تابستان ۱۳۹۰/ سال چهارم / شماره اول

فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک جامدات

www.jsme.ir

فصلنامه علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک جامدات

مطالعه یاتاقان‌های مغناطیسی و ارتجاعیت آنها

محمد اسماعیلی ادبی[۱،*]، شهربانو فرخنده[۲]، مجید رشیدی[۳]

[*] نویسنده مسئول: m.esmailiadabi@shahryariau.ac.ir

چکیده

در این مقاله در ابتدا یاتاقان مغناطیسی غیر فعال مورد تحلیل قرار گرفته و سپس مشخصه‌های عملکردی آن مطالعه شده‌است. یاتاقان مغناطیسی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت شامل محور، لایه داخلی مغناطیسی مستقر در اطراف محور و یک حلقه خارجی مغناطیسی است. بررسی جامعی درباره نیروی اعمال شده توسط مغناطیس دائمی یاتاقان که بر روی محور وارد می‌شود تا آن را به حالت توازن اولیه‌اش برگرداند، انجام گرفته است. رابطه بین نیروی اعمال شده و اندازه جابه‌جایی محور از حالت تعادل مطالعه شده است تا بتوان اندازه سفتی را تعیین کرد. مطالعه پارامتری برای پیش‌بینی تأثیرات خواصی مانند جنس مغناطیس، اندازه خارجی و ضخامت مغناطیس بر عملکرد یاتاقان مغناطیسی انجام گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات شعاعی قسمت چرخشی یعنی محور و مغناطیس داخلی حلقه، باعث ایجاد نیرویی می‌شود که تمایل دارد قسمت چرخشی را به موقعیت تعادل اولیه خود برگرداند. همچنین تغییرات جنس مواد مغناطیس، تأثیر بیشتری نسبت تغییرات شعاعی در مقدار مغناطیس دارد. وقتی شعاع محور بیشتر می‌شود، فنریت آن کمتر می‌شود. در ضخامت کمتر از مدل اصلی، دیده شد که فنریت یاتاقان مغناطیسی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که افزایش ضخامت حالت ارتجاعی یاتاقان را بهبود می‌بخشد. همچنین مشاهده شد که تعداد یاتاقان‌های چیده شده در کنار هم، باعث افزایش فنریت می‌شود. اما واقعیت این است که محدودیت‌هایی برای تعداد یاتاقان‌های چیده شده روی هم وجود دارد.

واژه‌های کلیدی

مغناطیسی، غیر فعال، یاتاقان، دائمی، ارتجاعیت، فعال.

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرقدس، گروه فیزیک، تهران، ایران.

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایالتی اوهایو آمریکا.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایالتی اوهایو آمریکا.

۱- مقدمه

یاتاقان‌های مغناطیسی که محور را به جای تماس مکانیکی با نیروی مغناطیسی به حالت تعلیق در می‌آورند، چندین دهه است که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. یاتاقان‌های معمولی مکانیکی به روغنکاری نیاز پیدا می‌کنند، در حالی‌که یاتاقان‌های مغناطیسی با تکنولوژی که مبنای آن تعلیق روتور بر روی نیروهای مغناطیسی است می‌تواند راه حل خوبی باشند. یاتاقان‌های مغناطیسی فعال امروزه در بسیاری از موارد صنعتی کاربرد دارد. این یاتاقان‌ها امکان دسترسی به سرعت‌های بالاتر را نسبت به یاتاقان‌های مکانیکی فراهم می‌کنند. همچنین استفاده از این یاتاقان‌ها می‌تواند باعث حذف عملیات روغنکاری و کاهش آلودگی محیط سیستم شود[۱].

هدف نهایی از طراحی یاتاقان‌های مغناطیسی، چرخش بدون تماس و مطمئن، در دامنه سرعت دستگاه است. حذف سیستم‌های کنترل دیجیتال به معنی ایجاد سیستم با صرفه‌تر است و کاهش ابعاد یاتاقان موجب کاهش ابعاد دستگاه می‌شود. سرعت، بار و محیط کاری سه پارامتر اصلی در طراحی سیستم یاتاقان‌های مغناطیسی هستند. استحکام مکانیکی محور غالبا عامل محدود کننده سرعت است.

ظرفیت استاتیکی (حداکثر نیرویی که یاتاقان مغناطیسی برای نگه داشتن محور ایجاد می‌کنند) تابعی از متغیرهایی مثل جریان تقویت کننده، مساحت قطب‌های مغناطیسی، تعداد حلقه‌های سیم پیچ و ابعاد فاصله هوایی است. یک قاعده سر انگشتی خوب این است که این مقدار را برابر ۷۵ نیوتن بگیریم. ظرفیت دینامیکی (محدوده‌ای که نیروی اعمالی یاتاقان‌های مغناطیسی تغییر می‌کند) فقط با یک متغیر یعنی ولتاژ تقویت‌کننده مشخص می‌شود.

به‌عنوان مثال یاتاقان مغناطیسی ۱۵۰ نیوتنی به سیستمی با ولتاژ ۴۰ ولت و جریان ۲ آمپر متصل است. رفتن به محدوده ۲۰۰ نیوتنی با افزایش تعداد حلقه‌های سیم پیچ‌ها و افزایش مساحت قطب‌های مغناطیسی امکان‌پذیر است که این امر به معنی افزایش ظرفیت استاتیکی است. اگر کنترل کننده ثابت بماند، در هر حال تأثیری بر ظرفیت دینامیکی نخواهد داشت (فقط ظرفیت استاتیکی تغییر می‌کند) و توانایی کنترل نامیزانی‌ها و سایر نیروهای دینامیکی ثابت می‌ماند. برعکس، تعویض یاتاقان مغناطیسی ۱۵۰ نیوتنی مورد نظر با یک یاتاقان ۱۵۰ نیوتنی دیگر با سیستم کنترلی ۵۰ ولتی ۳ آمپری، ظرفیت دینامیکی سیستم را افزایش می‌دهد، اما تأثیری بر ظرفیت استاتیکی ندارد. عملکرد یاتاقان‌های مغناطیسی به میزان مغناطیس آن بستگی دارد. یاتاقان‌های مغناطیسی در وسایل با حرکت چرخشی بدون تماس و اصطکاک کاربرد دارند. این یاتاقان‌ها از یک قسمت چرخشی و یک قسمت ساکن (به ترتیب روتور و استاتور) که به وسیله یک فاصله هوایی[1] جدا می‌شوند، تشکیل شده‌اند. یاتاقان‌های مغناطیسی جایگزین خوبی برای یاتاقان مکانیکی هستند[۴]. یاتاقان‌های مکانیکی مانند بلبرینگ‌ها به دلیل برخورد اجتناب‌ناپذیر روتور و استاتور، معایب زیادی دارند. بارهای سنگین باعث تغییر شکل ظاهری این یاتاقان‌ها می‌شود و در سرعت‌های بالا به دلیل اصطکاک، حرارت زیادی در این یاتاقان‌ها ایجاد می‌شود. یاتاقان‌های مغناطیسی به دلیل عدم تماس فیزیکی یا برخورد بین اجزا، دارای این معایب نیستند. یاتاقان‌های مغناطیسی به دو دسته الکترومغناطیسی و مغناطیس دائمی تقسیم می‌شوند [۵].

یاتاقان‌های مغناطیسی در ماشین‌های مکانیکی، وسایل الکتریکی و الکترونیکی کاربرد دارند.

یاتاقان‌های مغناطیسی عموماً به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- یاتاقان‌های مغناطیسی غیر فعال[2]
- یاتاقان‌های مغناطیسی فعال[3]

نخستین یاتاقان‌های مغناطیسی در زمان جنگ جهانی دوم و با تلاش آقای جسی بیمز از دانشگاه ویرجینیا ساخته شدند. از این یاتاقان‌ها در سانتریفیوژهای خالص‌سازی ایزوتوپهای عناصر مختلف برای ساخت اولین بمبهای هسته‌ای استفاده شد. پیشرفت‌های اساسی این تکنولوژی توسط هربمن و سوییتزر با استفاده از علوم الکترونیک و کنترل صورت پذیرفت. اولین کنفرانس بین‌المللی نیز در سال ۱۹۸۸ توسط سوییتزر و الایر از دانشگاه ویرجینیا و پروفسور اوکادا از دانشگاه ایباراکی برگزار شد.

بکرز و یونت از جمله اولین کسانی بودند که تکنولوژی یاتاقان‌های مغناطیسی فعال را پیاده‌سازی کردند و نمونه اولیه آن‌را ساختند [۲، ۳ و۴]. مارینسو و همکارانش تکنیک‌های

1- Air Gap
2- Passive Magnetic Bearings
3- Active Magnetic Bearings

محاسبه یاتاقان‌های مغناطیسی را بر اساس ارتجاعیت آنها توسعه دادند[۵]. استخراج رابطه طراحی یاتاقان‌های مغناطیسی توسط بدن و همکارانش انجام شد [۶]. طراحی و ساخت یاتاقان مغناطیسی شعاعی توسط میکر و سیبرت اجرا شد[۷]. طراحی و ساخت یاتاقان‌های مغناطیسی غیر فعال پیشرفته‌تر نسبت به مدل‌های قبلی توسط سیبرت اجرا شد[۸]. همچنین طراحی و ساخت یاتاقان‌های مغناطیسی فعال پیشرفته با فرو سیال و پایدارسازی آن توسط مرکز تحقیقات دانشگاه کلیولند در شهر اوهایو صورت پذیرفت[۱۰]. امکان‌سنجی استفاده از تکنولوژی یاتاقان‌های مغناطیسی فعال در موتور توربین‌های گازی توسط کلارک صورت گرفت[۱۱]. مدل‌سازی سه بعدی یاتاقان‌های مغناطیسی چرخ گشتاور توسط امسات اجرا شد[۱۲].

در این تحقیق فقط یاتاقان‌های مغناطیسی دائمی مورد بوده‌اند. یاتاقان‌های مغناطیسی به رغم مزیت‌های پیش‌گفته دارای معایبی مانند محدودیت میزان باربری و محدودیت انعطاف‌پذیری هستند.

هدف از انجام این پژوهش مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد یاتاقان‌های مغناطیسی است. بررسی جامع نیروی اعمال شده توسط مغناطیس دائمی یاتاقان که به محور وارد می‌شود و آن را به حالت تعادل اولیه‌اش برگرداند جزو اهداف این مقاله بوده است. همچنین رابطه بین نیروی اعمال شده و اندازه جابه‌جایی محور از حالت تعادل مطالعه شده است تا بتوان اندازه سفتی[1] را تعیین کرد. مطالعه پارامتری برای پیش‌بینی تأثیرات خواصی مانند جنس مغناطیس، اندازه خارجی و ضخامت مغناطیس بر روی عملکرد یاتاقان مغناطیسی انجام گرفته است.

۲- یاتاقان‌های مغناطیسی غیر فعال و فعال

یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال مانند یاتاقان‌های مکانیکی هستند که برای عملکردشان به کنترل خارجی نیاز ندارند به این معنی که کنترلر فعالی به آن وصل نشده است و عملکرد مستقل دارند.

یاتاقان‌های مغناطیسی فعال یاتاقان‌هایی هستند که در آنها بار توسط شار مغناطیسی تحمل می‌شود و حرکت محور را بدون تماس فیزیکی پشتیبانی می‌کنند. در این حالت چرخش محور بدون اصطکاک انجام می‌شود. از این یاتاقان‌ها در صنایعی مانند تولید برق، پالایشگاه‌ها، ماشین ابزار و خطوط گاز طبیعی استفاده می‌شود. به دلیل اینکه، این نوع یاتاقان‌ها مورد بحث این تحقیق نیستند، به جزئیات بیشتری درباره آنها پرداخته نمی‌شود. نظریه یاتاقان‌های مغناطیسی و موارد مصرف آن، چندین سال است که توسعه یافته است. امروزه، تکنولوژی یاتاقان‌های مغناطیسی به دلیل پیشرفت در تکنولوژی مواد و دقت بالا، حائز اهمیت‌اند. عیب یاتاقان‌های مغناطیسی غیر فعال در این است که نمی‌توانند با وجود یک نیروی خارجی، تعادل خود را حفظ کنند. البته این مورد هم با توجه به تکنولوژی‌های جدید قابل حل است. یکی از این روش‌ها پایدارسازی سیالات فرومغناطیس است که به کنترل فعالی نیاز ندارد.

امروزه تحقیق‌های زیادی برای افزایش سفتی یاتاقان‌های مغناطیسی دائمی انجام می‌گیرد. مزیت‌های یاتاقان‌های مغناطیسی غیر فعال آنقدر زیاد است که پژوهشگران بسیاری در زمینه توسعه آنها گام برداشته‌اند.

مغناطیس دائمی، مغناطیسی است که حالت مغناطیسی خود را، حتی وقتی از محیط مغناطیسی خارج شود، دارا باشد. یکی از عوامل مهمی که در طراحی مغناطیس‌های دائمی باید مد نظر قرارگیرد، نحوه توزیع شار[2] مغناطیسی است. بعضی از مواد مغناطیسی زیر زمینی، تحت نیروهای مغناطیسی شدید دارای چگالی شار بالایی هستند. هدف عمده از طراحی یاتاقان‌های مغناطیسی، دستیابی به توان بالا و حرکت چرخشی بدون تماس است. انگیزهٔ اصلی که باعث توسعه یاتاقان‌های مغناطیسی می‌شود، سرعت و تحمل مقدار بار زیاد، به‌ویژه در لوازم خانگی است. مقدار سفتی محورها سرعت چرخشی سیستم را محدود می‌کنند.

یاتاقان‌های مغناطیسی به دو دسته شعاعی و محوری تقسیم می‌شوند. اساس این دسته‌بندی نوع و جهت باری است که توسط یاتاقان تحمل می‌شود. بعضی از یاتاقان‌های مغناطیسی می‌توانند هم شعاعی و هم محوری باشند.

یاتاقان‌های مغناطیسی شعاعی بار شعاعی اعمالی به محور را تحمل می‌کنند. برای مثال دو عدد یاتاقان مغناطیسی می‌توانند حرکت‌های چرخشی یک چرخ طیار را حول محورش تحمل نماید. در یاتاقان‌های مغناطیسی شعاعی، شار مغناطیسی عمود بر

1- Stiffness

2- Flux

جهت چرخش محور است. یاتاقان‌های مغناطیسی محوری بار محوری اعمالی به شافت را تحمل می‌کنند.

راه‌های محاسباتی زیادی برای تحلیل عملکرد و مشخصه‌های یاتاقان‌های مغناطیسی وجود دارد. یکی از این راه‌ها با جایگذاری قطب‌های همنام رو به روی یکدیگر است. این امر موجب دافعه بین جزء ثابت و متحرک می‌شود. نوع دیگر یاتاقان‌های مغناطیسی غیر فعال با قرار دادن قطب‌های غیر همنام در مقابل هم ساخته می‌شود. این نیروها باعث می‌شوند که محور در حالت تعادل باقی بمانند. این نوع یاتاقان‌ها برای سیستم‌هایی که دارای بار خیلی سبک و یا دارای بار خاصی که فقط در یک محور قرار دارند، مناسب‌اند.

یاتاقان مغناطیسی غیر فعال یاتاقان شعاعی هستند. اگر حرکت چرخشی محوری را کنترل کند اگر یاتاقان مغناطیسی موقعیت روتور را در مقابل جابه‌جایی ناخواسته در طول محور چرخش حفظ نماید یاتاقان محوری است.

یاتاقان‌های مغناطیسی غیر فعال می‌توانند از مغناطیس‌های دائمی[1]، اثرات الکترودینامیکی[2]، هدایت کننده‌های سوپر یا هیدرواکسیدهای آهنی ساخته شوند. در این تحقیق یاتاقان مغناطیسی دائمی غیرفعال ساخته شده از مغناطیس دائمی، مورد نظر است.

۳-ارتجاعیت یاتاقان‌های مغناطیسی

طبق تئوری ارن‌شاو[3] برخاستن یک جسم، به‌تنهایی تحت تعادل استاتیکی مغناطیس دائمی، امکان پذیر نیست. این تئوری بیان می‌کند که حداقل یک محور باید در سه بعد نامتعادل باشد، اگر تنها در ناحیه‌های فرومغناطیسی به کار می‌رود.

در سیستم یاتاقان مغناطیسی، میدان مغناطیسی روی محور گسترده می‌شود. وقتی یک محور از موقعیت تعادل خارج می‌شود (برای مثال از مرکز دوران)، نیروی دیگری که نتیجه مقدار مغناطیس است، سعی می‌کند آن را به حالت اصلی‌اش برگرداند.

این خصوصیت به سفتی و یا همان ارتجاعیت مغناطیسی یاتاقان وابسته است. در یاتاقان‌های مغناطیسی غیر فعال که از جفت‌های متضاد مغناطیس دائمی برای داخل مغناطیس (اطراف محور) استفاده می‌شود، مغناطیس خارجی ارتجاعی بودن یاتاقان را تثبیت می‌کند. ارتجاعیت مغناطیس به شکل هندسی یاتاقان بستگی دارد و متناسب با توان دوم کثرت قابلیت مغناطیس آن است.

میزان ارتجاعی بودن یاتاقان از رابطهٔ بین جابه‌جایی محور (نسبت به حالت تعادل) و نیروی وارد شده بر روی محور و مغناطیس داخلی (قسمت چرخشی) ضربدر مغناطیس خارجی (قسمت ثابت) به‌دست می‌آید.

افزایش فاصلهٔ هوایی بین مغناطیس‌ها، ارتجاعیت آن را کاهش می‌دهد. اگر این فاصله به آرامی افزایش یابد، فنریت (ارتجاعی) در ابتدا به سمت صفر میل می‌کند و سپس تغییر می‌کند.

ارتجاعیت یاتاقان با اندازهٔ لقی داخلی‌اش رابطهٔ عکس دارد. بنابراین حداکثر ارتجاعیت با حداقل لقی به‌دست می‌آید. ارتجاعیت یاتاقان همچنان به استحکام (سفتی) محور نیز بستگی دارد. ارتجاعیت بالایی یاتاقان، دقت و تعادل آن را در مرکزش بهبود داده و تضمین می‌کند. ارتجاعیت در سیستم‌هایی که دقت حرکت مورد نظر است، اهمیت زیادی دارند. مقدار ارتجاعیت در جهت محوری (موازی با محور چرخش) را اصطلاحاً ارتجاعیت محوری و ارتجاعیت در جهت شعاعی را ارتجاعیت شعاعی می‌نامند. اگر یاتاقان مغناطیسی تنها از مغناطیس دائمی ساخته شود، مقدار ارتجاعیت محوری آن دقیقاً دو برابر فنریت شعاعی است [۱ و ۳]. رابطه (۱) بیانگر ارتباط بین ضریب فنریت محوری و ضریب فنریت شعاعی است.

$$Kr = -dFr/dr = -\frac{۱}{۲}Kz \qquad (۱)$$

که در این رابطه Kr ضریب فنریت شعاعی، Fr نیرو شعاعی، Kz ضریب فنریت محوری و r شعاع یاتاقان است.

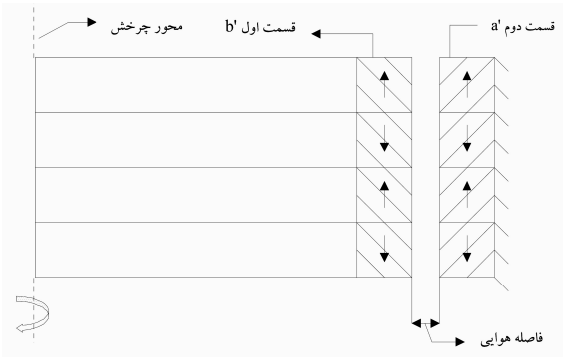
۴- چینش آهنرباها

همانطور که قبلاً گفته شد، ارتجاعیت یکی از ویژگی‌های یاتاقان مغناطیسی است، وقتی که قسمت چرخشی (محور و مغناطیس داخلی) از قسمت ثابت (مغناطیس خارجی) جدا باشد. پر واضح است که ارتجاعیت یاتاقان متناسب با حجم یاتاقان متناسب است. ارتجاعیت می‌تواند با روش‌های مختلفی افزایش یابد.

ارتجاعیت با نحوه قرارگیری (چینش) آهنرباها می‌تواند افزایش یابد. تکه‌تکه قرارگیری متعادل و برابر یاتاقان‌ها، ارتجاعیت بهتری را نسبت به یاتاقان‌های هم حجم که

1- Permanent magnets
2- Electrodynamic effects
3- Eranshaw

یک‌تکه هستند، ایجاد می‌کند. این بدان معنی است که یاتاقانی که فقط از یک قطعهٔ کامل ساخته می‌شود ولی هم حجم با یاتاقانی است که از چند قطعه ساخته می‌شود، ارتجاعیت کمتری دارد. عملکرد یاتاقان با روش چینش بهبود می‌یابد. شکل(۱) یاتاقانی را که به صورت تکه‌تکه روی هم قرار گرفته‌اند تا فنریت آن را افزایش دهند، نشان می‌دهد.



شکل(۱) یاتاقان مغناطیسی محوری که روی هم چیده شده‌اند.

شکل(۱) یاتاقان مغناطیسی محوری که روی هم چیده شده‌اند و با توجه به قرار دادهای قبلی قسمت 'a' ثابت و 'b' چرخشی و با یک فاصله ی هوایی از هم جدا شده‌اند را نشان می‌دهد. فقط یک مقطع از یاتاقان مغناطیسی در شکل (۱) نشان داده شده است . ارتجاعیت کل آن را با Krn نشان داده شود و مقدار آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید[۴]:

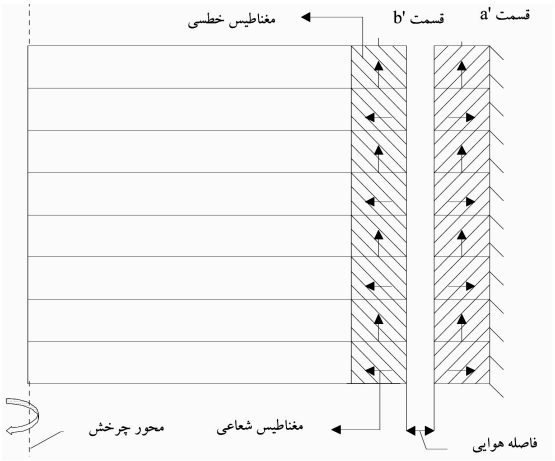
$$Krn = (2n-1)Kr \qquad (2)$$

در این رابطه؛ Krn فنریت شعاعی کل برای n تعداد یاتاقان‌هایی است که روی هم چیده شده‌اند، n تعداد یاتاقان‌های مغناطیسی روی هم قرار گرفته است و Kr فنریت شعاعی هر یاتاقان مغناطیسی است.

از رابطه (۲) دیده می‌شود، که وقتی چهار عدد یاتاقان بر روی هم قرار می‌گیرند، حجم مغناطیس چهار برابر و فنریت آن هفت برابر می‌شود. فنریت ارتجاعیت را می‌توان با روش‌های مختلف دیگر افزایش داد. در ادامه یکی از این روش‌ها توضیح داده شده است.

بر طبق مطالعاتی که هَل بَچ[1] بر روی مغناطیس‌های چند قطبی انجام داده، چرخش جهت‌های مغناطیسی، شار مغناطیسی را در یک طرف افزایش و در طرف دیگر کاهش می‌دهد. این نوع آرایش قرار گیری را آرایهٔ هل‌بچ می‌نامند. بنابراین با مغناطیسی کردن در جهت‌های x و y (با اندازهٔ $\pi/2$) یک طرف دارای شار مغناطیسی است. ساده‌ترین مثال برای این نوع $sin(x)$ و $-cos(x)$ است. این قوانین برای مغناطیس‌هایی که در جهت مختلف مغناطیسی می‌شوند، کاربرد دارند. شکل (۲) یک مدل چینش یاتاقان مغناطیسی را نشان می‌دهد. دراین شکل قسمت 'a' ثابت و 'b' چرخشی است که با یک فاصلهٔ هوایی از هم جدا شده‌اند. شکل (۱) و (۲) دارای حجم مغناطیسی مشابهی‌اند که چهار برابر حجم مغناطیسی اولیه را دارا هستند.

نکته مهم در شکل (۲) در این است که نصف آن به حالت محوری و نصف دیگر آن به صورت شعاعی مغناطیسی شده است. این بدان معنی است که یاتاقان مغناطیسی ترکیبی از دو یاتاقان مغناطیسی شده محوری و شعاعی است. همچنان که در شکل (۲) دیده می‌شود این شکل ترکیبی، یک سیستم چرخشی با جهت مغناطیسی را ارائه می‌کند. این سیستم اندازه ارتجاعیت و نسبت ارتجاعیت به حجم مغناطیسی را، در حد بالایی بهبود بخشیده است. همانطور که دیده می‌شود مقدرا فنریت به اندازه‌ی ۱/۸ برابر، با استفاده از روش چینشی افزایش می‌یابد.

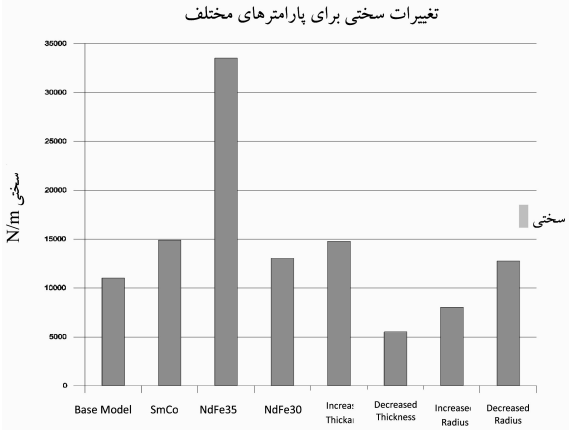


شکل (۲) یاتاقان مغناطیسی چینشی با جهت‌های مغناطیسی شعاعی و محوری.

در پایان تأثیر تغییرات مواد به کار رفته در جنس مغناطیس، مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل اولیه مواد (Smco28) به کار رفته شده است. سپس جنس آن را به (NdFe30) تغییر داده شده است که این تغییر مواد تأثیر قابل توجهی بر روی مقدار ارتجاعیت یاتاقان ایجاد کرد. حداکثر مقدار ارتجاعیت

1- Halbach

به دست آمده ۳۳۱۴۷/۶۳ بود که مربوط به جنس مواد مغناطیسی NdFe 35 است. از این نتیجه می‌توان برداشت کرد که وقتی یاتاقان دارای حداکثر حالت ارتجاعیت خود است که جنس مواد مغناطیسی آن NdFe35 باشد. شکل (۳) یک بررسی مربوط به بحث‌های مطالعه پارامتری را نشان می‌دهد.



شکل (۳) نتایج مطالعه پارامتری برای فنریت یاتاقان

۵- نتایج و بحث

در این تحقیق به طور عمده یک یاتاقان مغناطیسی دائمی مدل سازی شد. در طی تحقیق مشاهده شد که تغییرات شعاعی قسمت چرخشی (محور و مغناطیس داخلی حلقه) از مرکزیت خود با بخش ثابت (مغناطیس خارجی حلقه) نیرویی را ایجاد می‌کند که تمایل دارد، قسمت چرخشی را به موقعیت تعادل اولیه خود برگرداند. برای این منظور یک مطالعهٔ پارامتری برای تعیین نیرو انجام گرفته است. بحث‌های گفته شده جزئیات این بررسی را به خوبی عنوان می‌کنند.

تأثیر تغییرات مواد به کار رفته در جنس مغناطیس، مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل اولیه مواد (Smco28) به‌کار رفته شده است. سپس جنس آن را به (NdFe30) تغییر داده شده و این تغییر مواد تأثیر قابل توجهی بر روی مقدار فنریت یاتاقان ایجاد کرد. حداکثر مقدار فنریت به دست آمده ۳۳۱۴۷/۶۳ بود که جنس مواد مغناطیسی NdFe35 بود. از این نتیجه می‌توان برداشت کرد که وقتی یاتاقان دارای حداکثر حالت ارتجاعیت خود است که جنس مواد مغناطیسی آن NdFe35 باشد.

تغییرات شعاعی محور، اثر شدیدی بر روی عملکرد یاتاقان دارد. وقتی شعاع محور به ۰/۱۵ اینچ کاهش می‌یابد، حالت ارتجاعیت یاتاقان افزایش می‌یابد. وقتی شعاع محور بیشتر می‌شود، ارتجاعیت آن کمتر می‌شود. در ضخامت کمتر از مدل اصلی، دیده شد که فنریت یاتاقان مغناطیسی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که افزایش ضخامت حالت ارتجاعی یاتاقان را بهبود می‌بخشد.

همچنین مشاهده شد که تعداد یاتاقان‌های چیده شده در کنار هم، باعث افزایش فنریت می‌شد. اما واقعیت این است که محدودیت‌هایی برای تعداد یاتاقان‌های چیده شده روی هم وجود دارد.

این محدود سازی‌ها عبارت‌اند از:

- **فضای موجود:** تعداد حلقه‌های مغناطیسی که می‌توانند در کنار یکدیگر چیده شوند، به مقدار جایی بستگی دارد که در ماشین برای یاتاقان در نظر گرفته می‌شود. پر واضح است که نمی‌توان اندازه یاتاقان را بزرگتر از آن چیزی که در طراحی می‌باشد، در نظر گرفت.
- **حساسیت به عدم تعادل:** تعداد حلقه‌های مغناطیسی چیده شده در کنار یکدیگر موجبات ناهماهنگی کوچکی را در هر چرخش محور فراهم می‌کنند. این ناهماهنگی‌ها باعث سایش و تماس بین محور و یاتاقان‌های ساکن می‌شوند.

فهرست علایم

ضریب فنریت شعاعی	Kr
نیرو در جهت شعاع	Fr
ضریب فنریت محوری	Kz
شعاع یاتاقان	r
تعداد یاتاقان‌های مغناطیسی روی هم قرار گرفته	n
فنریت شعاعی کل	Krn

تقدیر و تشکر

این مقاله نتیجه پروژه تحقیقاتی است که در سال ۱۳۸۸ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس انجام گرفته است. این پروژه تحقیقاتی توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس حمایت مالی و معنوی شده و جا دارد که از مسئولین محترم دانشگاه به ویژه معاونت محترم پژوهشی قدردانی و تشکر نماییم.

مراجع

[1] Wikipedia, Free encyclopedia, Earnshow's theorem, 1842.

[2] Backers F.T., A magnetic journal bearing, *Phillips Tech. Rev*., vol.22, 1961, pp.232- 238.

[3] Yonnet J.P., Permanent magnet bearings and couplings, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.17, No.1, 1981, pp. 1169-1173.

[4] Yonnet J.P., Lemarquand G., Hmmerlin S., and Olvierrulliere E., Stacked Structures Of Passive Magnetic Bearings, *Jounnal of Applied Physics*, Vol.70, No.10, 1991, pp.6633-6635.

[5] Marinescu M., and Marinescu N., A New Improved Method for Computation of Radial Stiffness in Permanent Magnet Bearings, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.30, No.5, 1994, pp.3491-3494.

[6] Paden B., Groom N., Antaki J.F., Design Formulas for Permanent- Magnet Bearings, *Transactions of the ASME*, Vol.125, 2003, pp.734-738.

[7] Meeker D., Radial Magnetic Bearing: Example, 1999.

[8] Siebert M., Passive Magnetic Bearing Development, 2002.

[9] Beach R.F., Aerospace Power and Electronics Simulation Workshop, Concurrent Engineering Design practice foe Aerospace Power, NASA, 2003.

[10] Dirusso E., Passive Magnetic Bearings With Ferrofluid Stabilization, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1996.

[11] Clark D.J., Clark M.J., and Montague G.T., Overview of Magnetic Bearing Technology for Gas Turbine Engines, 2004.

[12] AMSAT-P 3D Magnetic Bearing Momentum Wheel, International Symposium on small Satellites, France, 1996.