hong Guo, Wei Xing, Wei Tian, and Jinqian Xu. "Design and analysis of a 120kW high-speed permanent magnet motor with a novel evaporative cooling configuration for centrifugal compressor." In 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 393-397. IEEE, 2018.
- [10] Qu, Wanjun, Zilong Guo, Zhongwu Mu, Yuqing Xing, and Ruolin Liang. "Research on mechanical characteristics of high-speed permanent magnet motor." In 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), pp. 1-2. IEEE, 2020.
- [11] Huang, Ziyuan, Jiancheng Fang, Xiquan Liu, and Bangcheng Han. "Loss calculation and thermal analysis of rotors supported by active magnetic bearings for high-speed permanent-magnet electrical machines." IEEE Transactions on Industrial Electronics 63, no. 4 (2015): 2027-2035.
- [2] Ding, W. A. N. G., S. H. E. N. Qiping, C. H. E. N. Xin, and H. A. N. Li. "Electromagnetic analysis of compound excitation high speed permanent magnet synchronous motor." In 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1-6. IEEE, 2019.
- [13] Yi, Lingzhi, and Xinjian Yin. "Optimization of magnetic pole structure of high-speed permanent magnet synchronous motor weakens cogging torque." In 2020 IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), pp. 1-5. IEEE, 2020.
- [14] Hong, Zhao-feng, Zhen-yu Cheng, and Yun-chong Wang. "Large-airgap high-speed permanent magnet machines for flywheel system applications." In 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1936-1939. IEEE, 2020.
- [15] Yin, Xiliang, Haipeng Geng, Hao Lv, Hao Xu, and Yonghong Qi. "Analysis of Thermal Characteristics of 10Kw High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor." In 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pp. 192-197. IEEE, 2019.
- [16] Jun, Hyun-Woo, Ju Lee, Hyung-Woo Lee, and Won-Ho Kim. "Study on the optimal rotor retaining sleeve structure for the reduction of eddy-current loss in high-speed SPMSM." IEEE Transactions on Magnetics 51, no. 3 (2015): 1-4.
- [17] Du, Guanghui, Wei Xu, Na Huang, Xin Cheng, and Xinyu Xiao. "Rotor design of high power high speed permanent magnet machine considering multiphysics constraints." In 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1-5. IEEE, 2019.
- [18] Fukushima, Toshihide, and Masahide Ooshima. "Combination of pole number of motor and suspension windings and the influence on suspension force in bearingless motors." In 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 44-49. IEEE, 2020.
- [19] Zhang, Yue, Sean McLoone, and Wenping Cao. "High speed permanent magnet motor design and power loss analysis." In 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), pp. 1-6. IEEE, 2017.
- [20] Zhang, Zhongming, Zhiqian Deng, Cong Gu, Quanguai Sun, Cong Peng, and Gucai Pang. "Reduction of rotor harmonic eddy-current loss of high-speed PM BLDC motors by using a split-phase winding method." IEEE Transactions on Energy Conversion 34, no. 3 (2019): 1593-1602.
- [21] Li, Yuanwen, Changsheng Zhu, Lijian Wu, and Yuting Zheng. "Multi-objective optimal design of high-speed surface-mounted permanent magnet synchronous motor for magnetically levitated flywheel energy storage system." IEEE Transactions on Magnetics 55, no. 7 (2019): 1-8.
- [22] Liu, Lin, Youguang Guo, Gang Lei, and Jianguo Zhu. "Design and Analysis Technologies of High Speed Permanent Magnet Machines." In 2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), pp. 1-6. IEEE, 2021.
- [23] Zwyssig, Christof, Simon D. Round, and Johann W. Kolar. "An ultrahigh-speed, low power electrical drive system." IEEE Transactions on Industrial Electronics 55, no. 2 (2008): 577-585.
- [24] Shen, Qiping, Ziyao Zhou, Shan Li, Xinglin Liao, Tao Wang, Xiaorong He, and Jingshan Zhang. "Design and analysis of the high-speed permanent magnet motors: A review on the state of the art." Machines 10, no. 7 (2022): 549.
- [25] Bianchi, Nicola, Silverio Bolognani, and Paolo Frare. "Design criteria for high-efficiency SPM synchronous motors." IEEE Transactions on energy conversion 21, no. 2 (2006): 396-404.
- [26] Wrobel, R., and P. H. Mellor. "The use of a genetic algorithm in the design optimisation of a brushless DC permanent magnet machine rotor." In Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2004), vol. 2, pp. 823-827. IET, 2004.

- [27] Wang, J. "Design optimisation of a miniature multi-pole permanent magnet generator." (1999): 128-132.
- [28] Robinson, Jacob, and Yahya Rahmat-Samii. "Particle swarm optimization in electromagnetics." IEEE transactions on antennas and propagation 52, no. 2 (2004): 397-407.