ISAV2024
چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران

بررسی تاثیر لقی شعاعی و محوری یاتاقان‌های شیار عمیق و تماس زاویه‌ای در فرکانس طبیعی مشاهده شده در مفاصل رباتیکی

وحید حاضری [آ]*، دکتر علیرضا هادی حسین آبادی [ب]

[آ] ایران، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده علوم و فناوری های میان رشته ای، دانشجوی کارشناسی ارشد

[ب] ایران، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده علوم و فناوری های میان رشته ای، دانشیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ***hazeri.v78@gmail.com***

چکیده

در این مطالعه، بررسی جامعی بر روی لقی شعاعی و محوری در یاتاقان‌های مورد استفاده در سیستم‌های مکانیکی صورت گرفته است که هدف اصلی، طراحی و اجرای تست‌هایی برای ارزیابی عملکرد دو نوع یاتاقان شیار عمیق و تماس زاویه‌ای از نظر لقی شعاعی و محوری بوده است. برای این منظور، یک مکانیزم کوچک طراحی شده که لقی های مختلف را با توجه به پارامتر فرکانس طبیعی سیستم مقایسه می‌کند. در تست لقی شعاعی، موتور با ولتاژ سینوسی و فرکانس متغیر تحریک شد و پاسخ سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت و همچنین تست لقی محوری با استفاده از شتاب‌سنج‌ها و میز ویبره انجام شد و نتایج نشان داد که قرار دادن شیم و یا واشر بین یاتاقان‌های شیارعمیق منجر به افزایش فرکانس طبیعی سیستم می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، یاتاقان‌های تماس زاویه‌ای عملکرد بهتری در کاهش لقی نسبت به یاتاقان‌های شیار عمیق دارند و همچنین، شیم‌گذاری در یاتاقان‌های شیار عمیق باعث مشکلاتی در طول عمر این یاتاقان‌ها شد. این یافته‌ها می‌توانند در طراحی و انتخاب یاتاقان‌ها برای کاربردهای مختلف مکانیکی، به ویژه در رباتیک، مفید باشند.

کلمات کلیدی: یاتاقان شیار عمیق؛ یاتاقان تماس زاویه‌ای؛ تست لقی یاتاقان؛ رباتیک.

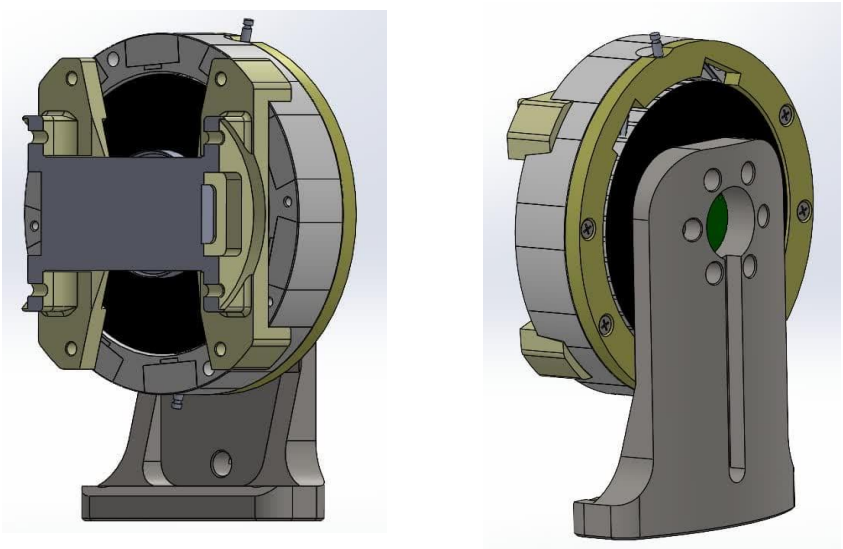
۱- مقدمه

یاتاقان‌ها از اجزای حیاتی در سیستم‌های مکانیکی به شمار می‌روند که وظیفه اصلی آنها کاهش اصطکاک و پشتیبانی از بارهای شعاعی و محوری است. عملکرد صحیح و بهینه یاتاقان‌ها تأثیر بسزایی در کارایی کلی سیستم‌های مکانیکی، به ویژه در کاربردهای حساس و پیچیده مانند رباتیک دارد. یکی از چالش‌های مهم در این زمینه، کنترل و کاهش لقی در یاتاقان‌ها است. لقی به عنوان یک عامل منفی می‌تواند منجر به ناپایداری سیستم، افزایش سایش و کاهش عمر مفید یاتاقان شود [۱]. لقی در یاتاقان‌ها به دو نوع شعاعی و محوری تقسیم می‌شود. لقی شعاعی به فاصله آزاد بین اجزای چرخشی یاتاقان در جهت شعاعی و لقی محوری به فاصله آزاد در جهت محوری اطلاق می‌شود [۲]. این دو نوع لقی می‌توانند تحت تأثیر عواملی مانند نوع یاتاقان، روش نصب، شرایط کاری [۳] و حتی پیش بار اعمال شده [۴] بر یاتاقان قرار گیرند. در این راستا، انتخاب نوع مناسب یاتاقان و کنترل لقی‌های موجود اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق، به منظور بررسی دقیق‌تر لقی‌های شعاعی و محوری در یاتاقان‌ها، یک مکانیزم تست طراحی و اجرا شده است که شرایط واقعی یاتاقان‌بندی در ربات‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. این مکانیزم امکان نصب و تست هر دو نوع یاتاقان شیار عمیق و تماس زاویه‌ای را فراهم می‌سازد تا بتوان به طور مستقیم تأثیرات نوع یاتاقان بر لقی را مقایسه و تحلیل کرد. علاوه بر این، در این تحقیق از شیم‌گذاری [۵] برای بررسی تأثیر تغییرات کوچک در نصب یاتاقان‌ها بر لقی استفاده شده است.

هدف اصلی این مطالعه، ارائه نتایج قابل اتکا و دقیق برای انتخاب بهینه یاتاقان‌ها در سیستم‌های مکانیکی حساس، به ویژه در رباتیک است. نتایج این تحقیق می‌تواند به مهندسان در انتخاب یاتاقان مناسب، کاهش لقی و در نهایت افزایش کارایی و طول عمر سیستم‌های مکانیکی کمک شایانی کند. از این رو، این پژوهش به بررسی جامع و مقایسه‌ای بین دو نوع رایج یاتاقان، یعنی شیار عمیق و تماس زاویه‌ای، در شرایط مختلف پرداخته است.

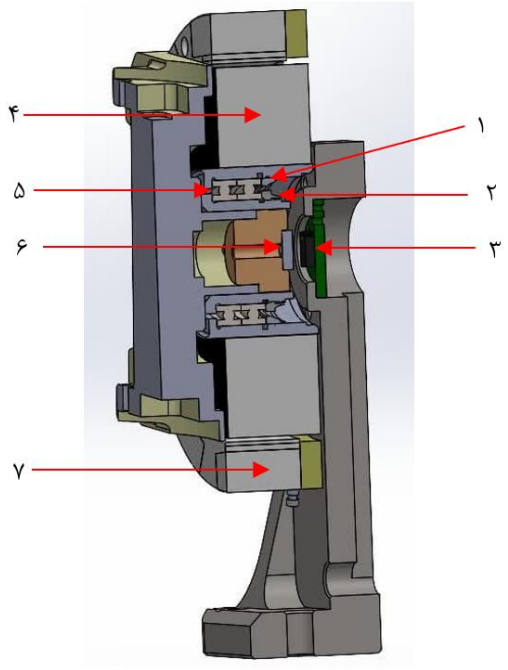
۲- طراحی بستر آزمایش

برای انتخاب نوع یاتاقان و مشاهده اهمیت لقی یاتاقان ها دو تست لقی شعاعی و محوری طراحی شد که برای این دو تست، مکانیزم کوچکی ساخته شد که شرایط مهارشدن مشابهی، در هردو یاتاقان تماس زاویه ای و شیار عمیق دارد. در شکل (۱) مدل مکانیزم طراحی شده نشان داده شده است.



شکل ۱- مدل طراحی شده برای تست لقی ها

ساختار داخلی این مکانیزم به صورت زیر در شکل (۲) قابل مشاهده است.



شکل ۲- نمای داخلی مکانیزم تست لقی

اجزای داخلی مکانیزم با توجه به شماره های مشخص شده در شکل (۲) عبارت اند از:

۱- مهره بیرونی نگهدارنده حلقه بیرونی بلبرینگ
۲- مهره داخلی نگهدارنده حلقه داخلی بلبرینگ
۳- برد پتانسیومتر غیرتماسی
۴- روتور
۵- جفت بلبرینگ
۶- آهن ربای پتانسیومتر غیرتماسی
۷- استاتور

لازم به ذکر است موتور استفاده شده در این مکانیزم مدل ترک موتور N-73-12 با گشتاور پیوسته ۰.۲ نیوتون متر، از برند سویاب می‌باشد.

با توجه به این مکانیزم دو تست لقی شعاعی و محوری گرفته می‌شود و انتظار می‌رود که لقی محوری اثری قابل ملاحظه تر از لقی شعاعی داشته باشد زیرا لقی شعاعی در بلبرینگ ها به مراتب مقدار کمتری از لقی محوری دارد و با توجه به جاگیری ساچمه ها در لحظاتی لقی صفر می‌شود.

در این مکانیزم طراحی به گونه ای صورت گرفت که هم امکان نصب بلبرینگ شیار عمیق[۱] و هم بلبرینگ تماس زاویه ای[۲] وجود داشته باشد تا بتوان مقایسه ای از این جنبه نیز داشت. همانطور که مشخص است وجود لقی در سیستم معادل سختی فنر کم و یا به عبارتی فرکانس طبیعی کم می‌باشد[۶].

[۱]- Deep groove ball bearing

لازم به ذکر است منظور از شیم در این مقاله، قطعه ای مانند واشر می‌باشد که از ورق استیل ۳۰۴ با ضخامت های مختلف ساخته شده است که با قرار دادن آن در بین بلبرینگ های شیار عمیق، می‌توان نوعی بلبرینگ تماس زاویه ساخت و لقی را کاهش داد.

۲-۱- تست لقی شعاعی

در این تست به موتور ولتاژ سینوسی با فرکانس متغیر داده می‌شود به طوریکه ابتدا با فرکانس ۱۵ هرتز شروع به کار کرده و نهایتا تا ۸۰ هرتز افزایش می‌یابد. دلیل اینکه این سیستم بیشتر از ۸۰ هرتز تحریک نمی‌شود پهنای باند ۸۰ هرتزی خود موتور می‌باشد و این به معنای آن است که موتور بیشتر از ۸۰ هرتز را نمی‌تواند دنبال کند. این تست برای یاتان شیار عمیق انجام شد که نتیجه تست در شکل (۵) قابل مشاهده است.

این تست برای ارزیابی لقی شعاعی بر فرکانس طبیعی مجموعه طراحی شده است و بعد از تحریک موتور، خروجی پتانسیومتر را خوانده و با استفاده از فرمول (۱) نمودار تست، رسم می‌شود.

در این دو تست هم از بلبرینگ شیارعمیق و هم از بلبرینگ تماس زاویه ای استفاده شده است که شماره قطعات به صورت زیر است:

بلبرینگ شیار عمیق: SSRI-1458ZZRA7P25L01 از برند NHBB سمت راست در شکل (۳)

بلبرینگ تماس زاویه ای: SSMERI-1458SD501 از برند NHBB سمت چپ در شکل (۳)

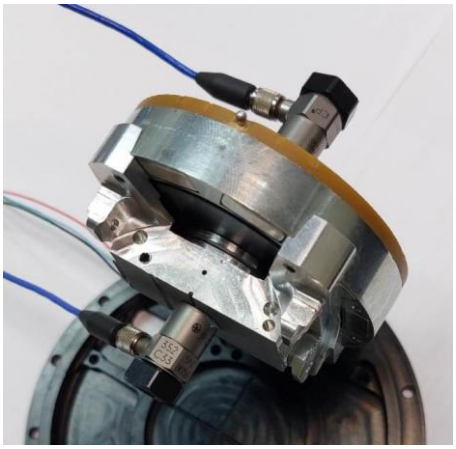
شکل ۳- بلبرینگ های استفاده شده در مکانیزم تست

$$y = 20 \times \log\left(\frac{\text{خروجی}}{\text{ورودی}}\right) \qquad (۱)$$

۲- Angular Contact ball bearings

۲-۲- تست لقی محوری

در این تست، اثر لقی محوری مجموعه و یاتاقان ها بر روی فرکانس طبیعی سیستم، بررسی می‌شود و نحوه ی انجام تست بدین گونه است که دو شتاب سنج رو به روی هم، مانند شکل (۴) در مجموعه قرار گرفته، و کل مجموعه را با استفاده از میز ویبره در فرکانس ها ۲ تا ۱۰۰ هرتز تحریک می‌کنیم و خروجی را مانند گذشته با توجه به فرمول (۱) تبدیل کرده و نمودار آن کشیده می‌شود.

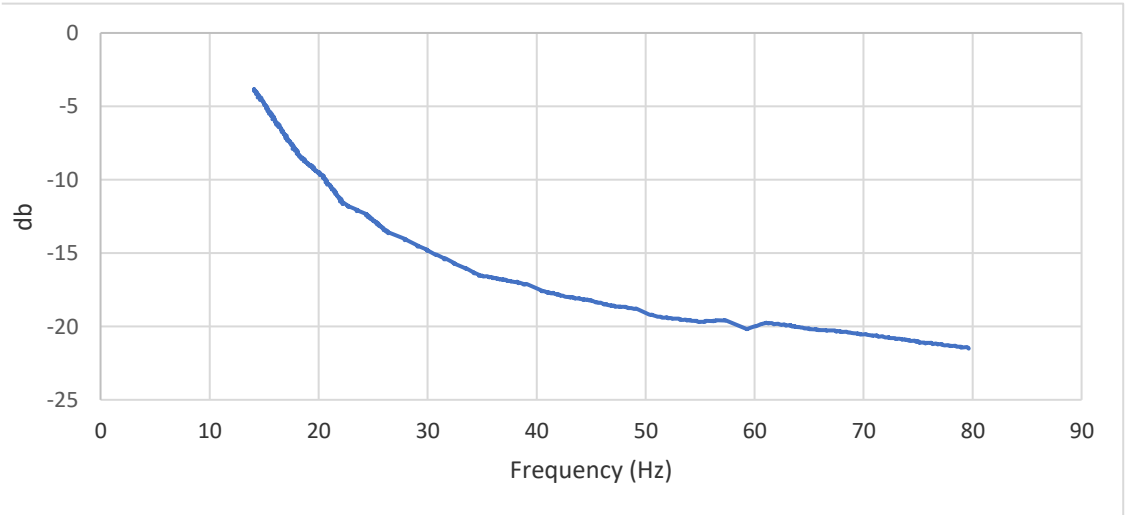


شکل ۴- نحوه اتصال شتاب سنج در تست لقی محوری

شماره قطعه ی شتابسنج ها: 352C33-SN-LW312563 از برند PCB PIEZOTRONICS می‌باشد.

۳- نتایج

در ابتدا تست لقی شعاعی مجموعه گرفته می‌شود که نتایج به صورت شکل (۵) می‌باشد.

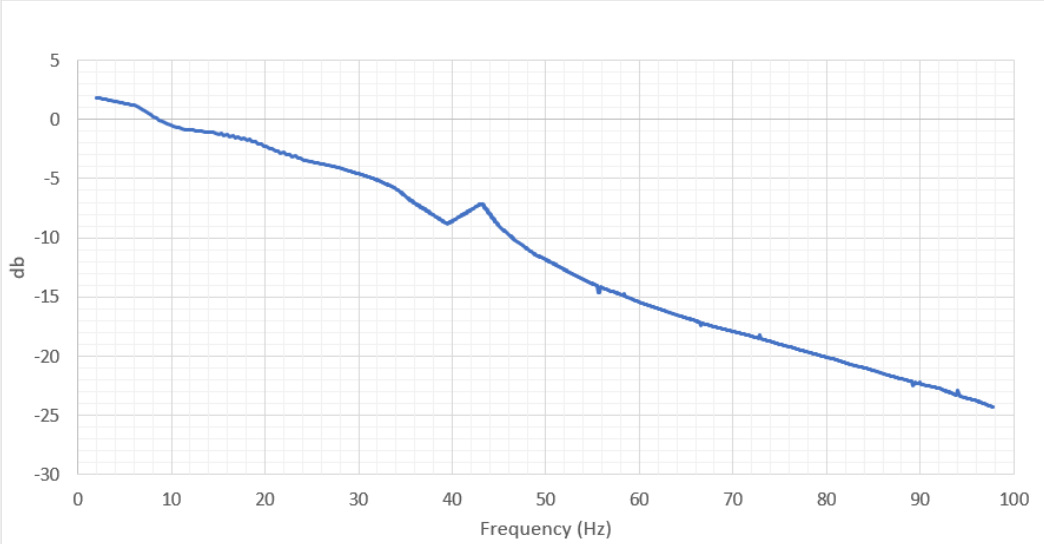


شکل ۵ - نمودار خروجی تست لقی شعاعی

همانطور که از شکل (۵) مشخص است، مجموعه در فرکانس ۵۹ هرتز، یک شکستگی کوچک دارد که بدان معناست که در ۵۹ هرتز در فرکانس طبیعی سیستم قرار گرفته است. این تست برای یاتاقان تماس زاویه ای هم انجام شد که شکل کلی نمودار ها یکسان،

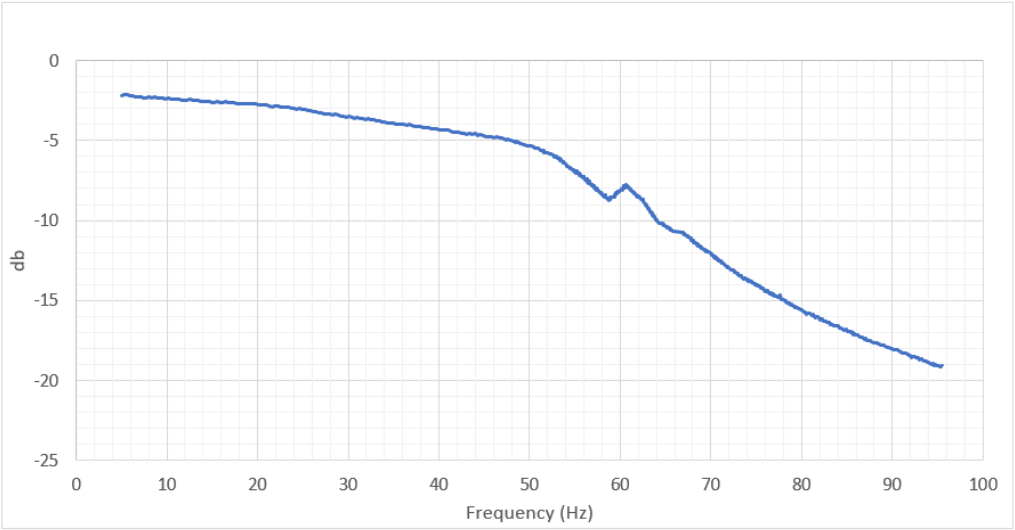
ولی در بلبرینگ تماس زاویه ای فرکانس طبیعی در ۷۰ هرتز رخ داد. در این تست به وضوح کمتر بودن لقی بلبرینگ تماس زاویه ای قابل مشخص است و برتری آن بر بلبرینگ شیار عمیق در نمودار قابل توجیه است.

در تست بعد که تست لقی محوری می‌باشد ابتدا با بلبرینگ های شیار عمیق و بدون استفاده از شیم در بین دو بلبرینگ، تست را انجام داده که نتیجه در شکل (۶) قابل مشاهده است.



شکل ۶- نمودار تست لقی محوری با بلبرینگ شیار عمیق، بدون شیم

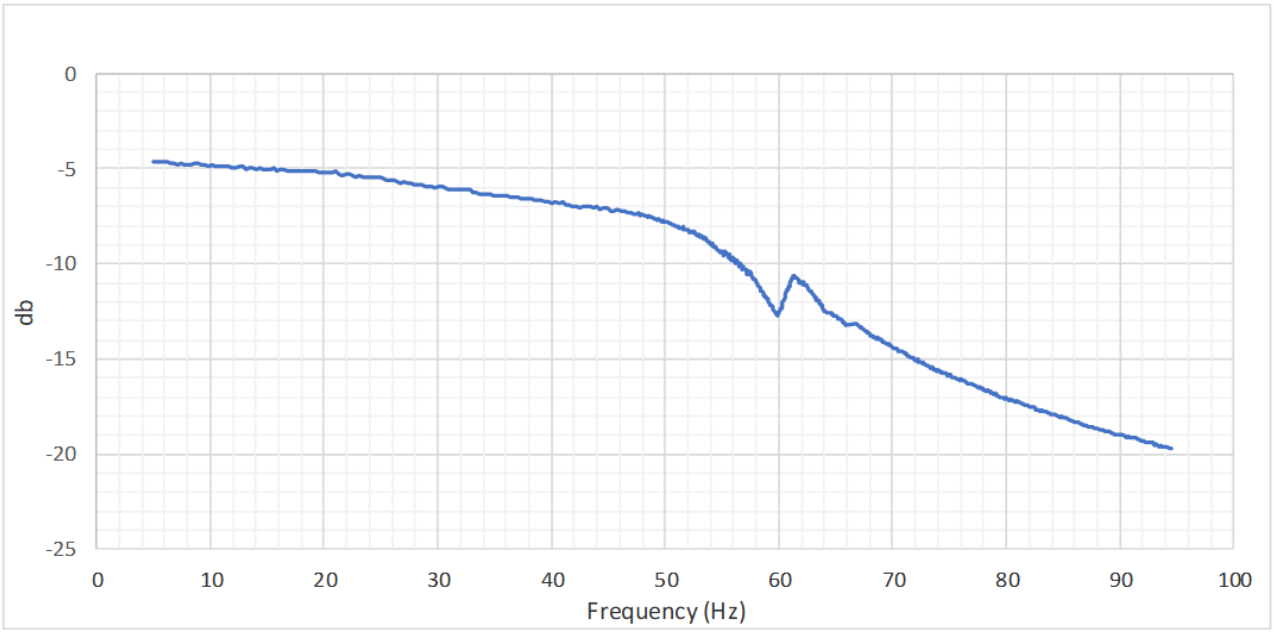
در شکل (۶) و فرکانس ۳۹ شکستگی مشخص است و می‌توان فرکانس طبیعی مجموعه را در این حالت ۳۹ هرتز دانست. با توجه به اینکه مجموعه نابالانسی نداشته و وزن مجموعه خیلی کم است میتوان مجموعه را تاحدودی صلب دانست و این بدان معناست که در حالت عادی بدون لقی، فرکانس طبیعی مجموعه باید عددی بزرگ (بالاتر از ۶۰ هرتز) باشد اما در این تست فرکانس طبیعی ۳۹ هرتز عدد بالایی شناخته نمی‌شود. در تست بعدی، بین دو بلبرینگ شیار عمیق، شیم ۰.۱ میلی متر گذاشته و نتایج در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل ۷- نمودار تست لقی محوری با بلبرینگ شیار عمیق، با شیم ۰.۱ میلی متر

همانطور که از شکل (۷) مشخص است با گذاشتن شیم ۰.۱ میلی متر، فرکانس تشدید مجموعه به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرد و به عدد ۵۸ هرتز رسیده است. این تست با شیم های ۰.۰۵ میلی متر و ۰.۲ میلی متر نیز انجام شد که فرکانس تشدید مجموعه به ترتیب ۴۴ و ۶۴ هرتز اندازه گیری شد.

در تست بعدی از بلبرینگ های تماس زاویه استفاده شد که نتایج در شکل (۸) قابل مشاهده است.



شکل ۸- نمودار تست لقی محوری با بلبرینگ تماس زاویه ای

همانطور که از این نمودار مشخص است؛ فرکانس طبیعی مجموعه در حدود ۶۰ هرتز گزارش شد. با افزایش پیش بار بلبرینگ این عدد تا ۷۷ هرتز افزایش یافت ولی اصطکاک مجموعه افزایش خواهد یافت در نتیجه توصیه می‌گردد حالت میانی از این روش در نظر گرفته شود.

در روش گذاشتن شیم بین دو بلبرینگ شیار عمیق، کاهش لقی به وضوح مشخص است ولی باید این نکته را توجه داشت که گذاشتن شیم در این نوع بلبرینگ ها برای طول عمرهای زیاد مناسب نیست زیرا با گذاشتن شیم، ساچمه ها با حلقه های بیرونی و درونی به صورت زاویه دار درگیر شده و لقی گرفته می‌شود اما نشیمنگاه ساچمه ها لزوما انحنای مناسبی ندارد. شرکت های بلبرینگ سازی، در بلبرینگ های شیار عمیق، فقط انحنای وسط شیار را تضمین می‌کنند و انحنای لبه ها را دقیق نمی‌دانند. در نتیجه بلبرینگ های تماس زاویه ای برای مکانیزم های دقیق و طول عمر زیاد، کارآمد تر خواهد بود.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، تاثیر لقی شعاعی و محوری در یاتاقان‌های شیار عمیق و تماس زاویه‌ای بر عملکرد سیستم‌های مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف، مکانیزم کوچکی طراحی شد که شرایط یاتاقان‌بندی مشابهی با ربات اصلی دارد و امکان انجام تست‌های دقیق و مقایسه‌ای را فراهم می‌سازد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، نشان‌دهنده تفاوت‌های مهمی در عملکرد این دو نوع یاتاقان است که می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر کارایی و طول عمر سیستم‌های مکانیکی داشته باشد.

از جمله یافته‌های مهم این تحقیق می‌توان به برتری یاتاقان‌های تماس زاویه‌ای در کاهش لقی شعاعی و محوری اشاره کرد. این یاتاقان‌ها در فرکانس طبیعی بالاتری نسبت به یاتاقان‌های شیار عمیق عمل می‌کنند، که نشان‌دهنده سختی بیشتر و کاهش لقی در این نوع یاتاقان‌ها است. همچنین، شیم‌گذاری بین یاتاقان‌ها به طور قابل توجهی فرکانس طبیعی سیستم را افزایش داد، اما این روش ممکن است در بلندمدت باعث ایجاد مشکلاتی در یاتاقان‌های شیار عمیق شود. در مقابل، یاتاقان‌های تماس زاویه‌ای توانستند با پیش بار بیشتر، عملکرد بهتری از خود نشان دهند و فرکانس طبیعی بالاتری را تجربه کنند.

این نتایج بیانگر آن است که در کاربردهای حساس مانند رباتیک، استفاده از یاتاقان‌های تماس زاویه‌ای می‌تواند مزایای چشمگیری در کاهش لقی و افزایش کارایی سیستم داشته باشد. انتخاب نوع مناسب یاتاقان بر اساس شرایط کاری و نیازهای خاص هر پروژه، اهمیت بالایی دارد و می‌تواند تأثیر مستقیمی بر عملکرد و پایداری سیستم داشته باشد. همچنین، این تحقیق نشان داد که شیم‌گذاری به عنوان یک روش ساده و مؤثر برای کاهش لقی در برخی از شرایط می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، اما باید به محدودیت‌ها و تأثیرات آن بر طول عمر یاتاقان‌ها نیز توجه داشت.

مراجع

1. K. J. Kirk, A. I. J. Forrester, and J. F. Campbell, "Effect of Clearance on the Stiffness and Damping of Rolling Element Bearings," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 223, no. 11, pp. 2605-2614, Nov. 2009.
2. M. F. Beatty, "Effect of Bearing Clearance on Dynamic Stability of High-Speed Rotors," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 114, no. 2, pp. 311-319, April 1992.
3. S. C. Lim and J. F. Lu, "Wear of Rolling Bearings: Influence of Contaminants and Lubricants," Tribology Transactions, vol. 39, no. 1, pp. 56-64, Jan. 1996.
4. M. F. Beatty, "Effect of Bearing Clearance on Dynamic Stability of High-Speed Rotors," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 114, no. 2, pp. 311-319, April 1992.
5. P. A. Engel and W. T. Daly, "The Role of Bearing Preload in Precision Machinery," Precision Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 67-71, April 1982.
6. T. Harris and M. Kotzalas, "Advanced Concepts of Bearing Technology," Journal of Mechanical Design, vol. 129, no. 6, pp. 1121-1129, June 2007.