

Design of mechanical components for Brushless DC Motor

Mojtaba Esmailian ^{a*}, Farzad Boroumand ^b

^{a*} Faculty of Mechanical engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

^b Faculty of Mechanical engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Esmailian M, Boroumand F. Design of mechanical components for Brushless DC Motor. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022; 2(3)347-364.

 <https://10.52547/masm.2.3.347>.

KEYWORDS

Brushless DC Motor,
Design of mechanical
Components,
Static analysis.

ABSTRACT

The purpose of this research is to design mechanical components for making a brushless direct current motor. One-piece rotor and shaft are used in the design of this engine, and the hollow rotor is intended to access the interior space and reduce weight. Considering the magnetic flux density and taking into account the required strength of the rotor to withstand loads, 52 St steel is used and high strength epoxy pipe glue is used to connect the magnet and the rotor. In order to check the strength of the engine, engine components including power transmission parts and engine installation components were analyzed. The effect of centrifugal force on the normal stress created on the rotor, the effect of the transmission torque from the rotor in creating torsional stress on the shaft, the amount of shear stress at the connection between the magnet parts and the rotor and the amount of stress on the base parts and the required screw force. were analyzed by Nastran software to restrain the force due to the weight of the engine on the engine support bases. According to the stress analysis of the rotor and shaft, by choosing St-52 steel for these parts, a reliability of 2.58 has been obtained. The analysis of the shear stress of the connection between the magnets and the rotor indicates the proper connection of these parts by the glue used in this research with an acceptable reliability of 1.61.

Extended Abstract

1. Introduction

The use of permanent magnets to create a permanent flux in the air gap creates a harmonious structure along with a robust design of an induction motor. Permanent magnet motors have features such as high-power density, high efficiency and suitable thermal characteristics and are used in many industries [1]. Direct current rotors have been used as servomotors for many years due to their high efficiency and suitable structure. Brushless direct current motors have the same appearance characteristics as permanent magnet synchronous motors, so they are called brushless DC motors. These engines also have high efficiency and power density and are a suitable option for use in industries [2]. In the last years, the brushless direct current motor has received attention and research has been carried out in the field of designing and manufacturing brushless direct current motors. The purpose of this research is to design mechanical parts for the construction of a 9Kw brushless permanent magnet motor. For the electric motor in this research, the power transmission parts include the rotor and the shaft, are considered as a single piece. Also, in order to access the space inside the rotor and reduce the weight, the rotor is considered hollow. The geometric dimensions of this part are designed based on the spatial limitation of the geometry of the stator and magnet parts, as well as on the basis of creating sufficient strength to transmit the required torque and power. Considering the amount of magnetic flux density and the required strength in the rotor to bear the loads on it, St-52 steel has been chosen as the material used in the rotor. Also, to connect magnets and rotor, 300 kg high-strength UHU PLS glue made of fully adhesive epoxy rototube suitable for heavy work (above 23000 N/cm) has been used. This glue is resistant to impact and heat (from -20 to 100 degrees Celsius) and is resistant to moisture, oil, dilute acids, organic substances and many solvents. In order to check the strength

* Corresponding author. Tel.: 09131094078

E-mail address: mojtaba_iut@yahoo.com

DOI: <https://10.52547/masm.2.3.347>.

Received: December 4, 2022; Received in revised form: December 19, 2022; Accepted: December 21, 2022.

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



of the engine in this research, engine components including power transmission parts and engine installation components have been analyzed. As a result of the effect of centrifugal force in the normal stress created on the rotor, the effect of the transmission torque from the rotor in creating torsional stress on the shaft, the amount of shear stress at the connection point of the magnet parts to the rotor and the amount of stress on the base parts, and the required force of the screws to restrain the force due to the weight of the engine on the engine support stand was analyzed by Nastran software.

2. The design of brushless permanent magnet motor components

Figure 1 shows the three-dimensional cut view of the engine to show the engine components and how they are connected to each other.

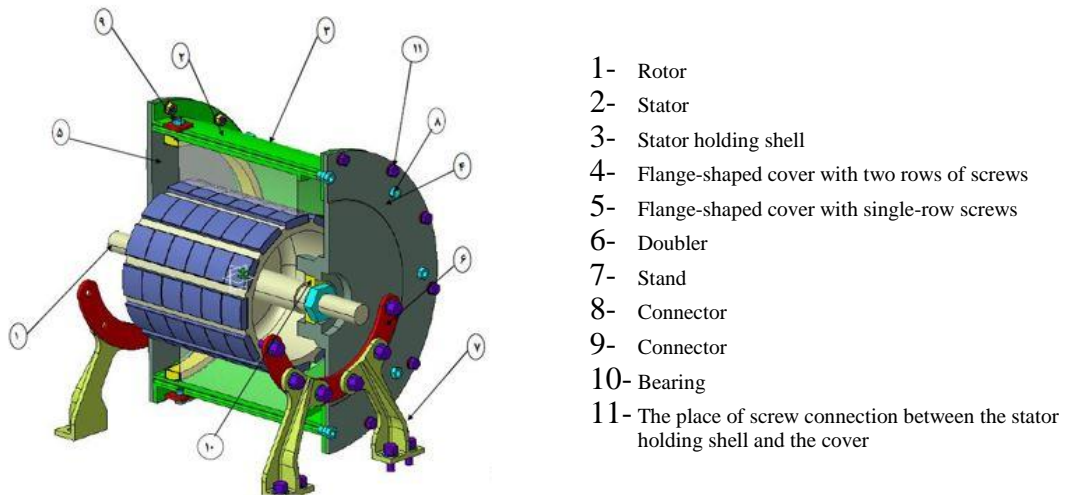


Figure 1 3D cut of the engine with its components

3. Strength analysis of engine components

In this research, the strength of the power transmission parts and the strength of the engine installation components were studied and investigated. For this purpose, stress analysis on the mentioned components has been used. Figure 2-a shows the 3D model of the one-piece part of the rotor and shaft, and Figure 2-b shows the model along with the magnet parts placed on the rotor.

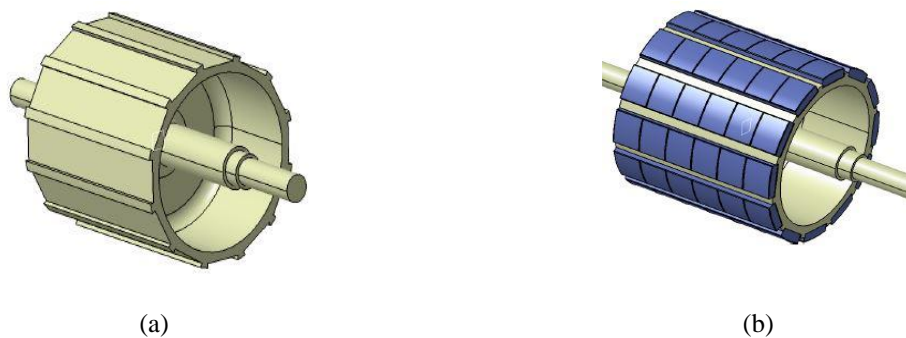


Figure 2 model a) shaft and rotor parts b) with magnet parts

Patran-nastran software is used for stress analysis and strength evaluation of engine parts. Figure 3 shows the meshing model in the software. The type of mesh used in the model is tet4 type of tetrahedral element.

The forces causing tension on the power transmitting part are as follows:

- 1- Centrifugal force
- 2- Transmission torque from the engine

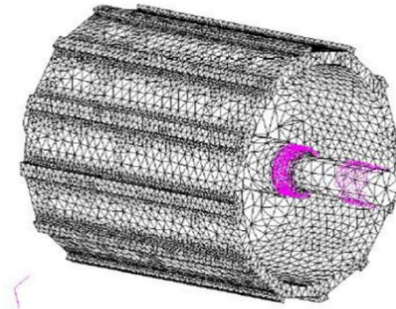


Figure 3 The meshing model in the software

In figure 4, the stress analysis due to centrifugal force is shown. The engine speed considered for this analysis is equal to 1400 rpm. The maximum stress occurs on the surface of the rotor, as can be seen, is less than 2 MPa and occurs on the surface of the rotor.

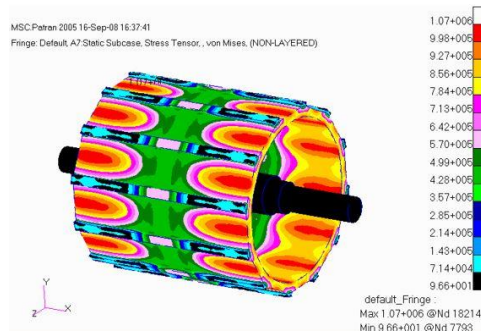


Figure 4 Stress analysis due to centrifugal force

Transmitted torque from the rotor leads to torsional stress on the shaft. Figure 5 shows the analysis of Van Mises stress caused by the combined effect of engine transmission torque and centrifugal force. Due to the fact that the amount of stress caused by the centrifugal force is insignificant compared to the stress caused by the torsional torque of the shaft and rotor, the design and dimensional changes of the part should be done based on the torsional torque. The maximum Van Mises stress occurs at the location of the bearing installation stage and is equal to 116 MPa. Considering that the material considered for the rotor and shaft part is steel with the characteristics of st-52, the safety factor considered for the strength of this part, according to equation 2, is equal to 2.58.

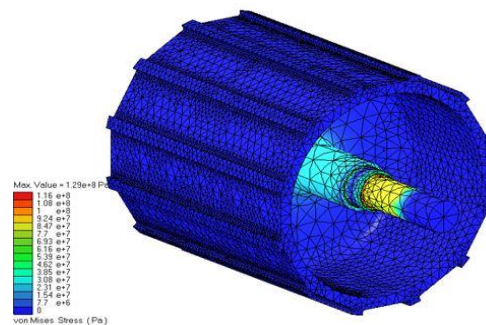


Figure 5 Analysis of stress and strain caused by the combined effect of engine transfer torque and centrifugal force

$$S_y = 300(MPa) \rightarrow n = \frac{300}{116} = 2.58 \quad (1)$$

In this research, the shear stresses created at the connection point of the magnet parts to the rotor have been investigated and analyzed. Figure 6-a shows the Mises stress created on the entire rotor model. The maximum

stress created in the stair of the smallest diameter of the shaft was equal to 119.3 Mpa. Figure 6-b shows the stress graph of the cut model. The amount of stress at the connection point of the shaft to the rotor is equal to 400 Kpa. By removing the shaft from the stress graph, the maximum stress occurs on the surface of the rotor due to the center lateral force. Figure 6-c shows this issue. In this figure, it is clear that the tension created at the base of the contact edge of the magnets has a smaller value. In Figure 6-d, the stress created at the base of the contact edge is shown as a section of the model that shows the contact point of the magnet. The maximum Van Mises stress at the base of the edge is reported to be less than 1.15 MPa.

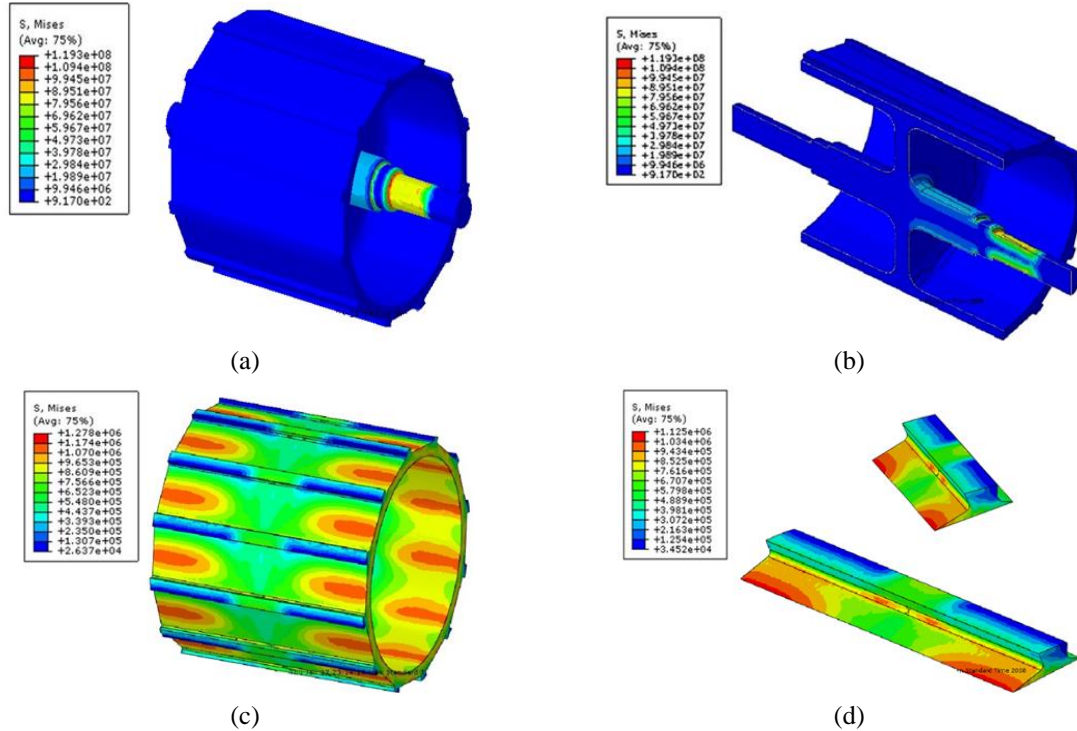


Figure 6 a) Mises stress graph created on the entire rotor model b) The stress graph of the cut model c) Maximum stress on the surface of the rotor by removing the shaft and due to the center lateral force d) The stress created at the base of the contact edge of the magnet contact area

In Figure 7, the four mounting legs of the motor are shown in the case that the center of gravity of the motor under the load of N1000 is in the Y direction of the coordinate system. The purpose of analyzing the strength of engine mounting components is to check the stress on the base parts and calculate the required force of the screws to restrain this external force. As seen in Figure 8, the maximum Van Mises stress created on the base parts is calculated to be 18.5 MPa.

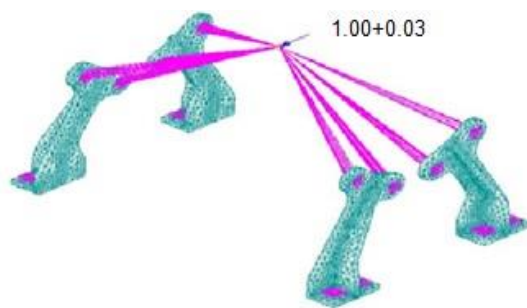


Figure 7 Engine mounting stand

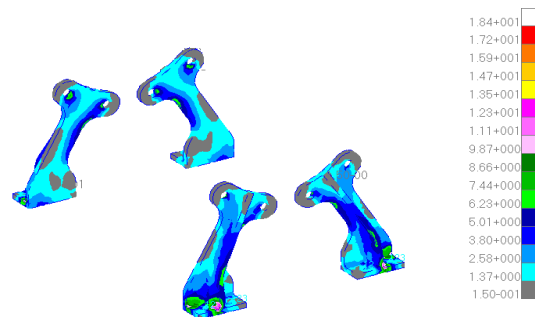


Figure 8 The maximum Van Mises stress created on the stand parts

4. Conclusion

The following results were obtained in this research:

- Design of components and arrangement of engine parts
- Selecting standard components and determining the material of the parts

- Strength analysis of engine components including power transmission parts and engine support parts
- Selection of steel material st-52 for the shaft and rotor and obtaining a reliability factor of 2.58 in the designs according to the stress analysis of the loads on the shaft and rotor.
- Selection of 300 kg UHU PLS adhesive with high strength to connect the magnet to the rotor and obtain a reliability factor of 1.61 in the designs according to the shear stress analysis created in the connection area of the magnet and the rotor.
- Selection of steel screws of type M8 and grade 8.4 with a safe load of 310 MPa for use in the engine support stand, which provides a safety factor of more than 10.



طراحی اجزای مکانیکی یک موتور مغناطیس دائم

مجتبی اسماعیلیان^{الف*}، فرزاد برومند^ب

^{الف} پژوهشگر، گروه مهندسی مکانیک ساخت و تولید، مجتمع مکانیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، Mojtaba@mut-es.ac.ir
^ب دکتری، گروه مهندسی مکانیک ساخت و تولید، مجتمع مکانیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران،
boroumandfarzad@birjand.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
موتور مغناطیس دائم، طراحی اجزاء مکانیکی، تحلیل استاتیکی.	هدف از این تحقیق طراحی اجزای مکانیکی جهت ساخت یک موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک می باشد. در طراحی این موتور، از روتور و شافت یک پارچه استفاده شده و جهت امکان دسترسی به فضای داخل و کاهش وزن، روتور به صورت توخالی در نظر گرفته شده است. با توجه به میزان چگالی شار مغناطیسی و در نظر گرفتن استحکام مورد نیاز در روتور جهت تحمل کردن بارهای وارد بر آن، فولاد St-52 و برای اتصال بین آهن رباها و روتور از چسب با استحکام بالا، ساخته شده از روتیوب اپوکسی، استفاده شده است. به منظور بررسی استحکام موتور، اجزای موتور شامل قطعات انتقال دهنده قدرت و اجزای نصب موتور مورد آنالیز قرار گرفتند. اثر نیروی گریز از مرکز در تنش نرمال ایجاد شده بر روی روتور، اثر گشتاور انتقالی از روتور در ایجاد تنش پیچشی بر روی شافت، میزان تنش برشی در محل اتصال قطعات آهن ربا به روتور و میزان تنش وارد بر قطعات پایه و نیروی لازمه پیچها برای مهار نیروی وارده بر اثر وزن موتور بر پایه های نگه دارنده موتور، توسط نرم افزار نسترن تحلیل گردید. با توجه به تحلیل تنش روتور و شافت، با انتخاب فولاد St-52 برای این قطعات، ضریب اطمینان ۲/۵۸، به دست آمده است. تحلیل تنش برشی محل اتصال آهن رباها با روتور نشان دهنده اتصال مناسب این قطعات توسط چسب مورد استفاده در این تحقیق با ضریب اطمینان قابل قبول ۱/۶۱ می باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰	

۱- مقدمه

استفاده از مغناطیس های دائم برای ایجاد یک شار دائم در فاصله هوایی باعث ایجاد یک ساختار هماهنگ به همراه یک طراحی قوی از یک موتور آسنکرون القایی می شود. موتورهای مغناطیسی به دو دسته تقسیم می شود:

- موتورهای مغناطیس دائم جریان متناوب^۱
- موتورهای مغناطیس دائم جریان مستقیم^۲

موتورهای مغناطیس دائم دارای ویژگی هایی همچون چگالی توان بالا، بازده بالا و مشخصه حرارتی مناسب می باشند و در

¹ Alternating Current (AC)

² Direct Current (DC)

بسیاری از صنایع به کار گرفته می‌شوند [۱]. جریان مستقیم به دلیل کارایی بالا و ساختار مناسب برای سالیان متمادی به عنوان سروموتور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش کنترل موتورهای DC ساده است زیرا گشتاور تولیدی آن‌ها متناسب با جریان می‌باشد و به طور خطی جریان آرمیچر را دنبال می‌کند. علاوه بر این موتورهای DC دارای راندمان و پاسخ دینامیکی قابل قبولی هستند. اما کیفیت آن‌ها به خوردگی و در نتیجه به اصطکاک ایجاد شده در اثر تماس مکانیکی بین جاروبک‌ها و کموتاتور و جرقه‌های ناشی از آن محدود می‌شود. این امر باعث می‌شود که موتورهای DC به نگهداری و بازرسی و سرویس مداوم از قبیل تمیز کردن یا تعویض جاروبک‌ها نیازمند باشند.

موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک^۳ دارای مشخصات ظاهری مشابه با موتورهای سنکرون مغناطیس دائم است بنابراین آن را موتور DC بدون جاروبک می‌نامند. این موتورها نیز دارای بازده و چگالی توان بالا و گزینه مناسب جهت به‌کارگیری در صنایع، از جمله صنایع دریایی می‌باشند [۲]. استاتور موتور BLDC از ورق‌های فولادی که توسط پرچ به یک‌دیگر متصل شده‌اند، ایجاد شده است و سیم‌پیچ موتور در شیارهای آن جای گرفته است. همچنین در این موتورها آرمیچر بر روی استاتور قرار گرفته و میدان توسط آهنرباهای قرار گرفته بر روی روتور، به وجود می‌آید [۳]. موتورهای BLDC، پس از توسعه ترانزیستورها و دیگر تجهیزات کلیدزنی طراحی و ساخته شدند. اساس کار و تکنولوژی موتورهای بدون جاروبک، ایجاد کموتاسیون الکترونیکی بین سیم‌پیچ‌های فاز می‌باشد. این امر موجب بهتر شدن کنترل سرعت موتور می‌شود.

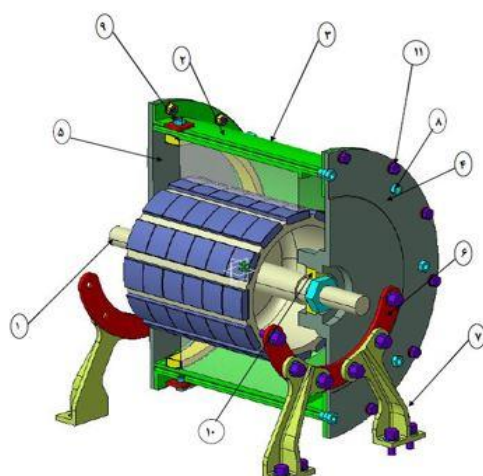
در چند دهه اخیر موتور جریان مستقیم بدون جاروبک مورد توجه قرار گرفته است و در زمینه طراحی و ساخت موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک تحقیقاتی انجام گرفته است. دامکی و همکاران [۱] به طراحی بهینه و ساخت موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک معکوس گرد جهت استفاده در سامانه‌های دریایی پرداختند. به دلیل محدودیت فضا و نیز عدم تبادل حرارتی با محیط، موتور طراحی شده باید ضمن داشتن چگالی توان بالا، بازده بالایی نیز داشته باشد آن‌ها برای این منظور با استفاده از معادلات الکترومغناطیسی حاکم بر موتور و به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک، ابعاد بهینه موتور با هدف افزایش چگالی توان را محاسبه نمودند. در انتها نیز موتور مورد نظر را ساخته و مورد تست قرار دادند و با نتایج غیر تجربی مقایسه نمودند. وانگ و همکاران [۴] یک موتور BLDC توان بالا با سیستم کنترل حلقه بسته به همراه مدار درایو از نوع پل H طراحی نموده و با بررسی نتایج عملکرد موتور، قبل و بعد از بارگذاری، اعلام نمودند که موتور در هر دو حالت دارای عملکرد قوی می‌باشد. در تحقیقات دیگری [۵-۷]، طراحی بهینه موتور BLDC مورد استفاده در وسایل نقلیه الکتریکی ارائه شده است. مارکویک و همکاران [۵] به طراحی بهینه موتور BLDC با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مدل المان محدود پرداختند و رسیدن به بیشترین بازده را مد نظر قرار دادند. جین چونگ [۶] نیز با استفاده از روش اجزای محدود به طراحی موتور برای وسایل نقلیه چرخ‌دار پرداخت و با بهینه نمودن موتور به توان خروجی ۵۷۰۰W و گشتاور ۱۵N.m و سرعت ۴۰۰۰rpm دست یافت. موتور طراحی شده توسط او قابل کاربرد در وسایل نقلیه الکتریکی می‌باشد. نیکام و همکاران [۷] به بررسی یک موتور با چگالی گشتاور بالا برای استفاده در وسایل نقلیه الکتریکی چرخ‌دار پرداختند و توانستند موتوری با راندمان بالا برای این منظور طراحی نمایند. در انتهای تحقیق آن‌ها، به منظور تایید طراحی، نمونه اولیه دستگاه ساخته شده و نتایج تجربی ارائه شده است. لی و همکاران [۸] در تحقیق خود، دو نوع موتور BLDC و BLAC از نوع روتور خارجی طراحی نمودند و در ادامه مشخصات این دو موتور را به وسیله نتایج حاصل از تحلیل عددی و آنالیز المان محدود با یک‌دیگر مقایسه نمودند. کارانایسلوانس و همکاران [۹] یک روش کلی برای طراحی موتور DC مغناطیس دائم بدون جاروبک را تشریح نمودند. آن‌ها در ادامه تحقیق خود، موتور طراحی شده را با استفاده از نرم‌افزار Magnet 7.1.1 مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. لی و همکاران [۱۰] به طراحی موتورهای BLDC از نوع اسپوک با چگالی توان بالا جهت کارهای با گشتاور بالا مانند کشش پرداختند. کیم و همکاران [۱۱] تعدادی از موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک از نوع اسپوک را با یکدیگر مقایسه و به طراحی یک موتور جدید از نوع اسپوک پرداختند. آن‌ها موتوری با چگالی توان بالا و در عین حال مقرون‌به-صرفه را طراحی نمودند. یانگ و همکاران [۱۲] طراحی و تحلیل یک موتور BLDC سرعت بالا جهت کاربرد در سانتریفیوژ را ارائه نمودند. برای تعیین مشخصات، موتور پیشنهادی با استفاده از روش نرخ بارگذاری بر اساس سرعت و توان اسمی طراحی

³ Brushless DC Motor (BLDC)

شده است. برای تایید پارامترهای طراحی، نتایج طراحی موتور مورد بررسی با سرعت 10000 rpm و توان 3 kw با نتایج شبیه سازی المان محدود دو بعدی آن مقایسه شده است. در ادامه به منظور اعتبارسنجی تجربی، نمونه اولیه ساخته شده است. نتایج اعتبارسنجی، تطابق خوب بین نتایج تجربی و نتایج شبیه سازی را نشان داد. چین و همکاران [۱۳] به طراحی یک موتور BLDC فشرده جهت عملکردهای حالت گذرا پرداخته اند. کریکچی و همکاران [۱۴] طراحی یک موتور مغناطیس دائم شار محور معکوس - گرد برای کاربردهای دریایی را ارائه نموده اند. آن ها اعلام نمودند که استفاده از یک ماشین با موتور شار محوری دارای چرخش معکوس روتورها، امکان بهبود وزن و کارایی را فراهم می نماید. آن ها همچنین نتایج تجربی حاصل از ساخت یک نمونه کوچک را در این تحقیق گزارش کردند. چویی و همکاران [۱۵] در تحقیق خود یک موتور مغناطیس دائم با قابلیت تحمل دمایی بسیار زیاد جهت سیستم رانش کشتی ها را طراحی نموده اند. آن ها در تحقیقات خود کارایی این موتورها در سرعت بالا و دمای بالا را مورد بررسی قرار داده اند. در انتها نیز به کمک طراحی های انجام شده، موتوری با قابلیت تحمل دمای بالا ساخته شده است. کومار و همکاران [۱۶] یک موتور BLDC با توان بالا جهت کاربرد در سامانه های زیر آب طراحی نموده اند. ژانگ و همکاران [۱۷] مدل سازی و شبیه سازی یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با سیستم کنترل گشتاور مستقیم به منظور استفاده در سامانه های دریایی را ارائه کردند.

هدف از این تحقیق طراحی قسمت های مکانیکی جهت ساخت یک موتور 9 Kw از نوع مغناطیس دائم بدون جاروبک می باشد. برای موتور الکتریکی مورد نظر، قطعات انتقال دهنده قدرت، شامل روتور و شافت بوده که در این تحقیق، روتور و شافت به صورت یک قطعه یکپارچه در نظر گرفته شده است. در ضمن روتور به صورت توخالی در نظر گرفته شده است تا امکان دسترسی به فضای داخل روتور وجود داشته باشد و بتوان وزن موتور را نیز کاهش داد. ابعاد هندسی این قطعه بر اساس محدودیت فضایی هندسه قطعه استاتور و قطعات آهن ربا و همچنین بر اساس ایجاد استحکام کافی برای انتقال گشتاور و توان لازم، طراحی شده است. با توجه به میزان چگالی شار مغناطیسی و در نظر گرفتن استحکام مورد نیاز در روتور جهت تحمل کردن بارهای وارد بر آن، فولاد St-52 به عنوان جنس به کاررفته در روتور انتخاب شده است. همچنین برای اتصال بین آهن رباها و روتور از چسب UHU PLS 300kg با استحکام بالا، ساخته شده از روتیوب اپوکسی کاملاً چسبنده و مناسب برای کارهای سنگین، استفاده شده است (بالاتر از 300 N/cm^2). این چسب در مقابل ضربه و حرارت مقاوم است (از -20°C تا 100°C) و در برابر رطوبت، روغن، اسیدهای رقیق، مواد آلی و بسیاری از حلال ها مقاومت می کند.

به منظور بررسی استحکام موتور در این تحقیق، اجزای موتور شامل قطعات انتقال دهنده قدرت و اجزای نصب موتور مورد آنالیز قرار گرفتند. در نتیجه اثر نیروی گریز از مرکز در تنش نرمال ایجاد شده بر روی روتور، اثر گشتاور انتقالی از روتور در ایجاد تنش پیچشی بر روی شافت، میزان تنش برشی در محل اتصال قطعات آهن ربا به روتور و میزان تنش وارد بر قطعات پایه و نیروی لازمه پیچ ها برای مهار نیروی وارده بر اثر وزن موتور بر چهارپایه نگه دارنده موتور، توسط نرم افزار نسترن تحلیل گردید.



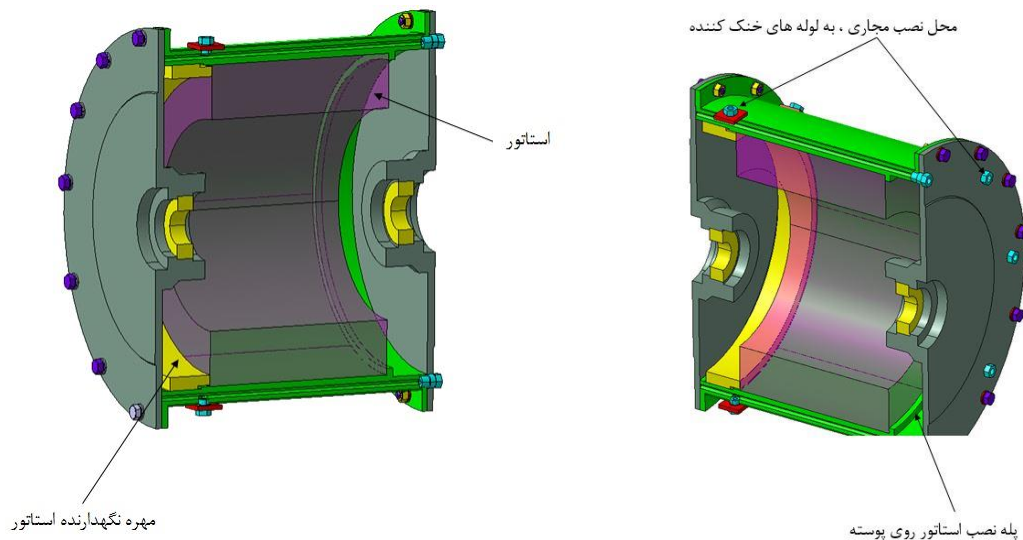
- ۱- روتور
- ۲- استاتور
- ۳- پوسته نگهدارنده استاتور
- ۴- درپوش فلنجی شکل با پیچ های دوردیفه
- ۵- درپوش فلنجی شکل با پیچ های یک ردیفه
- ۶- دولبر
- ۷- پایه
- ۸- کانکتور آب
- ۹- کانکتور آب
- ۱۰- بیرینگ
- ۱۱- محل اتصال پیچی بین پوسته نگهدارنده استاتور و درپوش

شکل ۱ نمای برش خورده سه بعدی موتور به همراه اجزاء تشکیل دهنده آن

۲- طراحی اجزای موتور مغناطیس دائم بدن جاروبک

شکل ۱ نمای برش خورده سه بعدی موتور را برای نمایش اجزاء موتور و چگونگی اتصال آن‌ها به یکدیگر نشان داده است. مطابق با شکل ۱، قطعه روتور و شافت با شماره ۱ نشان داده شده است و از جنس فولاد با مشخصه st-۵۲ در نظر گرفته شده است. پوسته نگه‌دارنده استاتور، ضمن نگه‌داشتن استاتور در موقعیت مناسب، به درپوش‌ها متصل می‌شود. جنس این قطعه از آلایژ آلومینیوم با مشخصه AI-۶۰۶۴-۲۳ در نظر گرفته شده است. جنس این قطعه باید مقاومت به خوردگی ناشی از تماس با سیال خنک‌کننده را فراهم کند.

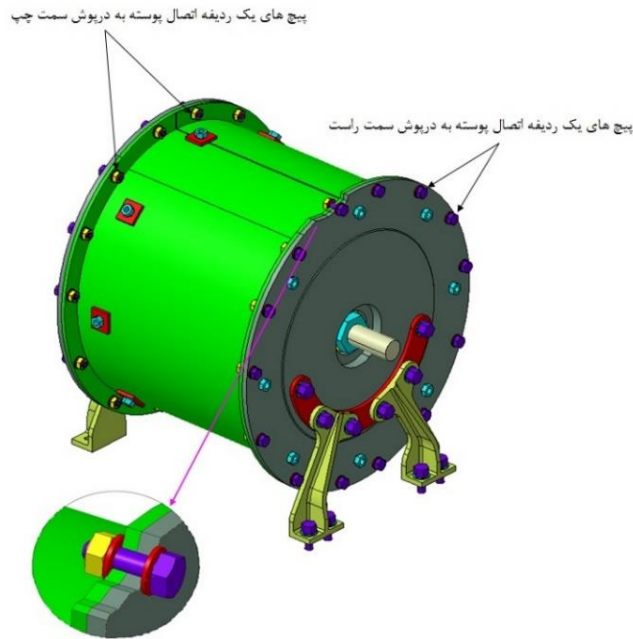
پس از آنکه قطعه استاتور درون پوسته جا زده شد، از طریق فلانچ پوسته روی درپوش به وسیله پیچ بسته می‌شود. درپوش، ضمن نگه‌داشتن قطعات روتور و استاتور در موقعیت مناسب، موتور را بروی پایه‌ها سوار می‌کند. قطعه کانکتور با شماره ۹، جریان سیال خنک‌کننده را در جهت شعاعی موتور به شیارهای در نظر گرفته شده، وارد می‌کند. در حالی که قطعه کانکتور با شماره ۸، جریان سیال خنک‌کننده را در جهت محوری موتور به شیارها وارد می‌کند. دلیل این تفاوت نحوه مونتاژ قطعات موتور است. در شکل ۲ چگونگی اتصال استاتور با پوسته نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جا زدن استاتور در پوسته تا رسیدن استاتور به پله در نظر گرفته شده ادامه می‌یابد و سپس یک مهره روی دیواره داخلی پوسته بسته شده و طرف دیگر استاتور را هم محکم می‌کند.



شکل ۲ نمایش نحوه اتصال استاتور با پوسته

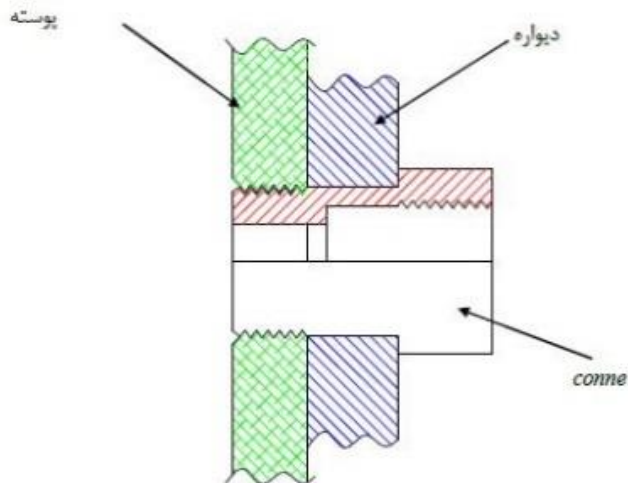
قطعه درپوش که در شکل ۱ با شماره ۴ نشان داده شده است، در واقع قطعه مونتاژ کننده اصلی بوده و فواصل صحیح بین قطعات را تأمین می‌کند. جنس این قطعه از آلایژ آلومینیوم با مشخصه AI-۶۰۶۴-۲۳ در نظر گرفته شده است. فلانچ قطعه شماره ۴ با فلانچ پوسته، به وسیله دو ردیف پیچ به هم متصل‌اند. قطعه شماره ۵ در شکل ۱، در پوش سمت چپ موتور است. تفاوت دو درپوش سمت راست و چپ در این است که درپوش سمت چپ با یک ردیف پیچ به پوسته استاتور وصل می‌شود و در ضمن لوله‌های خنک‌کننده موتور در سمت چپ، هیچ اتصالی با درپوش سمت چپ ندارند بلکه مستقیماً روی سطح بیرونی خود پوسته به مجاری پوسته متصل می‌شوند. در شکل ۴ اتصال پوسته و درپوش‌ها نشان داده شده است. قابل ذکر است که تمامی قطعات پیچ و مهره مربوط به اتصال پوسته و دو درپوش، همگی از یک نوع بوده و اندازه اسمی آن‌ها M6 می‌باشد.

قطعه دوپلر از آلایژ AI-۲۰۲۴ در نظر گرفته شده است. این قطعه جهت کاهش اثر تمرکز تنش روی درپوش به کار گرفته می‌شود. همچنین قطعه پایه که در شکل ۲ با شماره ۷ نشان داده شده است از جنس AI-۷۰۷۵-۲۶ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳ اتصال پوسته و درپوش ها

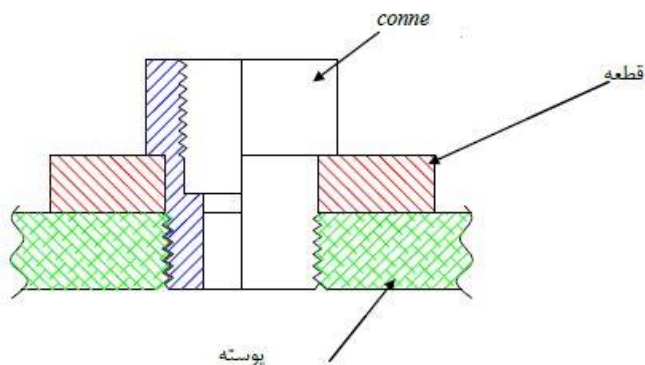
قطعه کانکتور که در شکل ۲ با شماره ۸ نشان داده شده است، می بایست دارای جنس مقاوم به خوردگی ناشی از تماس با سیال خنک کننده باشد. بنابراین آلیاژ فولادی برای این قطعه پیشنهاد می گردد. در شکل ۴، این قطعه به صورت برش خورده نشان داده شده است.



شکل ۴ نمای برش خورده قطعه کانکتور در موتور

و اما دیگر قطعه کانکتور که در شکل ۲ با شماره ۹ نشان داده شده است، هم جنس با قطعه کانکتور قبلی بوده و چگونگی اتصال آن با پوسته در شکل ۵ به صورت برش خورده نشان داده شده است.

قطعه بیرینگ که در شکل ۲ با شماره ۱۰ نشان داده شده است، از نوع رولربیرینگ معمولی با مشخصه 1006 nu می باشد. این بیرینگ دارای قطر داخلی 30 mm، قطر خارجی 55 mm و عرض 13 mm می باشد. همچنین بار اولیه در این بیرینگ برابر با 17900 (N) است.



شکل ۵ نمایش نمای برش خورده از محل اتصال کانکتور به پوسته

۳- تحلیل استحکامی اجزای موتور

در این تحقیق، استحکام قطعات انتقال دهنده قدرت و استحکام اجزای نصب موتور مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. برای این منظور از تحلیل تنش بر روی اجزای ذکر شده کمک گرفته شده است.

۳-۱- طراحی و آنالیز قطعات انتقال دهنده قدرت

برای موتور الکتریکی مورد نظر، قطعات انتقال دهنده قدرت، روتور و شافت می‌باشند که به صورت یک قطعه یکپارچه در نظر گرفته شده‌اند. ابعاد هندسی این قسمت بر اساس محدودیت فضایی هندسه قطعه استاتور و قطعه آهن‌ریا و همچنین بر اساس ایجاد استحکام کافی برای انتقال گشتاور و توان لازم طراحی می‌گردد.

بر اساس مشخصه توانایی، موتور باید توان ۹kw را در دور موتور ۱۲۰۰rpm انتقال دهد. بر این اساس گشتاور انتقالی مطابق با معادله ۱ قابل محاسبه است.

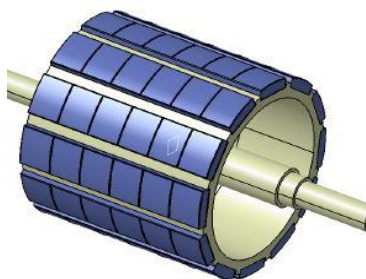
$$T = \frac{H}{n} = \frac{9000}{1200 * \frac{2\pi}{60}} = 71.62(kgf.m) \quad (1)$$

در شکل ۶- الف مدل سه بعدی پارت یک پارچه روتور و شافت نشان داده شده است و در شکل ۶- ب مدل به همراه قطعات آهن‌ریا کار گذاشته شده روی روتور نشان داده شده است. نیروهای ایجادکننده تنش روی پارت انتقال دهنده قدرت عبارت‌اند از:

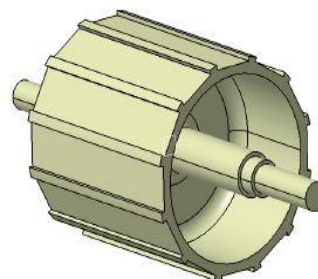
۱- نیروی گریز از مرکز

۲- گشتاور انتقالی از موتور

برای تحلیل تنش و ارزیابی استحکامی قطعات موتور از نرم افزار patran-nastran استفاده شده است. در شکل ۷ مدل المان‌بندی شده در نرم افزار مشاهده می‌شود. نوع المان استفاده شده در مدل، المان tetrahedral از نوع tet4 می‌باشد.

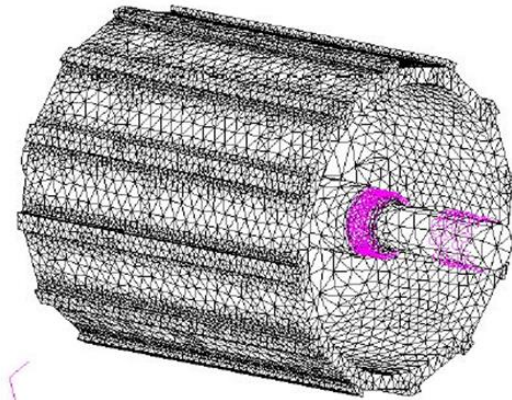


(ب)



(الف)

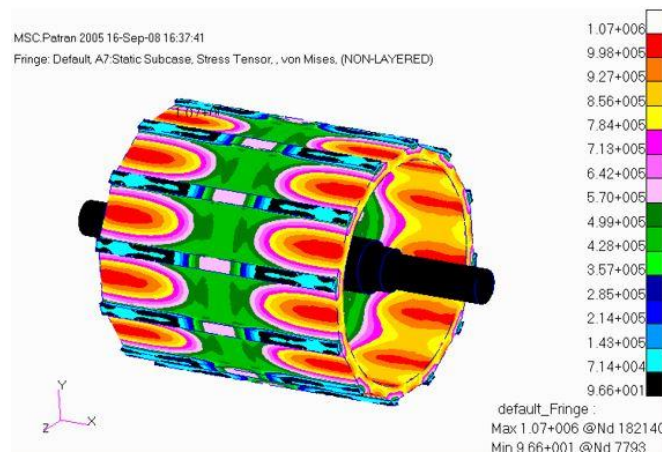
شکل ۶ مدل الف) پارت شفت و روتور ب) به همراه قطعات آهن‌ریا



شکل ۷ مدل المان بندی شده در نرم افزار

۳-۱-۱- اثر نیروی گریز از مرکز در تنش نرمال ایجاد شده روی روتور

در شکل ۸، آنالیز تنش ناشی از نیروی گریز از مرکز نشان داده شده است. دور موتور در نظر گرفته شده جهت این آنالیز برابر ۱۴۰۰ rpm می باشد. ماکزیمم تنش ایجاد شده روی سطح روتور همان طور که مشاهده می گردد، کمتر از ۲ MPa است و در سطح روتور اتفاق می افتد.

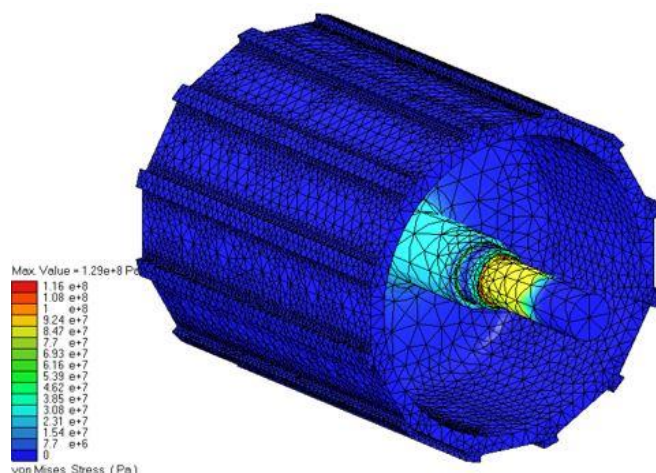


شکل ۸ آنالیز تنش ناشی از نیروی گریز از مرکز

۳-۱-۲- اثر گشتاور انتقالی از روتور

گشتاور انتقالی از روتور منجر به ایجاد تنش پیچشی بر روی شفت می گردد. در اینجا وضعیتی در نظر گرفته شده است که تمام گشتاور مصرفی از یک طرف شافت منتقل شود. در این حالت شافت متصل به روتور، فقط از طرفی که به مصرف کننده وصل است تحت تنش قرار می گیرد و طرف دیگر آن که هیچ گشتاوری را منتقل نمی کند تحت تنش پیچشی نیست. در شکل ۹ آنالیز تنش ون مایز ناشی از اثر توأم گشتاور انتقالی موتور و نیروی گریز از مرکز نشان داده شده است. با توجه به آن که مقدار تنش ناشی از نیروی گریز از مرکز نسبت به تنش ناشی از گشتاور پیچشی شافت و روتور ناچیز است، طراحی و تغییرات ابعادی پارت باید بر اساس گشتاور پیچشی انجام گردد. ماکزیمم تنش ون مایز در محل پله نصب بیرینگ اتفاق می افتد و برابر با ۱۱۶ MPa است. با توجه به آن که جنس در نظر گرفته شده برای پارت روتور و شافت، فولاد با مشخصه st-52 می باشد، ضریب ایمنی لحاظ شده برای استحکام این پارت، مطابق با معادله ۲ برابر با ۲/۵۸ می باشد.

$$S_y = 300(MPa) \rightarrow n = \frac{300}{116} = 2.58 \quad (۲)$$



شکل ۹ آنالیز تنش ون مایز ناشی از اثر توأم گشتاور انتقالی موتور و نیروی گریز از مرکز

به منظور اعتبار سنجی نتیجه نرم‌افزاری، یک تحلیل تنش دستی در محل ماکزیمم تنش انجام گردید. ماکزیمم تنش در محل پله مهره نگه‌دارنده بیرینگ، جایی که شفت کمترین قطر را دارد، اتفاق می‌افتد. قطر شفت در این محل ۲۲ میلی‌متر و قطر پله برابر با ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. در مدل سه‌بعدی آنالیز صورت گرفته، شعاع فیلت در محل پله 0.5mm لحاظ شده است. مطابق با جداول تعیین مرکز تنش [۱۸]، ضریب تمرکز تنش برابر $k_{ts} = 1/9$ به دست می‌آید. با توجه به معادلات ۳ تا ۵ تنش ون مایز به دست می‌آید.

$$\tau_s = \frac{T.C}{J} = \frac{71.6 \times 0.011}{\frac{\pi}{2}(0.011)^4} = 34.3(\text{MPa}) \quad (۳)$$

$$\tau_s(\text{actual}) = \tau_s \times k_{ts} = 65.17(\text{MPa}) \quad (۴)$$

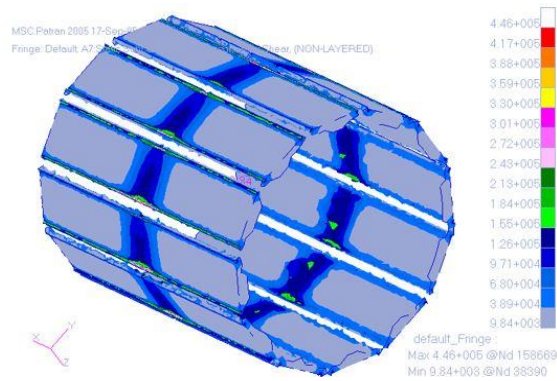
$$\sigma = \sqrt{3} \times 65.17 = 112.8(\text{MPa}) \quad (۵)$$

۳-۱-۳- تنش برشی اتصال بین آهن‌ربا و روتور

در این تحقیق، تنش‌های برشی ایجادشده در محل اتصال قطعات آهن‌ربا به روتور بررسی و تحلیل شده است. میدان مغناطیسی روی آهن‌رباها، از دو طریق می‌تواند گشتاور را به روتور انتقال دهد. یکی از طریق تماس آهن‌ربا با لبه تکیه‌گاهی شیارهای روتور و دیگری از طریق چسبندگی سطح تماس آهن‌رباها روی روتور. این که چه مقدار از گشتاور با کدام روش منتقل می‌شود، به شرایط مونتاژ و تلورانس در نظر گرفته شده بستگی دارد. اگر تمام گشتاور انتقالی توسط سطح چسبنده آهن‌ربا منتقل شود، باید تنش برشی ایجادشده در سطح چسبنده تعیین شود و با تنش برشی مجاز نوع چسب استفاده‌شده مقایسه گردد. شکل ۱۰ این آنالیز را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ کانتور رنگی توزیع تنش برشی روی سطح روتور، نشان داده شده است. به‌غیر از ناحیه نزدیک به قسمت میانی پارت، می‌توان گفت که تنش برشی در محل اتصال قطعات آهن‌ربا به روتور برابر با ۳۹KPa می‌باشد. در قسمت میانی پارت و درواقع در نقاط نزدیک به اتصال روتور با ضخامت میانی متصل به شافت، ماکزیمم تنش برشی به ۱۵۵KPa و یا 158kg/cm^2 هم می‌رسد.

با توجه به آن که حداکثر تنش برشی چسب مورد استفاده در اتصال قطعات آهن‌ربا مشخص و برابر 2500N/cm^2 می‌باشد، ضریب ایمنی لحاظ شده برای این اتصال مطابق با معادله ۶ برابر با $1/61$ می‌باشد.

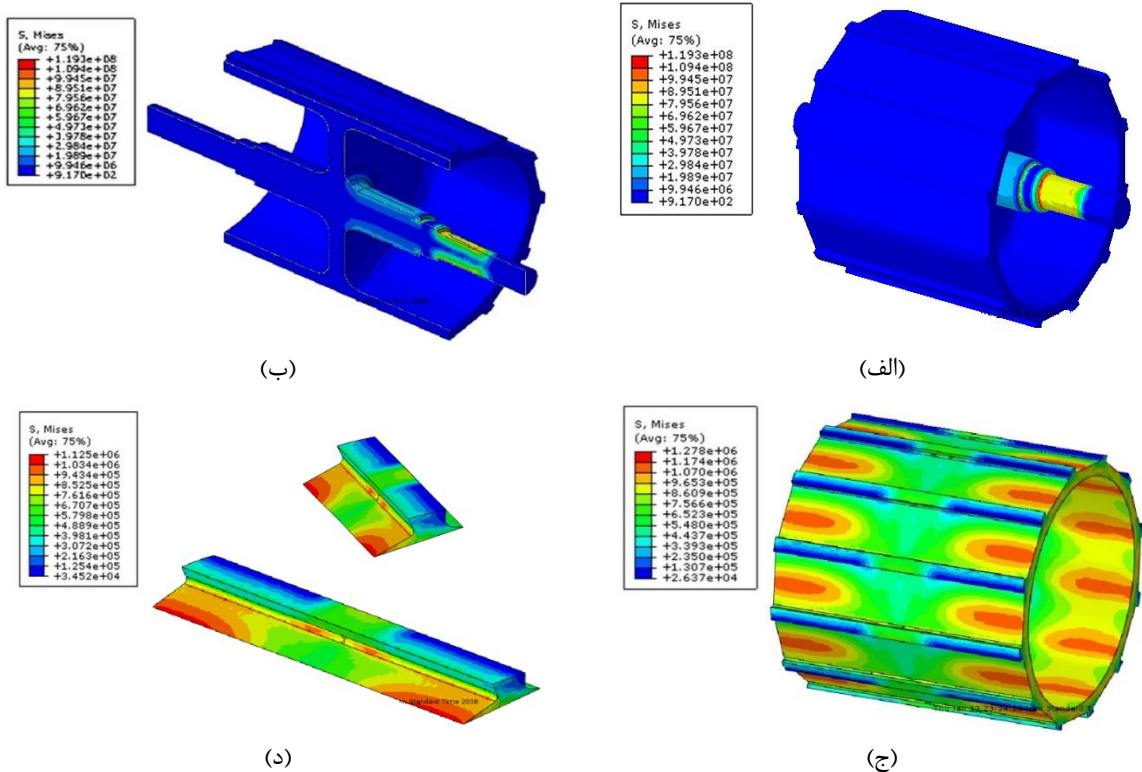
$$\tau_y = 2500 \left(\frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \right) = 255 \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \rightarrow n = \frac{255}{158} = 1.61 \quad (۶)$$



شکل ۱۰ کانتور رنگی توزیع تنش برشی روی سطح روتور

در حالت دیگر، وقتی تمام گشتاور از طریق لبه پله شیارهای روتور منتقل می‌شود، تنش مرکب برشی و خمشی در پای پله اتفاق می‌افتد. در اینجا یک آنالیز نرم‌افزاری دیگر با نرم‌افزار abaqus بر روی قطعه روتور انجام گرفته است. در بارگذاری و تعریف شرایط مرزی مدل، شتاب جانب مرکز با همان سرعت ۱۴۰۰ rpm اعمال شده و همچنین گشتاور پیچشی محاسبه شده در قسمت قبل بر روی لبه شیارهای روتور اعمال شده است. در این جا ضمن محاسبه تنش پای لبه تماس آهن‌ریها، نتیجه آنالیز به عنوان ارزیابی دیگری با نتیجه نرم افزار nastran مقایسه گردید.

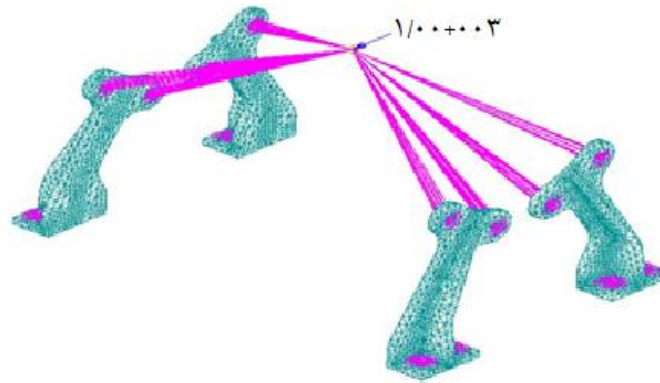
شکل ۱۱-الف گراف تنش مایز ایجاد شده بر روی کل مدل روتور را نشان می‌دهد. حداکثر تنش ایجاد شده، در محل پله کمترین قطر شفت اتفاق افتاده و برابر با ۱۱۹/۳ MPa شده است. در شکل ۱۱-ب گراف تنش مدل برش خورده نشان داده شده است. مقدار تنش در محل اتصال شفت به روتور برابر با ۴۰۰ KPa می‌باشد. با حذف شفت از گراف تنش، ماکزیمم تنش روی سطح روتور و در اثر نیروی جانب مرکز رخ می‌دهد. شکل ۱۱-ج این موضوع را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که تنش ایجاد شده در پای لبه تماس آهن‌ریها، مقداری کوچک‌تر دارد. در شکل ۱۱-د، تنش ایجاد شده در پای لبه تماس به صورت برش قسمتی از مدل که محل تماس آهن‌ری را نشان می‌دهد، نمایش داده شده است. حداکثر تنش ون مایز در محل پای لبه، کمتر از ۱/۱۵ MPa گزارش شده است.



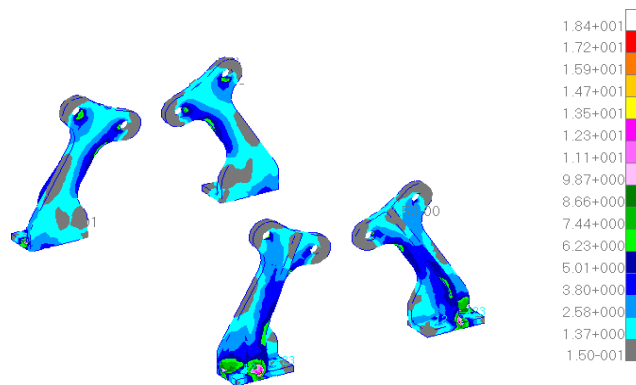
شکل ۱۱ الف) گراف تنش مایز ایجاد شده بر روی کل مدل روتور ب) گراف تنش مدل برش خورده ج) ماکزیمم تنش روی سطح روتور با حذف شافت و در اثر نیروی جانب مرکز د) تنش ایجاد شده در پای لبه تماس آهن‌ریها

۳-۲- تحلیل استحکامی اجزای نصب موتور

در شکل ۱۲، چهار پایه نصب موتور در حالتی که مرکز ثقل موتور تحت بار 1000 N در جهت Y از دستگاه مختصات باشد، نشان داده شده است. هدف از تحلیل استحکامی اجزای نصب موتور، بررسی تنش وارد بر قطعات پایه و محاسبه نیروی لازمه پیچ‌ها برای مهار این نیروی خارجی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود حداکثر تنش ون‌مایز ایجاد شده روی قطعات پایه برابر با $18/5\text{ MPa}$ محاسبه شده است.



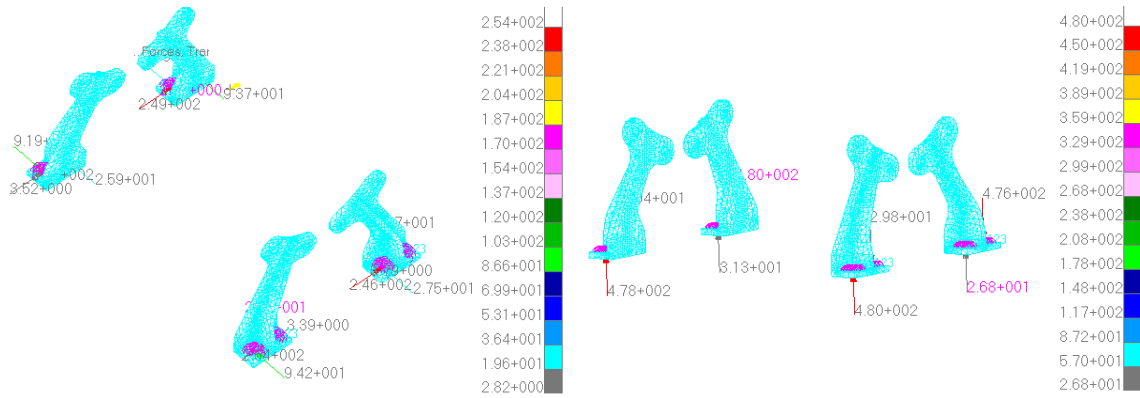
شکل ۱۲ چهار پایه نصب موتور



شکل ۱۳ حداکثر تنش ون‌مایز ایجاد شده روی قطعات پایه

در شکل ۱۴ حداکثر نیروی کشش پیچ‌های نگه‌دارنده تحت بار خارجی 1000 N در جهت محور Y ، نشان داده شده است. نیروی کششی حداکثر برابر 480 N ارزیابی می‌شود. در شکل ۱۵، حداکثر نیروی برشی پیچ‌ها تحت این بار، ارزیابی شده است که نیرویی برابر با 254 N را گزارش می‌دهد. در شکل ۱۶، تنش ایجاد شده روی پایه‌ها در وضعیتی که مرکز ثقل موتور تحت بار 1000 N در جهت X و یا در جهت محوری موتور قرار گرفته، نشان می‌دهد. حداکثر تنش ون‌مایز ایجاد شده روی قطعات پایه برابر با $86/7\text{ MPa}$ محاسبه شده است. در شکل ۱۷، حداکثر نیروی کشش پیچ‌های نگه‌دارنده تحت بار خارجی 1000 N در جهت محوری موتور، نشان داده شده است. نیروی کششی حداکثر برابر با 159 N ارزیابی می‌شود. در شکل ۱۸، حداکثر نیروی برشی پیچ‌ها تحت این بار، برابر با 202 N می‌باشد.

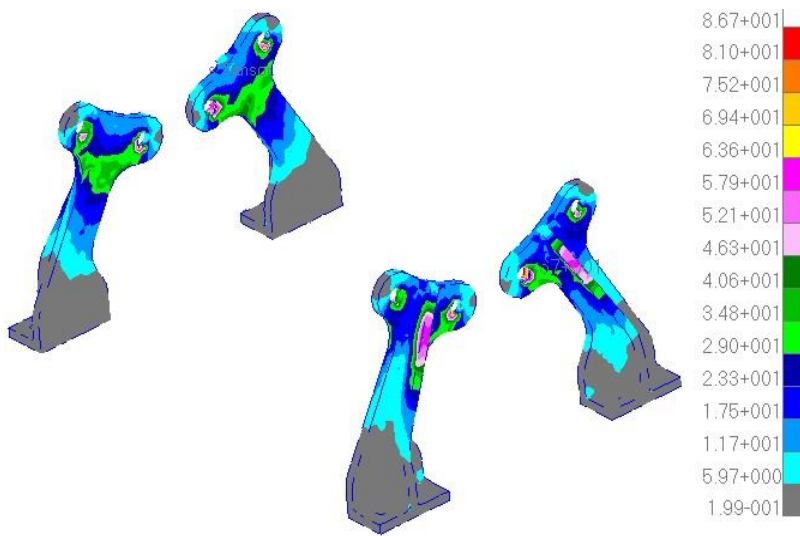
باید توجه شود که نیروی 1000 N به عنوان یک نیروی خارجی فرضی، برای ارزیابی استحکام پایه‌ها استفاده شده است، اما برای تعیین نوع پیچ‌های نصب پایه‌ها از نیرویی بزرگ‌تر و یا از یک ضریب ایمنی بالاتری باید استفاده شود. بر اساس نیروهای به‌دست‌آمده برای پیچ‌های پایه، و در نظر گرفتن ضریب ایمنی بزرگ‌تر از 10 ، از پیچ‌های فولادی M8 با گرید $4/8$ و بار اطمینان 310 MPa استفاده می‌شود.



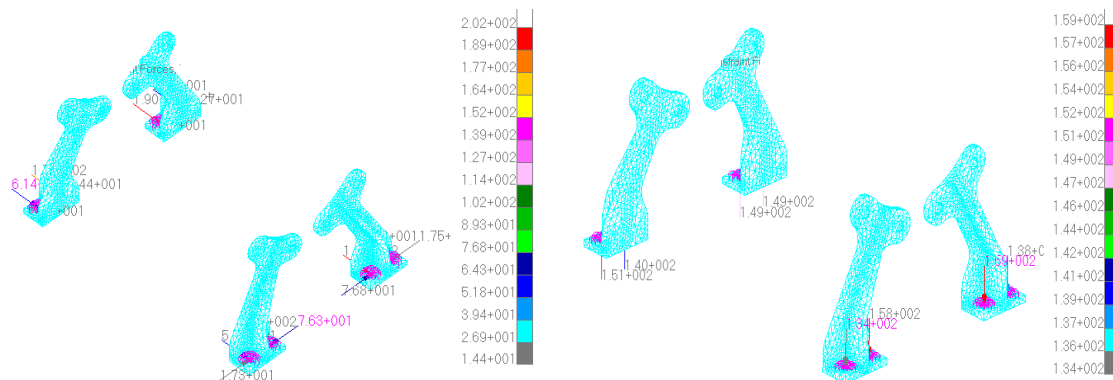
(ب)

(الف)

شکل ۱۴ حداکثر نیروی کشش پیچ‌های نگهدارنده تحت بار خارجی N ۱۰۰۰ در جهت محور Y برشی پیچ‌ها



شکل ۱۵ تنش ایجادشده روی پایه‌ها در وضعیت قرارگیری مرکز ثقل موتور تحت بار N1000 در جهت X و یا در جهت محوری موتور



(ب)

(الف)

شکل ۱۶ حداکثر نیروی کشش پیچ‌های نگهدارنده تحت بار خارجی N ۱۰۰۰ در جهت محوری موتور برشی پیچ‌ها

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نتایج زیر حاصل گردید:

- طراحی اجزاء و چیدمانی قطعات موتور
- انتخاب اجزای استاندارد و تعیین جنس قطعات
- تحلیل استحکام اجزای موتور از جمله قطعات انتقال قدرت و اجزای نگهدارنده موتور
- انتخاب جنس فولاد st-5۲ برای شافت و روتور و به دست آمدن ضریب اطمینان ۲/۵۸ در طراحی‌ها با توجه به تحلیل تنش بارهای اعمالی بر شافت و روتور
- انتخاب چسب UHU PLS 300kg با استحکام بالا برای اتصال بین آهن‌رباها و روتور و به دست آمدن ضریب اطمینان ۱/۶۱ در طراحی‌ها با توجه به تحلیل تنش برشی ایجادشده در ناحیه اتصال آهن‌ربا با روتور
- انتخاب پیچ‌های فولادی از نوع M8 و گرید ۴/۸ با بار اطمینان ۳۱۰MPa برای استفاده در پایه نگهدارنده موتور که ضریب اطمینان بیشتر از ۱۰ را با توجه به تحلیل تنش ناشی از نیروی وارده بر پایه در اثر وزن موتور، فراهم می‌آورد.

۵- مراجع

- [1] Damaki A, Amini M, Torabi M. Design, Analysis and Fabrication of a Counter Rotate Brushless Permanent Magnet Motor for Using in Under Water Systems. *Journal Of Marine Engineering*. 2018;13:25-34.
- [2] Hendershot JR, Miller TJE. Design of brushless permanent-magnet machines: Motor Design Books Venice, FL, USA, 2010.
- [3] Tangudu JK, Jahns TM. Comparison of interior PM machines with concentrated and distributed stator windings for traction applications. *IEEE*. p. 1-8.
- [4] Huazhang W. Design and implementation of brushless DC motor drive and control system. *Procedia Engineering*. 2012;29:2219-24.
- [5] Markovic M, Muller V, Hodder A, Perriard Y. Optimal design of an in-wheel BLDC motor for a kick scooter. *IEEE*. p. 292-6.
- [6] Chung M-J. Development of in-wheel motor system using brushless DC motor of hall sensor type. *IEEE*. p. 1508-11.
- [7] Nikam SP, Rallabandi V, Fernandes BG. A high-torque-density permanent-magnet free motor for in-wheel electric vehicle application. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012;48:2287-95.
- [8] Lee T-Y, Seo M-K, Kim Y-J, Jung S-Y. Motor design and characteristics comparison of outer-rotor-type BLDC motor and BLAC motor based on numerical analysis. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2016;26:1-6.
- [9] Carunaiselvane C, Jeevananthan S. Generalized procedure for BLDC motor design and substantiation in MagNet 7.1. 1 software. *IEEE*. p. 18-25.
- [10] Lee B-K, Kang G-H, Hur J, You D-W. Design of spoke type BLDC motors with high power density for traction applications. *IEEE*. p. 1068-74.
- [11] Kim SY, Kim BT, Cho JH, Lee J. Novel Spoke-Type BLDC Motor design for cost effective and high power density. *IEEE*. p. 090-3.

- [12] Yang H-M, Cha J-W, Baik B-H, Kwon B-I. Design and analysis of high speed BLDC motor for centrifuge. IEEE. p. 968-72.
- [13] Chin YK, Arshad WM, Bäckström T, Sadarangani C. Design of a Compact BLDC motor for Transient Applications. Citeseer. p. 3-10.
- [14] Caricchi F, Crescimbeni F, Santini E. Basic principle and design criteria of axial-flux PM machines having counter-rotating rotors. IEEE. p. 247-53.
- [15] Choi H, Jasinski M, Liu J. Novel permanent magnet systems for high efficiency electric ships. IEEE. p. 219-23.
- [16] Kumar P. Design, interpretation and progression of bldc motor for coreless thruster. International Journal of Scientific Research and Education. 2016;4:6.
- [17] Zhang CL, Zhang JN. Modeling and Simulation of the Marine Permanent Magnet Synchronous Propulsion Motor with Direct Torque Control System. Trans Tech Publ. p. 612-9.
- [18] Budynas RG, Nisbeth, J.K. Shigley's Mechanical Engineering Design 10th edition: McGraw Hill, 2011.