



Design, FEM Simulation, and Implementation of a Passive Magnetic Bearing for the Reaction Wheel Actuator

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hosseini S.H.¹ MSc,
Mahboobkhah M.*¹ PhD,
Farhid M.² PhD

How to cite this article

Hosseini S.H, Mahboobkhah M, Farhid M. Design, FEM Simulation, and Implementation of a Passive Magnetic Bearing for the Reaction Wheel Actuator Modares Mechanical Engineering, 2020;20(8):2129-2137.

¹Manufacturing Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Space Thrusters Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran

*Correspondence

Address: University of Tabriz, Bahman 29 Bulverde, Tabriz, Iran. Post Box: 5166616471.

Phone: +98 (41) 33393518

Fax: +98 (41) 33293028

mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

Article History

Received: December 22, 2019

Accepted: June 02, 2020

ePublished: August 15, 2020

ABSTRACT

One of the important challenges of the aerospace industry is the use of magnetic bearings and generating the electromagnetic flux in motor to increase its speed of rotation and angular momentum. In this paper, the passive magnetic bearing for the reaction wheel actuator which is used to modify the status of space satellite is designed and analyzed using the COMSOL software. The performance of constructed reaction wheel in various modes is evaluated. In the passive magnetic bearing system, when the rotor exits the center position of the rotational axis, the return force that results from repulsion between the poles of the same permanent magnet directs the rotor to the center axis position. In the paper, the axial passive magnetic bearing is designed, and the distribution of magnetic flux density and static force of the bearing is estimated using simulation in the software and the stiffness coefficient is obtained from the static properties. To reduce the power consumption of the reaction wheel, various layouts were investigated. Then, based on design and analysis results, the appropriate bearing to achieve the maximum rotational speed and the minimum power consumption is introduced. The results of the FEM analysis clarified the effects of the magnetic stacking structure on the force and magnetic stiffness of the bearing and finally, the experiments proved that the rotational speed and momentum of the reaction wheel are increased in the combined use of the mechanical and passive magnetic bearings.

Keywords Passive Magnetic Bearing; Magnetic Arrays; Reaction Wheel Actuators; Finite Element Analysis (FEM)

CITATION LINKS

[1] Magnetic Bearing [2] Production and use of high centrifugal fields [3] Passive magnetic bearings with permanent magnet [4] Permanent magnetic bearing and couplings [5] Stacked structures of passive magnetic bearings [6] Permanent magnet configuration in repulsive type magnetic bearing for improved radial disturbance attenuation characteristic [7] Passive magnetic bearing development [8] Passive magnetic bearing [9] An overview on aerospace magnetic bearing products for spacecraft attitude control and for industry [10] IR series reaction wheel [11] Axial flux machine using passive magnetic bearing with axial magnetization [12] Force and torque model of ironless passive magnetic bearing structures [13] Optimal design of a compact passive magnetic bearing based on dynamic modelling [14] Passive magnetic bearing-design and numerical simulation [15] Analysis and design of a novel magnetic levitation gravity compensator with low passive force variation in a large vertical displacement [16] Passive magnetic bearings at the rotary application [17] A study on passive magnetic bearing with Halbach magnetized array [18] Investigation of passive magnetic bearing with Halbach-array [19] Halbach structures for permanent magnets bearings [20] Magnetic bearing configurations: Theoretical and experimental studies [21] A new improved method for computation of radial stiffness in permanent magnet bearings [22] Design of an energy storage flywheel system using permanent magnet bearing (PMB) and superconducting magnetic bearing (SMB) [23] Design formulas for permanent-magnet bearings [24] Comsol blog, Comsol Multiphysics [25] Design and analysis of a permanent magnetic bearing for vertical axis small wind turbine [26] Characteristics of a magnetic rotor bearing for active vibration control [27] Design and analysis of a 1DOF magnetic bearing

طراحی، شبیه‌سازی FEM و پیاده‌سازی سیستم یاتاقان مغناطیسی غیرفعال بر عملگر چرخ عکس‌العملی

سیدحامد حسینی MSc

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مهران محبوب‌خواه* PhD

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مرتضی فرهید PhD

پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران

چکیده

استفاده از یاتاقان‌های مغناطیسی به‌منظور شناورسازی محور موتورهای الکتریکی با استفاده از نیروی الکترومغناطیسی و کاهش اصطکاک و افزایش دور و مومنوم زاویه‌ای، یکی از چالش‌های موجود صنایع هوافضا است. در این مقاله، یاتاقان مغناطیسی غیرفعال برای عملگر چرخ عکس‌العملی، عملگری که برای تغییر و کنترل وضعیت ماهواره‌های فضایی به‌کار می‌رود، طراحی و با استفاده از نرم‌افزار کامسول تحلیل شده و عملکرد آن پس از ساخت در حالت‌های مختلف بررسی شده است. یاتاقان مغناطیسی غیرفعال در چرخ عکس‌العملی، وقتی روتور از موقعیت مرکزی محور دورانی خارج می‌شود، نیروی بازگردانی که نتیجه دافعه میان قطب‌های هم‌نام مغناطیس‌های دائمی است را ایجاد می‌کند و روتور را به موقعیت محور مرکزی هدایت می‌نماید. ساختار یاتاقان مغناطیسی غیرفعال محوری بر مبنای الزامات فیزیکی و مغناطیسی، طراحی و توزیع چگالی شار مغناطیسی و خصوصیات استاتیک نیرویی یاتاقان با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول برآورد شده و ضریب سفتی از خصوصیات استاتیک به‌دست آمده است. انتخاب صحیح چینش‌ها و استحصال سفتی بالا نقش به‌سزایی در کاهش توان مصرفی و نگهداری چرخ عکس‌العملی دارد که در این مقاله به تحلیل و طراحی آن پرداخته شده و ساختار متناسب بر روی آن پیاده شده و نتایج عملکردی دورانی و توان مصرفی آن آورده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود نشان‌دهنده تأثیرات ساختار انباشته مغناطیسی بر روی مشخصات نیرویی و سفتی مغناطیسی یاتاقان بوده و آزمایشات تجربی حاکی از افزایش سرعت دورانی و مومنوم چرخ عکس‌العملی در حالت استفاده ترکیبی یاتاقان مغناطیسی غیرفعال و یاتاقان مکانیکی است.

کلیدواژه‌ها: یاتاقان مغناطیسی غیرفعال، آرایه‌های مغناطیسی، عملگر چرخ عکس‌العملی، روش تحلیل المان محدود (FEM)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳

*نویسنده مسئول: mahboobkhan@tabrizu.ac.ir

مقدمه

یاتاقان‌های مکانیکی مانند یاتاقان‌های توپی (Ball Bearing) به‌دلیل برخورد اجتناب‌ناپذیر روتور و استاتور، معایب زیادی دارند. یاتاقان‌های مغناطیسی، محور را به‌جای تماس مکانیکی با نیروی مغناطیسی به‌حالت تعلیق درآورده و چندین دهه است که در انواع صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. در یاتاقان‌های لغزشی و

غلتشی معمولاً به روغن‌کاری نیاز است و استحکام مکانیکی محور غالباً عامل محدودکننده سرعت است. در حالی که یاتاقان‌های مغناطیسی با تکنولوژی که مبنای آن تعلیق روتور بر روی نیروهای مغناطیسی است، می‌تواند راه‌حل مناسب‌تری باشند. یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال یاتاقان‌هایی هستند که در آنها بار توسط شار مغناطیسی دائمی تحمل می‌شود و حرکت محور بدون تماس فیزیکی پشتیبانی و چرخش محور بدون اصطکاک تماسی انجام می‌شود. یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال امروزه در بسیاری از ماشین‌آلات و عملگرهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته و به‌صورت تجاری عرضه می‌شوند^[1]. نخستین یاتاقان‌های مغناطیسی در زمان جنگ جهانی دوم و با تلاش جسی بیمز از دانشگاه ویرجینیا ساخته شدند. از این یاتاقان‌ها در سانتریفیوژهای خالص‌سازی ایزوتوپ‌های عناصر مختلف برای ساخت اولین بمب‌های هسته‌ای استفاده شد^[2]. برای یاتاقان‌های با شکل یکسان، قدرت و سفتی برای مغناطش شعاعی (عمود بر محور روتور) یا محوری (موازی محور روتور) یکسان بوده و جایگزینی نوع محوری به‌جای شعاعی به‌دلیل آسان‌بودن ساخت آنها توصیه می‌شود^[3-5]. موخوپادیای و همکاران، به‌منظور کاهش اختلالات شعاعی، پیکربندی مغناطیس‌های دائم برای یاتاقان مغناطیسی شعاعی غیرفعال را با استفاده از روش المان محدود انجام دادند. پژوهشگران بهبود ویژگی سفتی یاتاقان را با ساخت نمونه آزمایشگاهی تایید می‌کنند و تنظیم مناسب مغناطیس‌های دائم یاتاقان مغناطیسی غیرفعال را در حصول سفتی بالا و در نتیجه کاهش حداکثر اختلالات در طول جهت شعاعی یاتاقان موثر می‌دانند^[6]. همچنین طراحی و ساخت یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال پیشرفته‌تر نسبت به مدل‌های قبلی توسط سیبرت اجرا شد^[7]. هاملر و همکاران، از ویژگی یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال که توانایی گرفتن بارهای شعاعی و محوری در هر دو جهت دارند را با استفاده از آهنرباهای دائمی محوری مغناطیسی با روش مدل‌سازی المان محدود، برای تجزیه و تحلیل شرایط مغناطیسی استفاده کرده و عملکرد یاتاقان‌های مغناطیسی را توسط روش تنش ماکسول ارایه کردند^[8]. طی ۲۵ سال گذشته آئرواسپیشیال (آژانس فضایی اروپا) تحقیقات خود را از سال ۱۹۷۰ بر روی توسعه یاتاقان‌های مغناطیسی آغاز کرده و اولین اختراع مربوط به این سیستم را در سال ۱۹۷۳ ثبت نموده است. این مجموعه در سال ۱۹۷۸ اولین چرخ عکس‌العملی را برای ماهواره اسپات ۱ (SPOT1) اولین ماهواره رصد نوری فرانسه طراحی کرده و با موفقیت آزمایش نمود. سپس برنامه توسعه را برای ماهواره‌های ای‌آراس ۱ و ۲، اسپات ۲، ۳ و ۴ را با پرتاب‌های موفق به پایان رسانده و از سال ۱۹۸۴ تاکنون در زمینه طراحی چرخ‌های عکس‌العملی برای کاربردهای فضایی و صنعتی فعالیت می‌کند^[9]. شکل ۱ نشان‌دهنده چرخ عکس‌العملی است که در کنترل حرکت انواع مختلف ماهواره‌های فضایی و تعیین وضعیت آنها استفاده می‌شود. مهم‌ترین مشخصه فنی مطرح در این نوع عملگرها میزان

در سیستم‌های موقعیت‌یابی دقیق و یا سیستم‌های اندازه‌گیری پیشنهاد می‌شود [15].

با بررسی بیشتر مطالعات صورت‌گرفته بر روی یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال، مشخص شد که طراحی‌های صورت‌گرفته در محیط تجربی برای هر مورد خاص مد نظر طراح، کارایی تجربی بهتری داشته است. در نتیجه، به‌منظور استفاده از این سیستم در عملگرهای با محدودیت دسترسی صنایع هوافضا، طرح‌های مورد نظر تحلیلی بر روی عملگر پیاده‌سازی شده، و با آزمایش‌های اختصاصی مربوط به محیط کارکردی آن رفتار چرخ عکس‌العملی ارزیابی شده است تا دانش فنی طراحی و ساخت چرخ عکس‌العملی ایرانی با استفاده از یاتاقان مغناطیسی تکمیل و بومی شود.

در عملگر چرخ عکس‌العملی موجود از یاتاقان‌های غلتشی برای تثبیت و دوران روتور استفاده شده است. با توجه به موضوع عدم دسترسی مستقیم در سیستم‌های فضایی و کاربرد در شرایط خاص باید از قطعات و مکانیزم‌هایی استفاده کرد که عمر کاری زیادی داشته باشند و عملیات سرویس و نگهداری کمی را طلب کنند و میزان گشتاور تولیدی، اندازه ممنتوم زاویه‌ای، سرعت زاویه‌ای مطلوب را تامین کرده و توان مصرفی را کاهش دهند. از مزایای یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال می‌توان به عدم نیاز به روغن کاری، ایمنی، کاربرد در خلاء، کنترل موقعیت محور، دقت، کاهش مصرف انرژی، سرعت بالا و اصطکاک نزدیک به صفر را نام برد [16]. با توجه به مزایا و پژوهش‌های صورت‌گرفته درباره کارایی این یاتاقان‌ها، آن را به یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای بهبود عملکرد چرخ عکس‌العملی تبدیل می‌کند.

بر مبنای نوع نیروی به‌وجودآمده، یاتاقان‌ها در دو گروه شعاعی و محوری و براساس اثرات متقابل میان قطب‌ها در دو نوع دافعه و جاذبه دسته‌بندی می‌شوند. نوع دیگری از پیکربندی نیز وجود دارد که در آن قطبیت عمودبرهم دو مغناطیس مجاور تعیین می‌شود. در این حالت مغناطیس‌ها با قطبیتی به‌صورت متناوب در حالت ۹۰ و ۱۸۰ درجه یا همان شعاعی و محوری در کنار هم چیده می‌شوند که در برخی منابع از آن به ساختار هالبیچ (Halbach) نام برده‌اند. براساس مطالعات انجام‌گرفته نوع دافعه برای بارهای (نیروهای) بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [17, 18].

زمانی که دو آهنربا دارای قطبیت شعاعی یکسانی هستند، هر کدام بر روی روتور (شفث چرخان) و استاتور (غلاف و بستر ثابت) نصب می‌شوند به‌صورتی که قطب‌های N در برابر همدیگر و قطب‌های S نیز مقابل یکدیگر قرار بگیرند. عملکرد دافعه قطب‌ها موجب تعلیق قسمت متحرک در امتداد شعاعی و محوری می‌شود [19, 20]. در شکل ۲ آرایه مغناطیسی محوری (پیکربندی یک)، شعاعی (پیکربندی دو)، هالبیچ (پیکربندی سه) و هالبیچ انباشته دوپل به همراه جهت قطبیت مغناطیس‌های دائم آنها نشان داده شده است.

گشتاور تولیدی، اندازه ممنتوم زاویه‌ای، سرعت زاویه‌ای و توان مصرفی است [10].



شکل ۱) چرخ عکس‌العملی

با مطالعه پژوهش‌های صورت‌گرفته در سال‌های اخیر، می‌توان به‌وضوح نقش یاتاقان مغناطیسی غیرفعال را در بهینه‌سازی و بهبود عملکرد ماشین‌های الکتریکی مشاهده نمود. در جایگزینی یاتاقان مغناطیسی به‌جای یاتاقان مکانیکی ثابت می‌شود که این نوع یاتاقان توانایی حفظ تعادل محور دوار را دارا است [11].

با توجه به محدودیت‌های موجود در ساختارهای دوار الکترونیکی، محققان برای استحصال مناسب‌ترین ساختار و آرایه مغناطیسی به سمت رویکرد تحلیلی نیرو، سفتی و گشتاور متمایل شده‌اند و استفاده از آرایه مغناطیسی هالبیچ را در مقایسه با آرایه مغناطیسی محوری و ترکیب یاتاقان مغناطیسی غیرفعال و فعال را برای استفاده کاربردی توصیه کرده‌اند [12]. با وجود مزایای فراوان یاتاقان مغناطیسی غیرفعال، عدم برخورداری از نیروی میرایی (Damping) کافی از عواملی است که استفاده از این یاتاقان‌ها را محدود می‌کند؛ صفاییان و حیدری، با طراحی بهینه یاتاقان بر مبنای مدل‌سازی دینامیکی و استفاده از جفت یاتاقان مغناطیسی و لایه رسانا در فاصله هوایی بین روتور و استاتور و با اتلاف مقدار کمی سفتی میرایی مورد نیاز را تولید کردند؛ تمامی ضرایب میرایی شعاعی، محوری و چرخشی در سرعت‌های پایین دارای مقادیر ثابت بوده و با افزایش سرعت میرایی کاهش می‌یابد، به همین منظور تمامی پارامترها را برای حداکثر سفتی و میرایی نرمالیزه نمودند [13]. ماهیت شناوری مغناطیسی جابه‌جایی روتور موجب تغییرات پارامترهای نیرویی شده و ارزیابی نیروهای شعاعی، محوری و نیروهای شعاعی مربوط به زاویه‌دارشدن روتور در سال‌های اخیر، توسط تاناس و همکاران انجام و نتایج نیرویی ناشی از جابه‌جایی روتور تحلیل شده است [14]. روش طراحی یاتاقان مغناطیسی بر مبنای تاثیر متقابل سفتی و قابلیت تغییرات نیروی شناوری کم توسط Z/λ و همکاران ارایه شده و بر روی مدل‌های تجربی اعمال گشته است. این رویکرد برای استفاده

شناخته می‌شود. با این تعریف سفتی مغناطیسی یاتاقان محوری از معادله ۱- ب به دست می‌آید:

$$K_z = \frac{-dF_z}{dz} \quad (۱-ب)$$

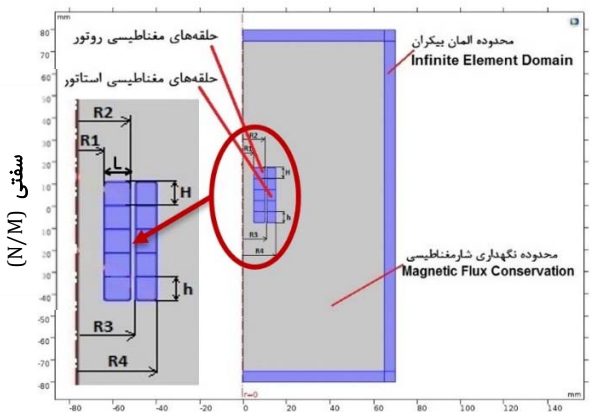
که F_z نیروی محوری مغناطیسی کل در یاتاقان است. برای محاسبه نیروهای مغناطیسی و ضریب سفتی مغناطیسی محوری یک مطالعه در حالت پایدار انجام می‌شود. برای مدل‌سازی میدان‌های مغناطیسی از رابط الکتریک (AC/DC) نرم‌افزار استفاده می‌شود [22, 23]. محدوده المان بیکران، محدوده شارمغناطیسی برای مدل‌سازی محدوده فضای اطراف آهنربا تعریف می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است.

مجموع اجزای نیروی مغناطیسی با روش تانسور تنش ماکسول با استفاده از گره برآورد نیرو در محدوده آهنرباهای داخلی محاسبه شده است. همچنین برای محاسبه ضریب سفتی مغناطیسی محوری هندسه تغییرپذیر، رابط حساسیت اضافه شده و از معادله ۱- ب استفاده می‌شود. سپس، از مولفه محوری نیروی مغناطیسی به‌عنوان یک هدف سرتاسری و از پارامتر جابه‌جایی محوری به‌عنوان یک متغیر کنترل سرتاسری برای رابط حساسیت به‌منظور به‌دست‌آوردن مشتق dF_z/dz استفاده شده است. با استفاده از گره بررسی پارامتری (Sweep)، در نهایت سفتی مغناطیسی محوری را به‌عنوان یک تابع از جابه‌جایی محوری محاسبه می‌شود [24].

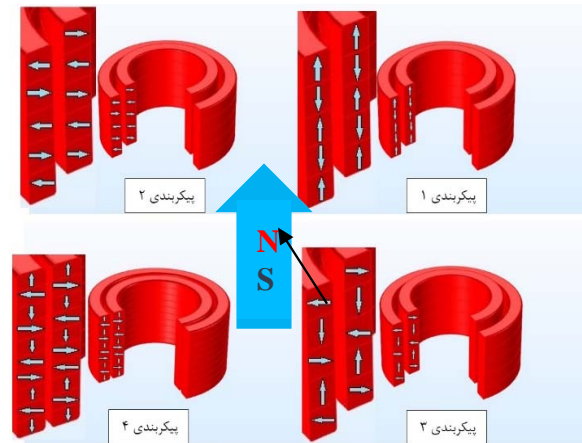
مش‌زنی از نوع مش حرکتی و تغییرپذیر برای محدوده متاثر از میدان مغناطیسی در مدل دوبعدی متقارن برای یاتاقان مغناطیسی غیرفعال محوری، در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱) مشخصات پارامترهای ابعادی پیکربندی‌های یاتاقان مغناطیسی (اعداد برحسب میلی‌متر هستند)

پارامتر	مقدار
شعاع داخلی مغناطیس روتور (R1)	۵
شعاع خارجی مغناطیس روتور (R2)	۱۰
شعاع داخلی مغناطیس استاتور (R3)	۱۱
شعاع خارجی مغناطیس استاتور (R4)	۱۶
ارتفاع مغناطیس روتور (H)	۵
ارتفاع مغناطیس استاتور (h)	۵
گوشی حلقه‌ها (L)	۵



شکل ۳) محدوده‌های تعریف‌شده شبیه‌سازی یاتاقان مغناطیسی غیرفعال



شکل ۲) انواع پیکربندی‌های پایه یاتاقان مغناطیسی غیرفعال

مدل‌سازی

از نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک نسخه ۵/۳ برای تحلیل مدل‌ها و پیکربندی‌های مختلف مغناطیسی برای یاتاقان مغناطیسی غیرفعال استفاده شده است. هسته اصلی این نرم‌افزار مبتنی بر روش‌های عددی المان محدود است و می‌تواند محیط‌های مختلف فیزیکی را در قالب یک مدل‌سازی واحد و به‌صورت همزمان مورد تحلیل قرار دهد. به‌منظور محاسبه مقادیر نیرو و سفتی مغناطیسی یاتاقان مغناطیسی غیرفعال در پیکربندی‌های مختلف از حالت فیزیک مغناطیس بدون جریان و تعریف مساله در قالب گشتاور مغناطیسی (Magnetostatics) استفاده شده است.

یاتاقان‌های مغناطیسی از آهنرباهای حلقوی با قطبیت‌های شعاعی و محوری تشکیل شده‌اند. این یاتاقان‌ها به‌صورت حلقه‌های انباشته بر روی روتور و استاتور اعمال شده و به‌صورت دافعه در جهت‌های شعاعی و محوری عمل می‌کنند. نیروی دافعه شعاعی ایجادشده در یاتاقان باعث تثبیت روتور در مرکز استاتور شده و نیروی دافعه شعاعی مانع خروج روتور از میدان مغناطیسی حاصله از مجاورت حلقه‌های مغناطیسی دائمی می‌شود [21]. پیکربندی‌های یک تا چهار در شکل ۲، به‌منظور بررسی تاثیرات آرایه‌های مغناطیسی با مشخصات ابعادی یکسانی تحلیل شده‌اند. حلقه‌های مغناطیس‌های دائمی از جنس آلایژ نئودیموم با چگالی شار مغناطیسی ۱۳/۳ تسلا بوده و ارتفاع روتور و استاتور در تمامی پیکربندی‌های یک تا سه برابر و به مقدار ۵ میلی‌متر است و فقط در پیکربندی چهار ارتفاع روتور و استاتور ۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مشخصات ابعاد هندسی در جدول ۱ آورده شده است.

مساله در یک فضای دوبعدی متقارن تعریف شده است. کامسول محاسبه نیروی مغناطیسی کل بر روی یک جسم را با کامل‌نمودن بردار زیر محاسبه می‌کند.

$$f = n \cdot T = -\frac{1}{2} n(H \cdot B) + (n \cdot H) B^T \quad (۱-الف)$$

که در آن n بردار نرمال به سمت خارج و T تانسور تنش ماکسول در فرامنطقه مرزهای بیرونی جسم است. مشتقات منفی نیروی مغناطیسی کل نسبت به موقعیت، به‌عنوان سفتی مغناطیسی

مقادیر اندازه مغناطیس دائم پس از ماشین‌کاری روتور و استاتور را نشان می‌دهند.

با بررسی فرآیند ماشین‌کاری مغناطیس‌های دائمی نئودیمیومی که حلقه‌های مغناطیسی تولیدی و موجود اکثراً از این نوع هستند و تاثیرپذیری مغناطیس دائم از فرآیند براده‌برداری و افزایش قطر داخلی که منجر به افت و کاهش چگالی شار مغناطیسی و کاهش مقاومت مکانیکی آن در برابر ضربه می‌شود؛ و توجه به این موضوع که میزان کاهش چگالی شار مغناطیسی مشخص نیست، به نظر می‌رسد بهترین کار اجتناب از تغییرات زیاد در ساختار مغناطیسی دائمی مورد نظر بوده و با توجه به نتایج تحلیلی پیکربندی A که نیازمند کمترین تغییرات اندازه و ماشین‌کاری بوده و بیشترین نیروی و سفتی محوری را ایجاد می‌نماید برای ساخت انتخاب شده است.

با بررسی قابلیت‌های ماشین‌کاری مغناطیس‌های دائم آلیاژ نئودیموم مورد استفاده برای پیاده‌سازی یاتاقان مغناطیسی و فرآیندهای تجربی ماشین‌کاری بر روی این آلیاژها، از فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی استفاده شده و مغناطیس‌های دائم روتور و استاتور به اندازه مورد نظر رسیده و بر روی چرخ عکس‌العملی مونتاژ شدند که در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۲) مقادیر نیرو و سفتی مغناطیسی پیکربندی‌های یک تا چهار

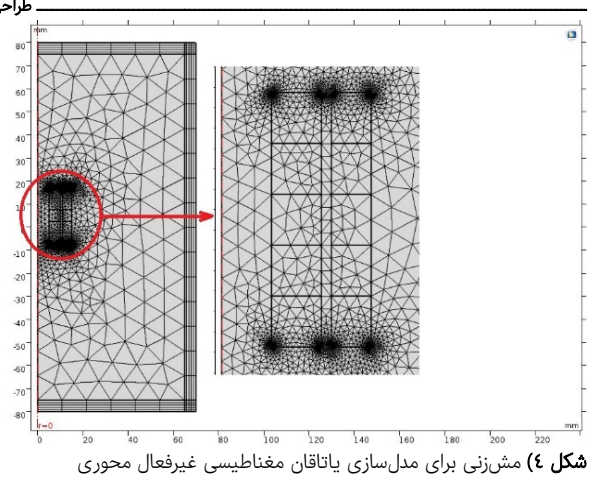
پیکربندی	نیروی محوری (N)	سفتی محوری (N/M)
یک	۳۵۲	$۳/۸ \times 10^6$
دو	۳۵۶	$۳/۰۴ \times 10^6$
سه	۵۶۱	$۲/۷۳ \times 10^6$
چهار	۴۴۸	$۴/۳۷ \times 10^6$

جدول ۳) مقادیر نیروی محوری (Fz) و سفتی مغناطیسی محوری (Kz) پیکربندی‌های مختلف

پیکربندی	پارامتر	اندازه اولیه (mm)	اندازه ثانویه (mm)	ماشین‌کاری شعاعی (mm)
A	Fz (N)	D _{۲۰} d _{۱۰} h _۰	D _{۲۰} d _{۱۰} h _۰	۰
	Kz (N/M)	D _{۳۰} d _{۱۵} h _۰	D _{۳۰} d _{۱۵} h _۰	۳/۰
B	Fz (N)	D _{۲۰} d _{۱۰} h _۰	D _{۲۰} d _{۱۰} h _۰	۰
	Kz (N/M)	D _{۳۰} d _{۱۵} h _۰	D _{۳۰} d _{۱۵} h _۰	۳/۰
C	Fz (N)	D _{۲۰} d _{۱۰} h _۰	D _{۲۰} d _{۱۰} h _۰	۲/۰
	Kz (N/M)	D _{۳۰} d _{۱۵} h _۰	D _{۳۵} d _{۱۵} h _۰	۸/۰
D	Fz (N)	D _{۱۵} d _{۱۰} h _۰	D _{۱۵} d _{۱۰} h _۰	۲/۰
	Kz (N/M)	D _{۲۵} d _{۱۶} h _۰	D _{۲۵} d _{۱۶} h _۰	۰



شکل ۵) روتور و استاتور چرخ عکس‌العملی به همراه مغناطیس‌های دائمی مونتاژی



شکل ۴) مش‌زنی برای مدل‌سازی یاتاقان مغناطیسی غیرفعال محوری

ساخت و پیاده‌سازی

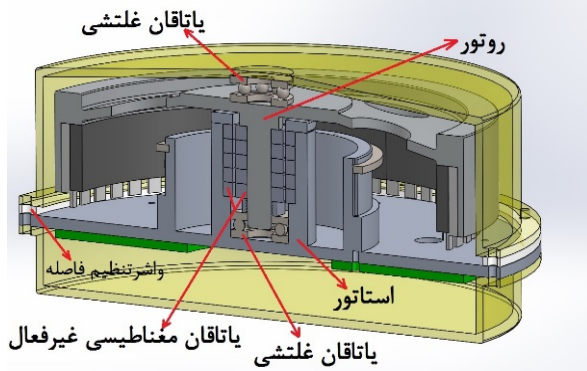
به منظور انجام آزمایش‌های تجربی بهترین حالت از نظر نیرو و سفتی مغناطیسی پیکربندی‌ها انتخاب شده و بر روی چرخ عکس‌العملی پیاده‌سازی شده است. جدول ۲ مقادیر نیرویی و سفتی پیکربندی‌های یک تا چهار را نشان می‌دهد.

با بررسی پیکربندی‌های مختلف برای استفاده از یاتاقان مغناطیسی غیرفعال در چرخ عکس‌العملی، بهینه‌ترین پیکربندی با توجه به تجزیه و تحلیل المان محدود توسط نرم‌افزار کامسول، حلقه‌های انباشته مغناطیس دائم با آرایه هالپج (پیکربندی سه) است. با توجه به اینکه مغناطیس‌ها برای اعمال آرایه هالپج که متشکل از مغناطیس دائم با قطبیت شعاعی و محوری است، موجود نیستند و نیاز به سفارش‌گذاری دارند، مغناطیس‌های موجود در بازار برای انتخاب بهینه‌ترین حالت برای طراحی و ساخت مد نظر قرار گرفته و بهترین طرح جهت پیاده‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

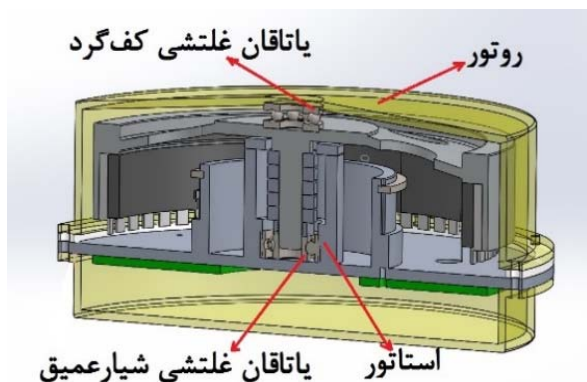
در این راستا با توجه به مغناطیس‌های موجود در بازار ایران طرح‌های A, B, C و D با آرایه مغناطیسی دافعی محوری، مشابه پیکربندی یک در شکل ۲ با ابعاد روتور و استاتور مختلف انتخاب شد و پس از مدل‌سازی و تحلیل مغناطیسی، مولفه نیروی محوری و سفتی محوری برای پیکربندی‌ها به دست آمد که در جدول ۳ قابل مشاهده است.

موضوع دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است، پارامترهای ابعادی مغناطیس‌های دائمی موجود در بازار داخلی است. در این بررسی با توجه به این موضوع که قطر داخلی مغناطیس‌های دائمی برای رسیدن به ابعاد مد نظر نیازمند ماشین‌کاری هستند و با آگاهی از این موضوع که مغناطیس‌های دائمی در اثر ماشین‌کاری دچار کاهش چگالی شار مغناطیسی می‌شوند، طرحی که نیازمند کمترین ماشین‌کاری بوده و بیشترین نیروی و سفتی محوری مورد نظر را تامین نماید، مطابق جدول ۳ انتخاب شده است. در جدول ۳ پارامترهای D قطر خارجی و d قطر داخلی، h ارتفاع استاتور و H ارتفاع روتور و اندازه اولیه مقادیر اندازه مغناطیس دائم انتخابی روتور و استاتور استاندارد، اندازه ثانویه

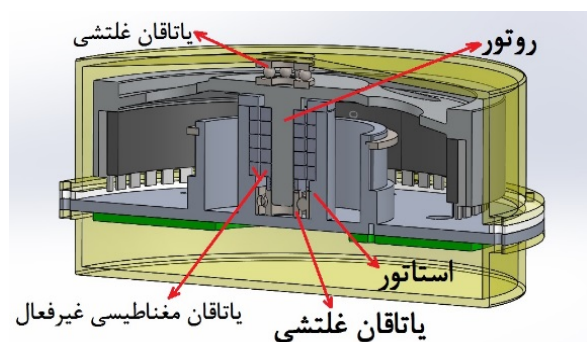
آزمایش‌های تجربی



شکل ۶) پیکربندی یاتاقانی PMB1+TB (ترکیب یاتاقان مغناطیسی غیرفعال و یاتاقان غلتشی کف‌گرد)



شکل ۷) پیکربندی یاتاقانی DGB (ترکیب یاتاقان غلتشی شیاری عمیق و کف‌گرد)



شکل ۸) پیکربندی یاتاقانی PMB5+DGB (ترکیب یاتاقان غلتشی شیاری عمیق و کف‌گرد با یاتاقان مغناطیسی غیرفعال)

تحلیل نتایج

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های المان محدود یاتاقان مغناطیسی محوری با آرایه‌های دافعی محوری و هالنج، نشان‌داده‌شده در جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش حجم مغناطیس دائم در یاتاقان مغناطیسی غیرفعال مقدار نیرو و سفتی محوری افزایش یافته و همچنین به‌طور خاص در پیکربندی هالنج با افزایش تعداد حلقه‌های مغناطیسی در حجم واحد مقدار سفتی محوری به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد.

به‌منظور بررسی میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترهای تعداد حلقه‌ها، ضخامت حلقه‌ها، گوشتی حلقه‌ها و تاثیرات متقابل نسبت ارتفاع حلقه‌ها بر گوشتی و تبع آن تاثیرات نیرویی و سفتی

برای راه‌اندازی و امکان مانورهای مختلف سرعت/گشتاور نمونه حاضر چرخ عکس‌العملی، از نرم‌افزار کاربری که در محیط سی‌شارپ نوشته شده، استفاده شده است. در این نرم‌افزار به همراه رابط سخت‌افزاری کاربری برای پروتکل‌های سریال و CAN، امکان اعمال فرامین با دور/گشتاورهای مختلف (وضوح سرعت یک دور در دقیقه و گشتاور یک دور در دقیقه بر ثانیه) فراهم شده و اطلاعات تله‌متری مانند ولتاژ، جریان، دما و سرعت را با بازه‌های زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد. از این‌رو، توان مصرفی داخلی سیستم به‌صورت لحظه‌ای قابل رصد بوده و در ساختارهای مختلف چیدمان یاتاقان‌ها، معیاری مهم برای بازدهی طرح است که نشان از کاهش اصطکاک دارد. همچنین الزامات توان مصرفی چرخ عکس‌العملی براساس نمونه خارجی این محصول (RW250) شرکت آستروفین با الزامات یاتاقان مکانیکی) بوده و موتور بدون جاروبک (Out Runner) آن، طراحی و ساخته شده است تا امکان ساختارهای مختلف برای چیدمان‌های متفاوت یاتاقان‌ها آسان‌تر صورت گیرد. همچنین علاوه بر آن، از منبع تغذیه HMP4040 شرکت HAMEG با امکان اتصال به کامپیوتر برای ذخیره‌سازی دیتای ولتاژ و جریان لحظه‌ای برای تصدیق اطلاعات توانی رابط کاربری نیز استفاده شده است.

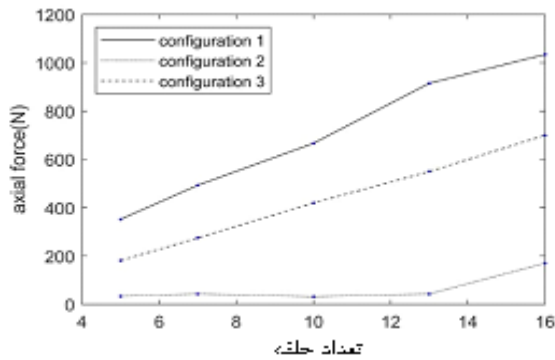
در مجموعه یاتاقانی اجراشده بر روی چرخ عکس‌العملی با توجه به پارامترهای تأثیرگذار بر روی سرعت دورانی و جریان مصرفی موتور، یاتاقان مغناطیسی غیرفعال با ترکیب یاتاقان‌های غلتشی و با فاصله محوری قابل تنظیم پیاده‌سازی شده و آزمایش‌های تجربی در چهار حالت ترکیبی مختلف انجام شده است.

در حالت اول آزمایش با پیکربندی یاتاقانی PMB1+TB، یاتاقان مغناطیسی غیرفعال پیکربندی A به همراه دو یاتاقان غلتشی کف‌گرد در مکانیزم دوار روتور ترکیب شده است و میزان فاصله محوری روتور بین دو یاتاقان کف‌گرد توسط واشر تنظیم فاصله قابل تغییر است که در شکل ۶ نشان داده شده است.

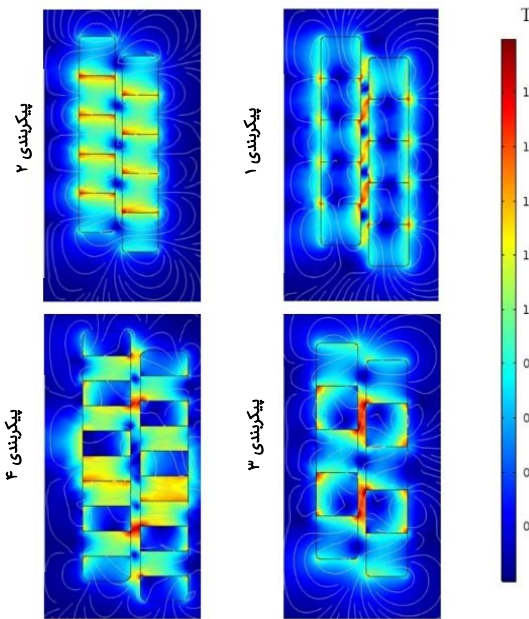
در حالت دوم آزمایش با پیکربندی یاتاقانی DGB، پشتیبانی از روتور توسط یاتاقان غلتشی شیاری عمیق و یاتاقان کف‌گرد انجام شده و فاصله محوری بین این دو یاتاقان غلتشی همانند حالت قبل قابل تنظیم است که در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

در حالت سوم آزمایش که در شکل ۸ نشان داده شده است، با پیکربندی یاتاقانی PMB5+DGB، روتور توسط ترکیب یاتاقان مغناطیسی غیرفعال پیکربندی پنج با یاتاقان شیاری عمیق و کف‌گرد پشتیبانی شده و فاصله محوری روتور قابل تنظیم است.

در حالت چهارم آزمایش با پیکربندی یاتاقانی PMB5+TB، روتور توسط ترکیب یاتاقان مغناطیسی غیرفعال پیکربندی پنج با دو یاتاقان کف‌گرد پشتیبانی شده و فاصله محوری روتور قابل تنظیم است؛ لازم به‌ذکر است به‌دلیل تغییر ساختار چینش از دافعه به جاذبه در استاتور، نیرو و سفتی مغناطیسی محوری در پیکربندی پنج به‌ترتیب به ۵۱ و ۱۰۰۰۰ نیوتن بر متر کاهش پیدا کرده است.



نمودار ۲) منحنی نیروی مغناطیسی محوری پیگیرندی‌های یک تا سه



شکل ۹) برش مقطعی از یاتاقان مغناطیسی در پیگیرندی‌های مختلف به منظور نشان دادن میدان و مسیر شارهای مغناطیسی

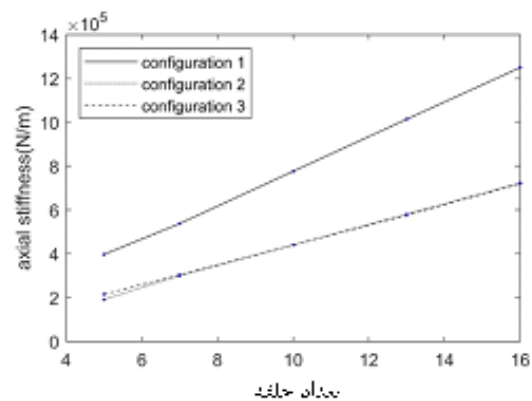
با جایگذاری یاتاقان مغناطیسی غیرفعال بر روی روتور و استاتور موتور الکتریکی با پیگیرندی A مشاهده شد که نیروی محوری ناشی از یاتاقان منجر به تکیه کف روتور به یاتاقان غلتشی استاتور می‌شود؛ به‌گونه‌ای که حتی با وارونه کردن چرخ، روتور در جای خود ثابت مانده و توانایی دوران را دارد. با توجه به اینکه یاتاقان کف‌گرد انتهایی استاتور درجه آزادی جابه‌جایی در راستای شعاعی را برای روتور فراهم می‌نماید تا در صورت نیاز روتور در فضای خالی شعاعی بین حلقه‌های مغناطیسی روتور و استاتور جابه‌جایی داشته باشد، مشاهده شد که سفتی شعاعی یاتاقان مغناطیسی موجب ثبات روتور در مرکز استاتور شده و در حالت سکون و چرخش توسط دست مانع جابه‌جایی روتور می‌شود.

با راه‌اندازی آزمایش شکل ۱۰ عملگر چرخ عکس‌العملی با پیاده‌سازی پیگیرندی‌های یاتاقانی مورد آزمایش قرار گرفته و مجموعاً به تعداد ۲۵ بار آزمون انجام شده و با اصلاحات و بازبینی‌های صورت‌گرفته، روند آزمایشات در چهار حالت منتخب تکرار شده و نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

مغناطیسی، سه پیگیرندی انتخاب شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. در پیگیرندی یک ارتفاع و گوشتی حلقه‌ها برابر $(h=L)$ و به مقدار ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده و حلقه‌ها دارای مقطع مربعی‌شکل هستند. در پیگیرندی دو گوشتی حلقه‌ها دو برابر ارتفاع $(L=h/2)$ در نظر گرفته شده و حلقه‌ها دارای مقطع مستطیلی‌شکل هستند. در پیگیرندی سه ارتفاع دو برابر گوشتی حلقه‌ها $(h=L/2)$ بوده و حلقه‌ها با مقطع مستطیلی روی هم چیده شده‌اند. نمودار ۱ منحنی سفتی مغناطیسی و نمودار ۲ منحنی نیروی مغناطیسی پیگیرندی‌های یک تا سه با افزایش تعداد حلقه‌ها را نشان می‌دهد.

به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر یاتاقان مغناطیسی غیرفعال در محیط تجربی توجه به رفتار و مسیر شارهای مغناطیسی، حلقه‌های مغناطیسی دائمی یاتاقان ضروری بوده و رفتار این شارها ملاک مهمی بر تحلیل رفتار کلی یاتاقان در تحمل بارهای شعاعی و محوری است [25]. به همین منظور نتایج تحلیل میدان و مسیر شارهای مغناطیسی پیگیرندی‌های یک تا چهار در شکل ۹ نشان داده شده است؛ با توجه به نتایج تحلیل در پیگیرندی یک و دو مسیر شارهای مغناطیسی به‌ترتیب محوری و شعاعی بوده و محدوده‌های چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور در پیگیرندی یک قوی‌تر است. در پیگیرندی‌های سه و چهار مسیر شارهای مغناطیسی به‌صورت متناوب بوده و تراکم شار مغناطیسی در پیگیرندی سه در دو محدوده متمرکزتر و در پیگیرندی چهار به‌صورت پراکنده است.

با توجه به نمودارهای فوق، افزایش تعداد حلقه‌ها موجب افزایش نیرو و سفتی مغناطیسی شده و این روند افزایشی در پیگیرندی یک با مقادیر مساوی ارتفاع و گوشتی مغناطیسی‌ها بیشتر است. پیگیرندی سه در مقایسه با سایر پیگیرندی‌ها دارای کمترین مقدار نیروی مغناطیسی بوده و تا تعداد حلقه ۱۳ روند تقریباً ثابتی را طی کرده است. پیگیرندی‌های دو و سه نیز در مقادیر سفتی محوری دارای هم‌پوشانی هستند، این دو پیگیرندی با توجه به مقطع مستطیلی که دارند در برابر جابه‌جایی محوری بسیار حساس بوده و افزایش تعداد حلقه‌ها ناپایداری بیشتری را موجب می‌شود [26, 27].



نمودار ۱) منحنی سفتی مغناطیسی محوری پیگیرندی‌های یک تا سه

افزایش دور چرخ نداشته و حتی می‌تواند نتیجه منفی در پی داشته باشد؛ برای حصول سرعت دورانی و مومنتوم زاویه‌ای بالا با مصرف حداقل انرژی باید جابه‌جایی روتور چرخ توسط مکانیزم‌های فعال محدود گشته و شناوری مغناطیسی محور دوار در شرایط کارکردی رصد و کنترل شد.

تشکر و قدردانی: از حمایت‌های پژوهشکده رانشگرهای فضایی تبریز و اساتید آن مرکز قدردانی به عمل می‌آید.

تأییدیه اخلاقی: به‌منظور انتشار تصاویر و طرح‌های پیکربندی یاتاقانی آزمایشات تجربی از پژوهشکده رانشگرهای فضایی مجوزهای لازم اخذ شده است.

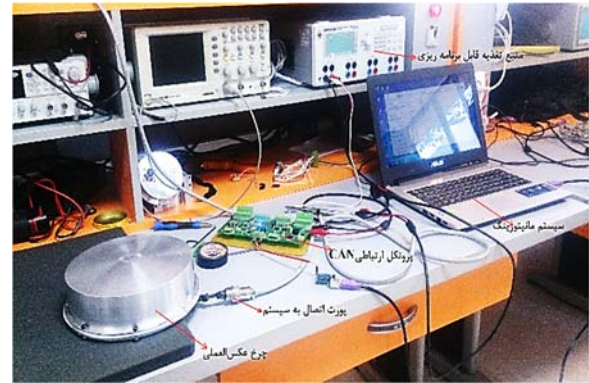
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

سهم نویسندگان: سیدحامد حسینی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ مهران محبوب‌خواه (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ مرتضی فرهید (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

منابع

- 1- Waukesha Magnetic Bearings. Magnetic Bearing [Internet]. Waukesha: Waukesha Bearings; 2017 [Unknown Cited]. Available from: <http://www.waukbearing.com>
- 2- Beams J. Production and use of high centrifugal fields. Science. 1954;120(3121):619-625.
- 3- Yonnet JP. Passive magnetic bearings with permanent magnet. IEEE Transactions on Magnetics. 1978;14(5):803-805.
- 4- Yonnet JP. Permanent magnetic bearing and couplings. IEEE Transactions on Magnetics. 1981;17(1):1169-1173.
- 5- Yonnet JP, Lemarquand G, Hemmerlin S, Olivier Rulliere E. Stacked structures of passive magnetic bearings. Journal of Applied Physics. 1991;70(10):6633-6635.
- 6- Mukhopadhyay SC, Ohji T, Iwahara M, Yamada S, Matsumura F. Permanent magnet configuration in repulsive type magnetic bearing for improved radial disturbance attenuation characteristic. Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 1998;17(1-3):290-295.
- 7- Siebert M. Passive magnetic bearing development [Report]. Toledo: University of Toledo; 2002.
- 8- Hamler A, Gorican V, Stumberger B, Jesenik M, Trlep M. Passive magnetic bearing. Magnetism and Magnetic Materials. 2004;272-276:2379-2380.
- 9- Samuel A, Leachable B. An overview on aerospace magnetic bearing products for spacecraft attitude control and for industry. Third International Symposium on Magnetic Suspension Technology, 7 December 1996, Washington, United States. Chicago: NTRS; 1996.
- 10- Iranian Space Research Institute. IR series reaction wheel [Internet]. Tabriz: Space Thrust Research Institute; 2016 [Unknown Cited]. Available from: Not Found. [Persian]
- 11- AlizadehTir M, Marignetti F, Mirimani SM. Axial flux



شکل ۱۰ اجزای راه‌اندازی آزمایش تجربی عملگر چرخ عکس‌عملی

جدول ۴) نتایج آزمایشات دورانی چرخ عکس‌عملی

فضای خالی (mm)	جریان مصرفی (A)	حداکثر سرعت دورانی (rpm)	حالت‌های پیکربندی
۰	۱/۸	۳۵۰۰	PMB1+TB
۰/۸۵	۲/۱	۳۳۰۰	PMB5+TB
۰/۳۸	۳	۷۳۰۰	PMB5+DGB
۰/۳۸	۱/۸	۶۶۰۰	DGB

نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج حاصل از آزمایشات ترکیب یاتاقان غلتشی کف‌گرد با یاتاقان مغناطیسی پیکربندی یک (PMB1+TB) مشاهده می‌شود که حداکثر سرعت دورانی موتور در حالتی که یاتاقان مغناطیسی غیرفعال دارای بیشترین سفتی و نیروی محوری است با آزادی جابه‌جایی شعاعی ۲ میلی‌متر و سرعت ۳۵۰۰ دور بر دقیقه است و این سرعت دورانی با تزریق جریان ۱/۸ آمپر حاصل می‌شود و با تزریق بیشتر جریان، افزایش دور محقق نمی‌شود؛ عدم افزایش دور ناشی از برخورد روتور با استاتور بوده و به‌دلیل عدم میرایی کافی یاتاقان مغناطیسی برای دفع حرکات شعاعی روتور است و به‌نظر می‌رسد یاتاقان به جابه‌جایی روتور حساسیت بالایی دارد. با اعمال ترکیب یاتاقان غلتشی شیار عمیق با یاتاقان مغناطیسی پیکربندی یک مشاهده شد که موتور الکتریکی توانایی دوران روتور را ندارد، می‌توان نتیجه گرفت با توجه به اعمال محدودیت جابه‌جایی شعاعی توسط یاتاقان مکانیکی در کف استاتور و وجود یاتاقان مغناطیسی در امتداد محوری آن موجب افزایش سفتی شده و موتور الکتریکی توانایی به حرکت‌درآوردن روتور را با توجه به محدودیت‌های خود ندارد. این موضوع با مشاهده نتایج حالت‌های آزمایش DGB (ترکیب یاتاقان غلتشی کف‌گرد با شیار عمیق) و DGB+PMB5 (ترکیب یاتاقان غلتشی شیار عمیق با یاتاقان مغناطیسی با پیکربندی پنج) بهتر تحلیل می‌شود؛ در این آزمایش‌ها با برداشتن یاتاقان مغناطیسی غیرفعال و اعمال یاتاقان مکانیکی شیار عمیق و یاتاقان کف‌گرد سرعت دورانی تا ۶۶۰۰ دور بر دقیقه افزایش می‌یابد و همچنین با کاهش مقدار سفتی مغناطیسی با تغییر پیکربندی یاتاقان مغناطیسی سرعت دورانی تا ۷۳۰۰ دور بر دقیقه افزایش می‌یابد. از آزمایشات انجام‌شده می‌توان نتیجه گرفت که صرف افزایش سفتی نتیجه مثبتی در راستای

Bialystok: Bialystok University; 2010.

19- Ravaud R, Lemarquand G, Lemarquand V. Halbach structures for permanent magnets bearings. *Progress in Electromagnetics Research*. 2010;14:263-277.

20- Pranab S, Hirani H. Magnetic bearing configurations: Theoretical and experimental studies. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008;44(2):292-300.

21- Marinescu M, Marinescu N. A new improved method for computation of radial stiffness in permanent magnet bearings. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1994;30(5):3491-3494.

22- Murakami K, Komori M, Mitsuda H, Inoue A. Design of an energy storage flywheel system using permanent magnet bearing (PMB) and superconducting magnetic bearing (SMB). *Cryogenics*. 2007;47(4):272-277.

23- Paden B, Groom N, Antaki JF. Design formulas for permanent-magnet bearings. *Journal of Mechanical Design*. 2003;125(4):734-738.

24- Paudel N. Comsol blog, Comsol Multiphysics [Internet]. Unknown City: Comsol; 2017 [Unknown Cited]. Available from: <http://www.comsol.com/blog>

25- Premkumar TM, Mohan T, Sivamania S. Design and analysis of a permanent magnetic bearing for vertical axis small wind turbine. *Energy Procedia*. 2017;117:291-298.

26- Schweitzer G. Characteristics of a magnetic rotor bearing for active vibration control. In *First International Conference on Vibrations in Rotating Machinery*. Unknown Publisher; 1976.

27- Granström M. Design and analysis of a 1DOF magnetic bearing. No.1 [dissertation]. Stockholm: KTH Industriell teknik och management Maskinkonstruktion; 2011.

machine using passive magnetic bearing with axial magnetization. *IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 20-22 June 2018, Amalfi, Italy. Piscataway: IEEE; 2018.

12- Gallego GB, Rossini L, Achtnich T, Zwysig C, Araujo DM, Perriard Y. Force and torque model of ironless passive magnetic bearing structures. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 12-15 May 2019, San Diego, United States. Piscataway: IEEE; 2019.

13- Safaeian R, Heydari H. Optimal design of a compact passive magnetic bearing based on dynamic modelling. *IET Electric Power Applications*. 2019;13(6):720-729.

14- Tănase N, Morega AM, Chiriță I, Ilie C. Passive magnetic bearing-design and numerical simulation. 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 28-30 March 2019, Bucharest, Romania. Piscataway: IEEE; 2019.

15- Zhang H, Kou B, Zhou Y. Analysis and design of a novel magnetic levitation gravity compensator with low passive force variation in a large vertical displacement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;67(6):4797-4805.

16- Olejnik A, Falkowski K. Passive magnetic bearings at the rotary application. In: Pennacchi P. *Mechanisms and machine science*. Berlin: Springer; 2015.

17- Feipeng X, Tiecai L, Yajing L. A study on passive magnetic bearing with Halbach magnetized array. 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems in IEEE, 17-20 October 2008, Wuhan, China. Piscataway: IEEE; 2008.

18- Mystkowski A, Ambroziak L. Investigation of passive magnetic bearing with Halbach-array [dissertation].