



مقایسه‌ی عملکرد الاستومرهای الکترو/مگنتورئولوژیک در میراسازی ارتعاشات روتورهای دوار

محمدالركابی^۱، جلیل رضایی پزند^{۲*} و حمید معین فرد^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد^۳ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۰۵

چکیده

هدف از این مقاله، بررسی کاربرد میراگرهای الاستومری هوشمند مغناطیسی (MRE) یا الکتریکی (ERE) در کاهش میزان ارتعاشات و گسترش ناحیه پایداری سیستم‌های دوار است. در این راستا، از روش المان محدود بر پایه‌ی تئوری تیر رایلی برای مدل کردن محور با میراگرهای ERE/MRE استفاده شده است. در مدل‌سازی اجزا محدود، اینرسی دورانی، اثرات زیروسکوپی و میرایی داخلی محور، لحاظ گردیده است. در شبیه‌سازی، ضرایب سفتی و میرایی الاستومرهای ERE/MRE، تابعی از میدان مغناطیسی/الکتریکی لحاظ شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از الاستومرهای ERE/MRE باعث کم شدن سرعت بحرانی و کاهش دامنه ارتعاشات می‌شود و سرعت حدی پایداری سیستم بهبود می‌یابد. همچنین، نتایج حاکی از آن است که استفاده از الاستومرهای MR در مقایسه با الاستومرهای ER، تاثیر بیشتری در میراسازی ارتعاشات و گسترش ناحیه‌ی پایداری سیستم دارند. در نهایت، به منظور گسترش ناحیه پایداری سیستم دوار به سرعت‌های دورانی بالاتر، از یک استراتژی کنترلی روشن-خاموش ساده استفاده شده است. طرح جدید می‌تواند برای بهینه‌سازی سطح ارتعاش و گسترش ناحیه پایداری سیستم‌های دوار کارایی موثری داشته باشد.

کلمات کلیدی: دینامیک روتورها، میراگر الاستومری الکتریکی، میراگر الاستومری مغناطیسی، استراتژی کنترلی روشن-خاموش.

Performance Comparison of the Electro/Magneto-Rheological Elastomers for Vibration Reduction of Rotating Rotors

Mohammed A.K.AL Rkabi¹, J. Rezaeepazhand^{2,*}, Hamid Moeenfar³¹ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.² Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.³ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

The objective of the current study is to investigate the application of smart Magneto/Electro-Rheological (MR/ER) elastomers in vibration suppression and extending the stability region of the rotors system. The rotor is modeled via finite element method based on the Rayleigh beam theory. Proposed model takes the rotary inertia, gyroscopic effects and internal damping of the shaft into account. The stiffness and damping of the elastomers are considered as functions of the applied electric or magnetic fields. The simulation results reveal that the use of MR/ER elastomer leads to down shifting of the critical speeds and a reduction in its corresponding vibration amplitude. Also, the stability limit speed of the system is improved. Simulation results revealed that MR elastomer supports are superior on ER elastomer supports in the vibration suppression and extending the stability region of the rotor system. Finally, to improve the stability of the rotor system to higher operating rotational speeds, an on-off control strategy is employed. The proposed novel idea can be effectively utilized for optimization of the vibration level and widening the stability regions of rotating systems.

Keywords: Rotor Dynamic; Electro-Rheological Elastomer; Magneto-Rheological Elastomer; On-Off Control Strategy.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۵۱۲۳؛ فکس: ۰۵۱۳۸۸۰۶۰۵۵

آدرس پست الکترونیک: jrezaeep@um.ac.ir

۱- مقدمه

اخیراً محققان امکان استفاده از مواد هوشمند به عنوان تکیه‌گاه، به‌منظور کاهش ارتعاشات در سیستم‌های دوار را بررسی کرده‌اند. این مواد، دارای قابلیت تغییر خواص مکانیکی و رئولوژیکی بوسیله اعمال اثرات خارجی هستند [۱-۳] و می‌توانند با موفقیت برای کاهش ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی به‌کار روند.

مقالات متعددی کاربرد میراگرهای سیالی ER را در کنترل ارتعاشات سیستم‌های دوار مطالعه کرده‌اند [۴-۱۲]. برخی از آن‌ها بر کنترل ارتعاشات سیستم‌هایی تمرکز کرده‌اند که در آن‌ها، سیال ER در وضعیت برش مستقیم (مد کلاچ) کار می‌کند [۴-۷] یا میراگر با سیال ER در مود فشاری قرار دارد [۸-۱۲]. نیکولایسن و هوک [۴] به‌صورت تجربی فن‌آوری سیال ER را به‌منظور کنترل ارتعاشات یک سیستم روتور یک‌سر گیردار به‌کار بردند. آن‌ها توانایی میراگر سیالی ER در کاهش ارتعاشات روتور را نشان دادند. یائو و منگ [۵] به‌صورت تحلیلی و تجربی، همان نوع از میراگر ER را با روتور یک‌سر گیردار مطالعه کردند و نتایج مشابهی بدست آوردند. بائر و دنیل [۶] به بررسی تحلیلی و تجربی میراگرهای دیسکی سیالی ER پرداختند. آن‌ها دو مدل را برای میراگر سیالی ER در مد برشی توسعه دادند. مدل اول، مدل تغییر یافته بینگهام بود. این مدل نسبتاً ساده تنش برشی را برحسب ولتاژ اعمالی و سرعت در میراگر محاسبه می‌کند. مدل دوم، مدل تغییر یافته بوک-ون بود که با تحریک هارمونیک و نامیزانی آزمایش شد.

محققان بسیار دیگری میراگرهای لایه فشاری با سیال ER را بررسی کردند. این مطالعات بیش‌تر برپایه اصول میراگرهای لایه فشاری هستند و با جایگذاری روغن روانساز به‌کار رفته در میراگر لایه فشاری متداول (SFD) با سیال رئوالکتریکی (ER) بدست می‌آیند. محققان این نوع از میراگرها را برای کنترل ارتعاشات روتور و همچنین بهبود پایداری بوسیله کنترل میدان الکتریکی استفاده می‌کنند. دیماروگوناتس و کولیس [۸] یک روتور صلب شبیه‌سازی شده توسط مدل بینگهام را بررسی کردند که بر روی دو یاتاقان ژورنال روانکاری شده با سیال ER غیرنیوتونی قرار گرفته بود. آن‌ها دریافتند که خواص چنین یاتاقان‌هایی می‌تواند به‌میزان قابل توجهی با اعمال میدان الکتریکی تغییر

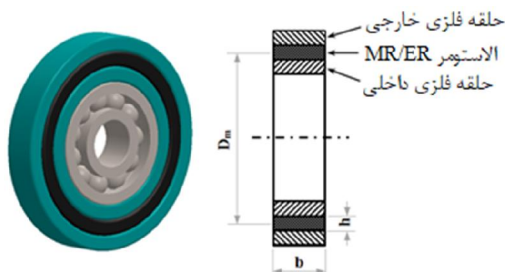
نماید و ناحیه پایداری وسیع‌تر شود. گوژی و همکاران [۹] یک SFD با سیال ER چند لایه طراحی کردند. سپس، به بررسی تحلیلی و تجربی رفتار دینامیکی یک روتور تک دیسک انعطاف‌پذیر یک‌سر آویزان پرداختند که بر روی یک SFD با سیال ER چند لایه قرار گرفته بود. موریشیتا و میتسوئی [۱۰] رفتار دینامیکی یک روتور انعطاف‌پذیر با میراگر لایه فشاری با سیال ER را به‌صورت تجربی مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که سرعت بحرانی اول و دوم روتور به‌همراه نسبت میرایی با افزایش قدرت میدان الکتریکی، به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. تیچی [۱۱] با استفاده از مدل پلاستیک بینگهام، میراگر لایه فشاری با سیال ER را در یاتاقان ژورنال تحلیل کرد. لومپاسفسکی و همکاران [۱۲] خصوصیات دینامیکی روتور با یاتاقان‌های ژورنال را مطالعه کردند که در آن از سیال رئوالکتریکی به‌عنوان روانساز استفاده می‌شد.

تحقیقات بسیاری نیز در مورد مواد MR انجام شده است. ژو [۱۳] تأثیر میراگر سیالی MR را بر پاسخ ارتعاشی یک روتور به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کرد. او تأیید کرد که به‌کار بردن سیال MR در کاهش میزان ارتعاشات روتور تأثیر فراوانی دارد. فورت و همکاران [۱۴] به بحث در مورد طراحی، مدل‌سازی و ارزیابی تجربی میراگر لایه فشاری با سیال MR پرداختند. ونگ و همکاران [۱۵] اثرات استفاده از میراگر MR بر خصوصیات پاسخ نامیزان روتور صلب و انعطاف‌پذیر را مطالعه کردند. آن‌ها از مدل پلاستیک بینگهام و تقریب یاتاقان بلند در شبیه‌سازی استفاده کردند. قاسمی و همکاران [۱۶] به مطالعه تحلیلی سیستم روتور-یاتاقان با یاتاقان هوشمند پرداختند که در آن از میراگر سیالی MR در مود فشاری استفاده شده بود. آن‌ها یک مدل ریاضی روتور انعطاف‌پذیر نصب شده روی میراگر سیالی MR ارائه کردند. همچنین، به انتخاب سیال MR با لزجت مناسب پرداختند و از تکنیک کنترلی روشن-خاموش استفاده کردند. ایرانی‌نژاد و اوحدی [۱۷] با استفاده از روش المان محدود، رفتار دینامیکی روتور انعطاف‌پذیر شامل میراگر سیالی MR را بررسی نمودند. زاپومل و همکاران [۱۸] میراگر لایه فشاری با سیال MR را به‌منظور کاهش ارتعاشات روتورهای صلب مطالعه کردند و یک مدل دوسویه ریاضی-موادی ارائه دادند. استفاده از مدل موادی دوسویه توصیف بهتری از رفتار

خواص الكتریکی قابل کنترل در نظر گرفته شده‌اند. پاسخ نامیزانی و تحلیل پایداری روتور با تکیه‌گاه‌های MRE/ERE نیز بررسی شده‌اند. علاوه‌براین، درباره اثرات میدان مغناطیسی الكتریکی بر سرعت بحرانی و پاسخ ارتعاشی بحث شده است و عملکرد آن‌ها مقایسه شده است.

۲- خصوصیات ویسکوالاستیک و مدل دینامیکی الاستومرهای MR/ER

در این بخش، ضرایب سفتی و میرایی برای لایه‌های الاستومری MR/ER تعیین می‌شوند. ماده الاستومری MR/ER اطراف یاتاقان اضافه شده است و الاستومرها بین دو حلقه فلزی هم‌مرکز همانند شکل ۱ قرار گرفته‌اند.



شکل ۱- هندسه المان حلقوی الاستومری MR/ER

خصوصیات ویسکوالاستیک مواد MR/ER به صورت تحلیلی و تجربی، مطالعه شده‌است. مدل‌های بسیاری برای بیان رفتار مواد MR در ناحیه پیش از تسلیم ارائه شده‌اند. یو و همکاران [۲۴] نمودارهایی به روش تجربی بدست آوردند که وابستگی مدول ذخیره‌سازی و ضریب اتلاف را به چگالی شار مغناطیسی توضیح می‌دهد. این نتایج را می‌توان به سفتی و میرایی کلاسیک تبدیل کرد که در شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های بسیاری برای بیان رفتار مواد ER در ناحیه پیش از تسلیم توسعه داده شده است. این مدل‌ها شامل مدل کلونین-وویت، مدل جامد سه پارامتری و مدل ویسکوالاستیک چهار پارامتری می‌شوند [۲۵]. مواد ER رفتار ویسکوالاستیک از خود بروز می‌دهند که در آن بخشی از انرژی ورودی بازیابی می‌شود و بخشی به شکل گرما مستهلک می‌گردد. بنابراین، رفتار ویسکوالاستیک الاستومرهای ER در ناحیه پیش از

فیزیکی سیال رئومغناطیسی که درحین فرآیند میرایی تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گرفته است، فراهم می‌کند. نتایج نشان داد که تغییر القای مغناطیسی در لایه‌ی روانساز به عملکرد بهینه میراگر در گستره وسیعی از سرعت کاری روتور منجر می‌شود و افزایش پایداری عددی در روش‌های محاسباتی را تأیید می‌نماید.

سیالات MR/ER، متشکل از مایع به‌عنوان جزء اصلی و ذرات پراکنده یا ذرات فرومغناطیس می‌باشند. در چنین مایعاتی، مشکل رسوب‌گذاری اجتناب ناپذیر است [۱۹]. از سوی دیگر، برای هر دو نوع میراگرهای سیالی ER، باید ولتاژ بالا (بیش از ۷۰۰۰ V) به سطوح ثابت یا متحرک اعمال شود. اگر به هر دلیلی مانند نقص در عایق‌بندی الكتریکی، این اجزای با ولتاژ بالا با یکدیگر تماس پیدا کنند، تولید جرقه می‌نمایند که قابلیت اطمینان میراگرها را کاهش می‌دهند [۱۳].

الاستومرهای ER/MR که نسل جدیدی از مواد ER/MR هستند تشکیل شده‌اند از ذراتی با ثابت دی‌الکتریک بالا یا ذرات آهن معلق در زمینه پلیمر. هنگامی که یک میدان الكتریکی/مغناطیسی اعمال می‌شود، ذرات قطبی می‌شوند و در راستای میدان الكتریکی/مغناطیسی به شکل زنجیر یا ساختار ستونی درمی‌آیند [۲۰]. الاستومرهای MR (MRE) و ER (ERE) نه‌تنها همانند سیالات MR/ER پاسخ سریع و برگشت‌پذیری مشابهی دارند، بلکه با توجه به رسوب‌گذاری و پایداری ذرات، نسبت به سیالات MR/ER دارای برتری هستند. علاوه‌براین، می‌توانند در گستره فرکانسی وسیعی کار کنند [۲۱ و ۲۲]. همچنین، اندازه و شکل الاستومرهای MR/ER را می‌توان به راحتی برای نیازمندی‌های عملی طراحی نمود [۲۳] و مدول الاستیسیته‌ی آن‌ها با اعمال میدان مغناطیسی الكتریکی قابل کنترل است.

تاکنون با توجه به مطالعات صورت گرفته، تحقیقی در مورد کاربرد الاستومرهای MR/ER به‌منظور کنترل ارتعاشات سیستم روتور-یاتاقان انعطاف‌پذیر منتشر نشده است. بنابراین در این مقاله به‌عنوان یک ایده نو، کاربرد الاستومرهای MR/ER جهت کنترل ارتعاشات یک سیستم روتور-یاتاقان انعطاف‌پذیر بررسی می‌گردد. نحوه مدل‌کردن روتور با تکیه‌گاه‌های MRE/ERE ارائه شده است که در آن الاستومرهای MR/ER به‌صورت مواد ویسکوالاستیک خطی با

[۲۵] برای بررسی پارامترهای k_1 , k_2 , c_2 و k_b استفاده کردند. یافته‌های آن‌ها به‌طور مختصر در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای k_1 , k_2 , c_2 و k_b [۱۹]

پارامتر	قدرت میدان الکتریکی، E (kV mm ⁻¹)			
	۰/۰	۰/۵	۱/۰	۱/۵
k_1 (kPa)	۴۵۱/۲	۵۲۶/۴۵	۷۳۷/۰۱	۹۹۰/۳۵
k_2 (kPa)	۱۷/۹۰	۵۰/۰۵	۱۵۱/۵۸	۳۳۶/۹۷
k_b (kPa)	۱۹/۸۹	۵۴/۴۱	۱۶۳/۴۹	۳۵۸/۵۹
c_2 (kPa s)	۰/۸۷	۴/۷۴	۱۰/۳۲	۱۸/۱۴

باید توجه داشت که در این مطالعه موردی، خواص دینامیکی الاستومر MR (مدول ذخیره‌سازی، G' و ضریب اتلاف η) در ناحیه پیش از تسلیم مطابق شکل ۲ هستند [۲۴]. این خواص، به‌صورت تابعی از چگالی شار مغناطیسی سنجیده شده‌اند و خواص دینامیکی الاستومر ER در ناحیه پیش از تسلیم، از مرجع [۱۹] انتخاب شده‌اند. این خواص به‌صورت تابعی از فرکانس و میدان الکتریکی هستند. علاوه بر این، بر اساس [۲۷]، سفتی k^* و میرایی c^* حلقه‌های میراگر الاستومر MR/ER ، به‌صورت تابعی از فرکانس ω و اندازه چگالی شار یا قدرت میدان الکتریکی E و به‌صورت زیر تعیین می‌شود

$$k^*(\omega, E \text{ or } B) = 3 \cdot n \cdot \pi \cdot D_m \cdot k_L \cdot G'(\omega, E \text{ or } B) \quad (۴)$$

$$c^*(\omega, E \text{ or } B) = k^* \cdot \frac{\eta(\omega, E \text{ or } B)}{\omega} \quad (۵)$$

که در آن k^* و c^* سفتی و میرایی حلقه‌های میراگر الاستومری MR/ER ، n تعداد حلقه‌های موازی الاستومری، D_m قطر میانی حلقه الاستومری MR/ER همانند شکل ۱، ω فرکانس تحریک و k_L پارامتر شکل موثر بر سفتی حلقه الاستومری می‌باشد که برابر است با [۲۷ و ۲۸]

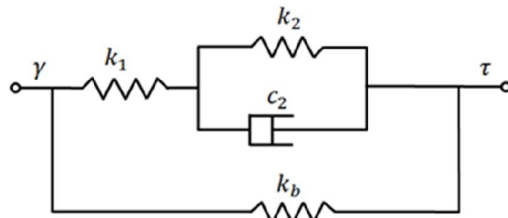
$$k_L = \frac{1}{6} \beta (5 + \beta^2) \quad (۶)$$

در این معادله، $\beta = b/h$ بیانگر نسبت عرض به ارتفاع حلقه الاستومری MR/ER است.

تسلیم، توسط یک مدل ویسکوالاستیک خطی ارائه شده است.

لی و همکاران [۲۵] با توسعه مدل ویسکوالاستیک چهار پارامتری، خواص مواد الاستومرهای MR را تخمین زدند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این مدل بسط مدل جامد سه پارامتری کلاسیک می‌باشد. در واقع در شکل ۲، پارامترهای k_1 , k_2 و c_2 پارامترهای مدل جامد ویسکوالاستیک استاندارد هستند که بیشتر با میرایی مدل ارتباط دارند. از سوی دیگر، k_b بیانگر وابستگی مدول الاستیسیته به میدان الکتریکی اعمالی است. تنش برشی τ طبق مدل ویسکوالاستیک چهار پارامتری به‌وسیله مدول مختلط G^* با کرنش برشی γ مرتبط است [۲۶].

$$\tau = G^* \gamma = (G' + jG'') \gamma \quad (۱)$$



شکل ۲- مدل ویسکوالاستیک چهار پارامتری برای تکیه‌گاه‌های ER

که $\sqrt{-1} = j$ ، G' مدول ذخیره‌سازی مرتبط با انرژی قابل بازیابی (الاستیک) و G'' مدول اتلاف است که اثرات استهلاک انرژی را نشان می‌دهد. ضریب اتلاف η به‌صورت نسبت این دو پارامتر تعریف می‌شود. G' و G'' با استفاده از تئوری ویسکوالاستیسیته خطی، به شرح ذیل بدست می‌آیند. جزئیات مربوطه در مرجع [۲۶] قابل رویت است.

$$G' = \frac{(k_1 k_b + k_2 k_b + k_1 k_2)}{(k_1 + k_2)} + \frac{(c_2 \omega k_1)^2}{(k_1 + k_2)[(k_1 + k_2)^2 + (c_2 \omega)^2]} \quad (۲)$$

$$G'' = \frac{c_2 \omega k_1^2}{[(k_1 + k_2)^2 + (c_2 \omega)^2]} \quad (۳)$$

در این معادلات، ω فرکانس تحریک است. وی و همکاران [۱۹] مدل چهار پارامتری ویسکوالاستیک را برای الاستومر ER امتحان کردند. آن‌ها از روش پیشنهادی لی و همکاران

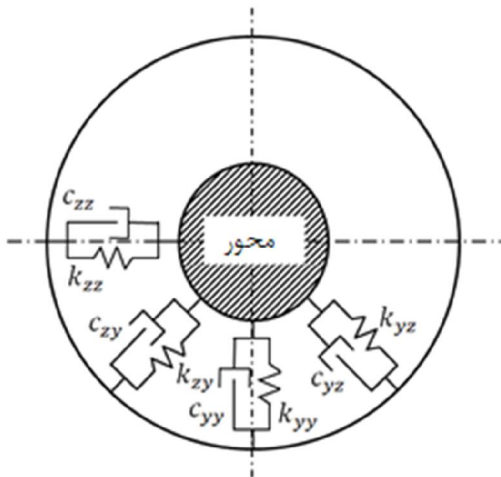
دیسک به صورت المان صلب فرض می‌شود که فقط با انرژی جنبشی توصیف می‌شود. المان دیسک فقط با یک گره در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، بردار تغییر مکان گرهی $\{q\}_d^i = [v_i \ w_i \ \theta_i \ \psi_i]^T$ و ماتریس المان‌های دیسک متناسب با دستگاه مختصات مرجع به صورت زیر بدست می‌آید [۲۹ و ۳۲]

$$[[M_T]_d^i + [M_R]_d^i]\{\ddot{q}\}_d^i - \Omega[G]_d^i\{\dot{q}\}_d^i = \{F\}_d^i \quad (۸)$$

که $[M_T]_d^i$ ، $[M_R]_d^i$ و $[G]_d^i$ به ترتیب ماتریس‌های جرمی انتقالی، اینرسی دورانی و ژيروسکوپی دیسک می‌باشند.

۳-۳-۳ المان یاتاقان

رابطه غیرخطی بین نیرو و خیز در بیشتر انواع یاتاقان‌ها، تحلیل آن‌ها را پیچیده می‌سازد و برای اجتناب از این پیچیدگی در تحلیل دینامیکی روتورها، می‌توان رابطه‌ای خطی بین نیرو و خیز در یاتاقان فرض کرد [۳۲-۳۵]. بنابراین، یاتاقان‌ها همانند شکل ۴، المانی انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند که به صورت فنرها و میراگرهایی به ترتیب با چهار ضریب سفتی $(k_{zy}, k_{yz}, k_{yy}, k_{zz})$ و چهار ضریب میرایی $(c_{zy}, c_{yz}, c_{yy}, c_{zz})$ نمایش داده می‌شوند.



شکل ۴- نمای شماتیک از المان یاتاقان

معادله حرکت یاتاقان‌ها را برحسب بردار تغییر مکان گرهی در گره نام، را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۹ و ۳۰]

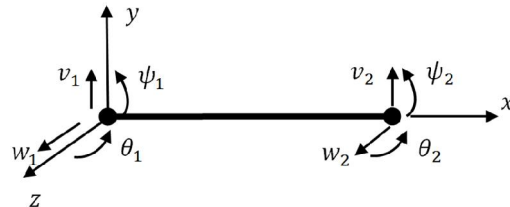
۳- مدل‌سازی روتور با روش المان محدود

سیستم روتوری مورد مطالعه، از یک محور، یک یا چند دیسک و چندین یاتاقان غلتشی منعطف تشکیل شده است. در این قسمت، یک مدل ریاضی برای روتور استخراج خواهد شد. سپس بر اساس تئوری تیر رایلی، فرمولاسیون المان محدود سیستم ارائه خواهد گردید. در استخراج معادلات، توزیع جرم، اینرسی دورانی، اثرات ژيروسکوپی و فرم لژ میرایی داخلی ماده ی محور مورد نظر قرار خواهند گرفت.

۳-۱- المان محور

محور را می‌توان به المان‌های محدود تیر تقسیم کرد. هر المان همانند شکل ۳ دارای دو گره با هشت درجه آزادی (چهار درجه آزادی در هر گره شامل دو جابه‌جایی v و w و دو دوران θ و ψ) می‌باشد. معادله حرکت المان محور روتور تحت سرعت دوران ثابت Ω rad/sec شامل اثرات جابه‌جایی، اینرسی دورانی و ژيروسکوپی و میرایی داخلی ماده تشکیل‌دهنده محور می‌باشد که برابر است با [۲۹-۳۱]

$$[[M_T]_s^e + [M_R]_s^e]\{\ddot{q}\}_s^e + [\eta_v[K_B]_s^e - \Omega[G]_s^e]\{\dot{q}\}_s^e + [[K_B]_s^e + (\Omega\eta_v)[K_C]_s^e]\{q\}_s^e = \{F\}_s^e \quad (۷)$$



شکل ۳- نمای شماتیک المان محدود محور

که در آن $[M_T]_s^e$ و $[M_R]_s^e$ به ترتیب ماتریس‌های جرمی انتقالی و دورانی، $[K_B]_s^e$ ماتریس سفتی خمشی، $[K_C]_s^e$ ماتریس دوران، $[G]_s^e$ ماتریس ژيروسکوپی المان شفت و $\{q\}_s^e$ میدان جابه‌جایی گرهی است. $\{F\}_s^e$ بردار نیروی خارجی و η_v ضریب میرایی داخلی ویسکوز است.

۳-۲- المان دیسک صلب

دیسک در روتورها می‌تواند بسته به شرایط، نماینده پره‌های توربین، پروانه پمپ، چرخ‌طیار، قرقره یا چرخ‌دنده باشد.

تحقیق از روش ضریب سفتی دینامیکی معادل برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی تکیه‌گاه استفاده می‌گردد. سفتی دینامیکی معادل توسط $F(\Omega)/Q_1(\Omega)$ تعیین می‌شود. براساس این روش، مدل تئوری یاتاقان و تکیه‌گاه الاستومری MR/ER نشان داده شده در شکل ۵-الف بر اساس تحقیق انجام شده توسط ریبیرو و همکاران [۳۷] به سیستم فنر معادل با سفتی مختلط همانند شکل ۵-ب کاهش می‌یابد.

$$k_{eq} = \frac{F(\Omega)}{Q_1(\Omega)} = k - \frac{k^2}{k + k^* - \Omega^2 m_A + j\Omega c^*} \quad (11)$$

سپس، معادله حرکت سیستم مرکب از الاستومر MR/ER یاتاقان به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} [K]_{sup}^i & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \{q\}_{sup}^i = \{F\}_{sup}^i \quad (12)$$

که در آن، $\{q\}_{sup}^i$ بردار تغییرمکان عمومی برای تکیه‌گاه است و $[K]_{sup}^i$ برابر است با

$$[K]_{sup}^i = \begin{bmatrix} k_{(eq)yy} & 0 \\ 0 & k_{(eq)zz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

۳-۵- معادلات حرکت و تحلیل آن

معادلات حرکت کلی سیستم کامل با جمع‌کردن معادله حرکت هر المان (معادله (۷)، (۸) و (۱۲)) بدست می‌آیند.

$$[M]\{\ddot{q}\} + [D]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F\} \quad (14)$$

در این معادله، $[M]$ ماتریس جرمی شامل اثرات حرکت انتقالی و دورانی شفت و دیسک صلب، $[D]$ ماتریس میرایی و بیانگر حالت لزج میرایی داخلی ماده سازنده شفت و کوپل ژيروسکوپی شفت و دیسک‌ها، $[K]$ ماتریس سفتی شامل اثرات سفتی المان‌های شفت و تکیه‌گاه، $\{q\}$ بردار تغییرمکان سیستم روتور و $\{F\}$ بردار تحریک شامل نیروهای تحریک ناشی از جرم نامیزان و سایر نیروهای خارجی می‌باشد.

۴- شبیه‌سازی نتایج

در این بخش، برای مقایسه بین تکیه‌گاه‌های MR و ER، چندین شبیه‌سازی عددی ارائه شده است تا بتوان به کمک آن‌ها، اثر استفاده از تکیه‌گاه‌های الاستومری ویسکوالاستیک

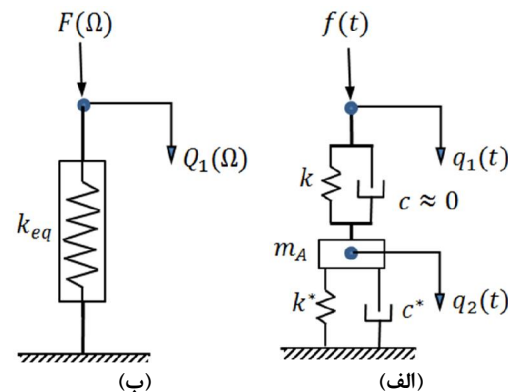
$$\begin{bmatrix} [C]_b^i & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \{\dot{q}\}_b^i + \begin{bmatrix} [K]_b^i & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \{q\}_b^i = \{F\}_b^i \quad (9)$$

که در آن

$$[K]_b^i = \begin{bmatrix} k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}, [C]_b^i = \begin{bmatrix} c_{yy} & c_{yz} \\ c_{zy} & c_{zz} \end{bmatrix} \quad (10)$$

۳-۴- درنظر گرفتن اثر الاستومر MR/ER

در این مقاله، مدل استفاده شده برای توصیف رفتار دینامیکی لایه‌های الاستومری MR/ER و یاتاقان ساچمه‌ای، به‌منظور سهولت فقط شامل سفتی و میرایی مستقیم (اجزای YY و ZZ) است. به‌علاوه، به‌دلیل اختلاف زیاد میرایی بین لایه‌ی الاستومری MR/ER و یاتاقان ساچمه‌ای در صورت بهره‌گیری از مواد الاستومری MR/ER، از نیروی میرایی یاتاقان ساچمه‌ای بدون کاهش دقت قابل‌ملاحظه‌ای، صرف‌نظر شده است [۳۶]. این مدل را در یک راستا می‌توان به‌صورت شکل ۵-الف نمایش داد. در این شکل، m_A نصف جرم یاتاقان ساچمه‌ای و حلقه‌ی فلزی داخلی است. این رویکرد، بر اساس مرجع [۳۷]، پارامترهای معادل تعمیم‌یافته می‌باشد که اجازه می‌دهد دینامیک مجموعه (روتور-یاتاقان-تکیه‌گاه) را فقط به‌صورت تابعی از مختصات عمومی سیستم روتور بیان کرد.



شکل ۵- مدل جرم-فنر-میراگر یاتاقان و لایه الاستومر در یک راستا: الف) با جزئیات و ب) سفتی دینامیکی معادل

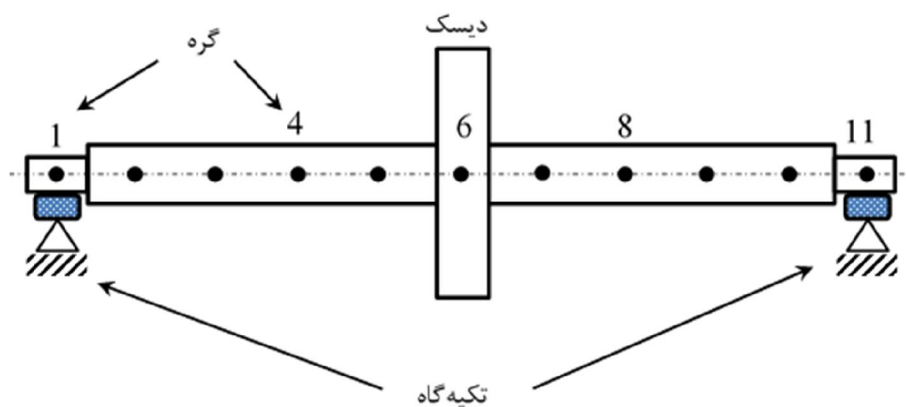
روش پارامترهای معادل تعمیم‌یافته از ضریب سفتی دینامیکی معادل استفاده می‌کند. این روش به‌اندازه کافی دقیق است و زمان کمتری نیاز دارد [۳۷]. بنابراین، در این

با ER، در اطراف ياتاقان اضافه شده است و الاستومر بين دو حلقه فلزی هم‌مرکز قرار گرفته است. شكل ۶ روتور و مدل المان محدود را نشان می‌دهد كه برپایه تئوری تیر رایلی است. ده المان با چهار درجه آزادی در هر گره در نظر گرفته شده است. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، این تعداد المان همگرایی نتایج را تضمین می‌کنند و نتایج بدست آمده، دارای دقت کافی هستند. همچنین، خصوصیات روتور فلزی، دیسك، و الاستومر MR و ER در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ آورده شده است.

هوشمند (ERE و MRE)، بر سطح ارتعاشات روتور انعطاف‌پذیر را بررسی نمود.

۴-۱- جزئیات سیستم مورد مطالعه

در این بخش، مدلی عددی از یک روتور ساده با تکیه‌گاه‌های MRE و ERE ارائه شده‌است که شامل یک دیسك قرار گرفته در وسط محور و دو ياتاقان یکسان می‌باشد. هریک از تکیه‌گاه‌ها از ياتاقان ساچمه‌ای و المان حلقه‌ای الاستومر MR یا ER، همانند شكل ۱، تشکیل شده اند. لایه الاستومر MR



شکل ۶- جزئیات فیزیکی و مدل المان محدود روتور

جدول ۲- خصوصیات هندسی و مواد روتور

قطر	طول	مدول الاستیسیته	چگالی	ضریب پواسون	میرایی ویسکوز داخلی
۲۵mm	۵۰۰mm	۲۰۶GPa	۷۸۵۰kg/m ³	۰/۳	۰/۰۰۰۲s

جدول ۳- خصوصیات هندسی و مواد دیسك

قطر خارجی	ضخامت	چگالی	نامیزانی جرمی	موقعیت از انتهای سمت چپ روتور
۱۵۰mm	۲۵mm	۷۷۵۰kg/m ³	۴/۵gr.mm	۲۵۰mm

جدول ۴- خصوصیات حلقه الاستومر MR/ER

حلقه الاستومر	قطر میانی	عرض	ارتفاع	تعداد حلقه‌ها	مدول ذخیره‌سازی و مدول اتلاف
MR	۶۸mm	۱۲mm	۶mm	۱	مطابق شكل ۲
ER	۶۸mm	۱۲mm	۶mm	۱	مطابق معادلات (۲) و (۳) و جدول ۱

جدول ۵ واضح است که مزیت بزرگ استفاده از MRE و ERE، کاهش قابل توجه (بیش از ۹۹٪) دامنه پاسخ نامیزان است. همچنین استفاده از MRE و ERE باعث انتقال سرعت بحرانی به سرعت‌های کمتر در مقایسه با تکیه‌گاه‌های متداول می‌شود. ولی در این حالت، دامنه ارتعاشات در سرعت بحرانی در مقایسه با وقتی که از یاتاقان ساچمه‌ای استفاده شود، کاهش می‌یابد.

جدول ۵- تأثیر استفاده از الاستومر MR و ER بر پاسخ

نامیزان در سرعت بحرانی اول			
نوع تکیه‌گاه	دامنه (μm)	کاهش دامنه (%)	سرعت بحرانی
یاتاقان ساچمه‌ای	۲۳۸۲	---	۵۳۹۷
MRE با یاتاقان ساچمه‌ای	۳/۳۶۴	۹۹/۸۶	۳۶۲۰
ERE با یاتاقان ساچمه‌ای	۹/۳۹۱	۹۹/۶۱	۳۳۳۳

۳-۴- اثر الاستومر MR/ER بر سرعت حدی پایداری (SLS)

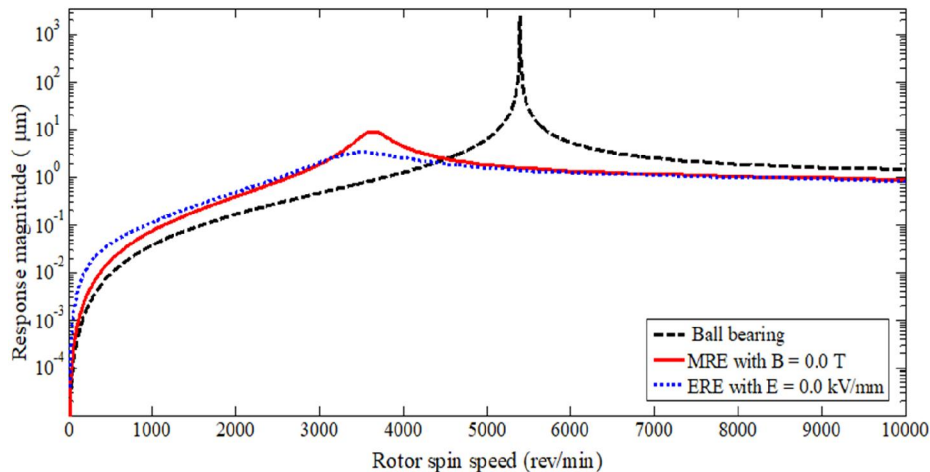
شکل ۸، قسمت حقیقی مقدار ویژه برای سرعت‌های مختلف روتور با یاتاقان ساچمه‌ای، با تکیه‌گاه الاستومری MR و با تکیه‌گاه الاستومری ER را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که استفاده از MRE و ERE به‌طور قابل توجهی SLS را افزایش داده است. این پارامتر برای سیستم روتور-یاتاقان ساچمه‌ای، ۵۳۹۷rpm است (که اولین سرعت بحرانی می‌باشد)، ولی پس از به‌کاربردن تکیه‌گاه الاستومری MR، به ۱۱۴۲۰rpm و پس از استفاده از تکیه‌گاه الاستومری ER به ۱۰۸۳۰rpm افزایش یافته است.

شکل ۹ پاسخ زمانی روتور با تکیه‌گاه الاستومری ER و MR را در $\Omega = 11000 \text{ rpm}$ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که روتور با تکیه‌گاه الاستومری MR پایدار است، درحالی‌که با تکیه‌گاه الاستومری ER ناپایدار می‌شود. سرعت حدی پایداری سیستم در حالت استفاده از الاستومر ER، ۱۰۸۳۰rpm می‌باشد، که با به‌کارگیری تکیه‌گاه الاستومری MR، به ۱۱۴۲۰rpm افزایش می‌یابد.

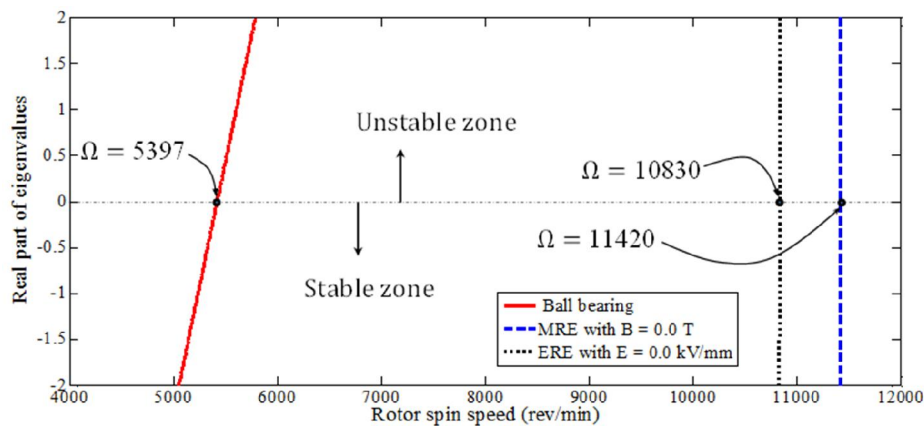
در بخش‌های بعد، به بررسی تاثیر استفاده از الاستومرهای MR/ER بر سرعت بحرانی و سرعت حدی پایداری سیستم خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است که اگر سرعت دورانی یک سیستم دوار، با یکی از فرکانس‌های طبیعی سیستم برابر شود، دامنه ارتعاشات حاصله، بسیار بالا خواهد شد. این سرت دورانی، سرعت بحرانی نامیده می‌شود. دامنه ارتعاشات سیستم‌های دوار در سرعت بحرانی دارای بیشترین مقدار خود است. از سوی دیگر، سرعت حدی پایداری، بزرگ‌ترین سرعت دورانی روتور است که در آن سرعت، سیستم دوار، دارای پایداری است. قابل توجه است که سرعت حدی پایداری الزاما با سرعت بحرانی برابر نیست. در ادامه جزئیات بیشتر مربوط به سرعت‌های بحرانی و سرعت حدی پایداری در سیستم مورد بررسی، ارائه خواهد شد.

۴-۲- اثر الاستومر MR/ER بر دامنه ارتعاشات و سرعت‌های بحرانی

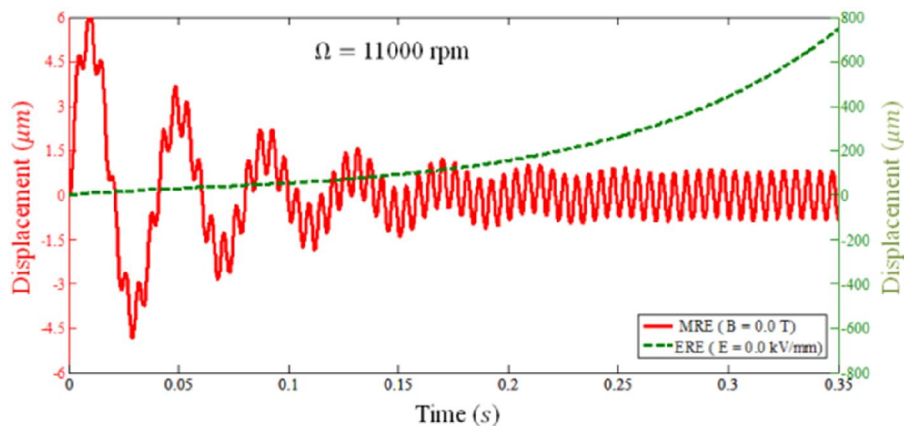
در این قسمت، برای مقایسه اثر الاستومرها بر ارتعاشات سیستم با روتور با یاتاقان ساچمه‌ای، روتور با تکیه‌گاه الاستومری MR (یاتاقان ساچمه‌ای و الاستومر MR) و روتور با تکیه‌گاه الاستومری ER (یاتاقان ساچمه‌ای و الاستومر ER) مدل می‌شود. روتور با تکیه‌گاه الاستومری MR بدون در نظر گرفتن جریان (بدون حضور میدان مغناطیسی $B = 0.0T$)، و روتور با تکیه‌گاه الاستومری ER بدون در نظر گرفتن میدان الکتریکی ($E = 0.0 \text{ kV/mm}$) مدل شده است. سیستم به دلیل نامیزانی در دیسک (واقع در گره ۶) تحریک شده است و سرعت دورانی به تدریج از صفر تا ۱۰۰۰۰rpm با گام ۱rpm تغییر می‌کند. شکل ۷ منحنی پاسخ فرکانسی را برای سه حالت نشان می‌دهد: بدون تکیه‌گاه الاستومری (فقط یاتاقان ساچمه‌ای)، با تکیه‌گاه الاستومری MR (یاتاقان ساچمه‌ای و الاستومر MR) و با تکیه‌گاه الاستومری ER (یاتاقان ساچمه‌ای و الاستومر ER). سرعت بحرانی اول برای حالت اول، ۵۳۹۷rpm، برای حالت دوم ۳۶۲۰rpm و برای حالت سوم ۳۳۳۳rpm می‌باشد. جدول ۵ خلاصه‌ای از تأثیر استفاده از الاستومر MR و الاستومر ER بر پاسخ نامیزان را نشان می‌دهد. این جدول شامل اطلاعاتی درباره سرعت‌های بحرانی و دامنه ارتعاشات در این سرعت‌ها است. از شکل ۷ و



شکل ۷- پاسخ نامیزان برای روتور با یاتاقان ساچمه‌ای، با تکیه‌گاه الاستومری MR و با تکیه‌گاه الاستومری ER



شکل ۸- نمودار پایداری روتور با یاتاقان ساچمه‌ای، با تکیه‌گاه الاستومری MR و ER



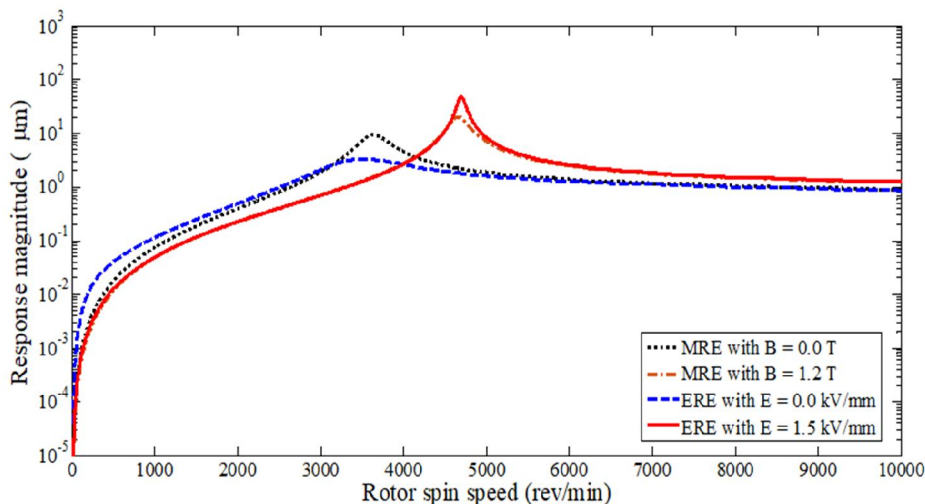
شکل ۹- پاسخ زمانی روتور با تکیه‌گاه الاستومری MR و ER در $\Omega = 11000 \text{ rpm}$

۴-۴- تأثیر میدان مغناطیسی/الکتریکی بر سرعت‌های بحرانی و SLS

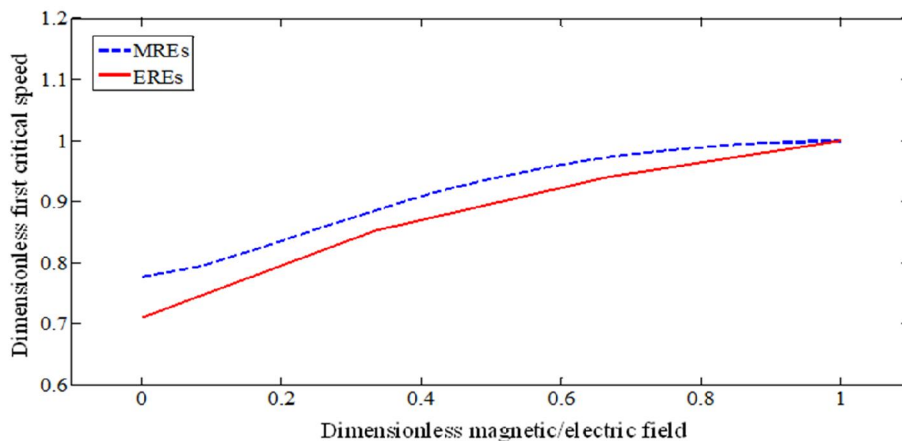
هدف این بخش، بررسی اثر میدان مغناطیسی/الکتریکی بر سرعت‌های بحرانی و SLS است. سیستم روتور-یاتاقان با تکیه‌گاه الاستومری MR با میدان‌های مغناطیسی مختلف و همان سیستم، ولی با تکیه‌گاه الاستومری ER با میدان‌های الکتریکی مختلف شبیه‌سازی شد. شکل ۱۰ دامنه پاسخ در گره ۶ (محل نصب دیسک نامیزان) را نسبت به سرعت در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی/الکتریکی، نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در هر دو نوع سیستم، سرعت‌های بحرانی با افزایش میدان مغناطیسی/الکتریکی به تدریج بیشتر می‌شوند. سرعت بحرانی در $B = 0.0T$ ، 3620 rpm است، در حالی که سرعت بحرانی در $B = 1.2 T$ به 4655 rpm افزایش یافته است. سرعت بحرانی در $E = 0.0 \text{ kV/mm}$ 3333 rpm است، در حالی که سرعت بحرانی در $E = 1.5 \text{ kV/mm}$ به 4693 rpm افزایش یافته است. این رفتار ناشی از افزایش سفتی موثر تکیه‌گاه‌ها می‌باشد. با افزایش میدان مغناطیسی/الکتریکی، سفتی موثر تکیه‌گاه افزایش می‌یابد که باعث بیشتر شدن سرعت بحرانی سیستم می‌گردد. البته شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش سرعت بحرانی با افزایش دامنه پاسخ نامیزان در سرعت بحرانی همراه است.

برای درک بهتر نتایج، سرعت بحرانی اول بی بعد برای سیستم روتور-یاتاقان با تکیه‌گاه الاستومری MR و ER برحسب چگالی شار مغناطیسی بی‌بعد یا میدان الکتریکی بی‌بعد در شکل ۱۱ رسم شده است. از این شکل می‌توان استنباط کرد که هنگامی که میدان مغناطیسی/الکتریکی افزایش می‌یابد، سرعت‌های بحرانی به تدریج و به صورت مطلوبی افزایش پیدا می‌کنند. شکل ۱۲ قسمت حقیقی مقدار ویژه بر حسب سرعت‌های دورانی مختلف، در چگالی شارهای مغناطیسی و الکتریکی مختلف را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که SLS با افزایش چگالی شار مغناطیسی یا میدان الکتریکی، کاهش می‌یابد. برای مثال، SLS در $B = 1.2T$ ، $89/34\%$ کمتر از SLS در $B = 0.0T$ است و در $E = 1.5 \text{ kV/mm}$ ، $84/43\%$ کمتر از SLS در $E = 0.0 \text{ kV/mm}$ است.

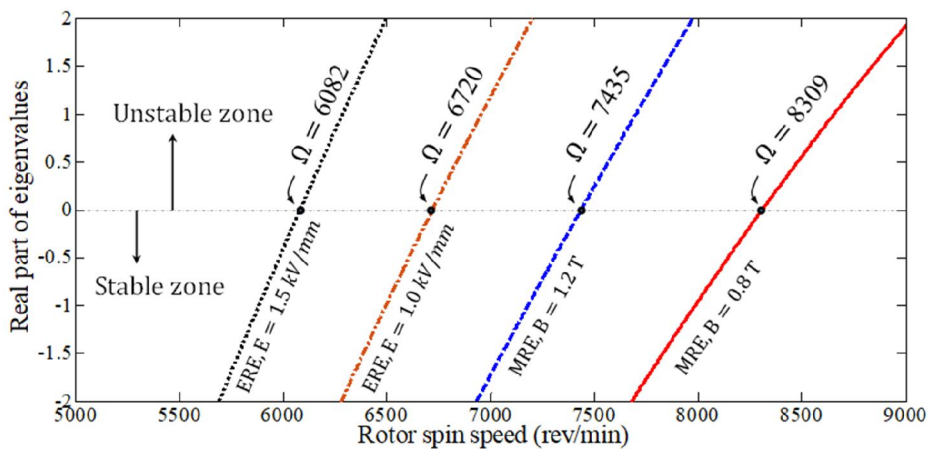
برای آنکه تأثیر میدان مغناطیسی/الکتریکی بر SLS بهتر درک شود، SLS بی‌بعد برای همین سیستم با تکیه‌گاه الاستومری MR و ER برحسب چگالی شار مغناطیسی بی‌بعد یا میدان الکتریکی بی‌بعد در شکل ۱۳ رسم شده است. باید توجه داشت هرچند افزایش قدرت میدان مغناطیسی/الکتریکی باعث کاهش SLS می‌شود، ولی کماکان با این افزایش، SLS بیشتری را نسبت به سیستمی با یاتاقان معمولی فراهم می‌آورد. مثلاً SLS سیستمی با تکیه‌گاه



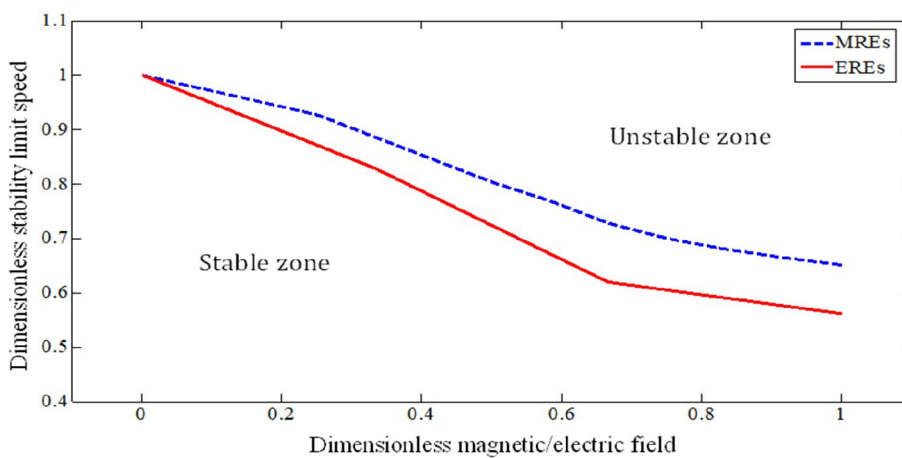
شکل ۱۰- پاسخ نامیزانی روتور با تکیه‌گاه الاستومری MR و ER در میدان‌های مختلف



شکل ۱۱- سرعت بحرانی اول بی بعد بر حسب میدان مغناطیسی/الکتریکی بی بعد



شکل ۱۲- تغییرات بخش حقیقی مقدار ویژه برای میدان‌های مغناطیسی/الکتریکی مختلف



شکل ۱۳- SLS بی بعد بر حسب میدان مغناطیسی/الکتریکی بی بعد

۲۷/۴٪ و ۵۲/۷٪ بیشتر از SLS سیستمی با یاتاقان معمولی کنترلی روشن-خاموش پیشنهاد می‌شود تا از سطح ارتعاشات در نزدیکی سرعت بحرانی بکاهد و ناحیه پایداری روتور را گسترش دهد. رویکرد کنترلی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود: برای روتور با تکیه‌گاه الاستومری MR، هنگامی که روتور شروع به کار می‌کند و در حال افزایش سرعت است، میدان مغناطیسی روشن می‌شود. مطابق شکل ۱۴، پاسخ از منحنی نقطه آبی‌رنگ دامنه برحسب سرعت ($B = 1.2 \text{ T}$) پیروی می‌کند. زمانی که سرعت روتور از سرعت بحرانی (3620 rpm) گذشت و به مقدار معینی رسید (نزدیک محل تلاقی دو منحنی 0.0 T و 1.2 T)، جریان خاموش می‌شود ($B = 0.0 \text{ T}$) و پاسخ از منحنی خط چین آبی‌رنگ دامنه بر حسب سرعت ($B = 0.0 \text{ T}$) تبعیت می‌کند. اگر سرعت روتور در حال کاهش باشد، روش کنترلی برعکس می‌شود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، همین الگوریتم برای روتور با تکیه‌گاه الاستومری ER نیز قابل اعمال است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین دامنه روتور در محل دیسک به اندازه $82/1\%$ مقایسه با بیشترین دامنه در حالت $B = 1.2 \text{ T}$ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، SLS به 11420 rpm باز می‌گردد (SLS سیستم، $52/7\%$ بیشتر از SLS همان سیستم بر روی یک یاتاقان معمولی است). در رابطه با روتور با تکیه‌گاه الاستومری ER، بیشترین دامنه روتور در محل دیسک به میزان قابل توجهی (تا $94/6\%$) در مقایسه با بیشترین دامنه روتور در $E = 1.5 \text{ kV/mm}$ کاهش یافته است. علاوه بر این، SLS به 10830 rpm باز می‌گردد (SLS سیستم $50/2\%$ بیشتر از SLS همان سیستم بر روی یک یاتاقان معمولی است). لذا می‌توان نتیجه گرفت که اثرات جانبی استفاده از MRE/ERE با میدان مغناطیسی الکتریکی به خوبی با بهره‌گیری از روش کنترلی روشن-خاموش برطرف شده است و عملکرد خوبی را برای گستره وسیعی از سرعت‌های عملکردی تضمین می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

کاهش ارتعاشات دستگاه‌های دوار نامیزان، اهمیت ویژه‌ای در دینامیک سیستم‌های دوار دارد. هدف از این مقاله، کنترل ارتعاشات، بهبود عملکرد و افزایش پایداری روتور انعطاف‌پذیر بوسیله‌ی الاستومرهای هوشمند الکترو/مگنتورولوزیک بود.

الاستومری MR در $B = 0.0 \text{ T}$ و $B = 1.2 \text{ T}$ ، به ترتیب است. این اعداد در سیستمی با تکیه‌گاه الاستومری ER در $E = 0.0 \text{ kV/mm}$ و $E = 1.5 \text{ kV/mm}$ به ترتیب $1/3$ و $50/2\%$ خواهند بود. باید توجه داشت که هرچند افزایش چگالی شار مغناطیسی یا میدان الکتریکی باعث کاهش SLS می‌شود، ولی اعمال میدان مغناطیسی یا الکتریکی دارای مزایایی نیز می‌باشد. برای نمونه، افزایش میدان مغناطیسی یا الکتریکی، سرعت بحرانی را بیشتر می‌کند. همچنین، شرایطی را برای طراحی کنترلرهایی جهت تضمین پایداری سیستم در گستره وسیعی از سرعت‌های کاری فراهم می‌آورد. این موضوع با جزئیات بیشتر در بخش‌های بعد مطرح می‌شود.

۴-۵- تأثیر میدان مغناطیسی در الاستومرهای MR، و میدان الکتریکی در الاستومرهای ER بر دامنه ارتعاشات

در این بخش، تأثیر میدان مغناطیسی بر دامنه ارتعاشات بررسی می‌شود. بدین منظور، پاسخ تکیه‌گاه سمت چپ (گره ۱) و دیسک (گره ۶) در سرعت 3620 rpm (که نزدیک به سرعت بحرانی اول است) با میدان‌های مغناطیسی مختلف بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که دامنه بحرانی در تکیه‌گاه و دیسک در $B = 1.2 \text{ T}$ به ترتیب $91/62\%$ و $83/49\%$ کمتر از مقادیر آن‌ها در $B = 0.0 \text{ T}$ می‌باشد. همین‌طور شبیه‌سازی سیستم در تکیه‌گاه سمت چپ (گره ۱) و دیسک (گره ۶) در سرعت 3333 rpm نشان می‌دهد که با افزایش قدرت میدان الکتریکی دامنه بحرانی در تکیه‌گاه و دیسک در $E = 1.5 \text{ kV/mm}$ به ترتیب $84/67\%$ و $64/55\%$ کمتر از مقدار آن‌ها در $E = 0.0 \text{ kV/mm}$ می‌باشد. درحقیقت، افزایش میدان الکتریکی باعث افزایش سفتی و میرایی سیستم روتور و کاهش قابل توجه دامنه ارتعاشات آن می‌شود.

۴-۶- طرح کنترلی روشن-خاموش

همان‌طور که اشاره شد، افزایش میدان مغناطیسی الکتریکی اعمالی سبب انتقال سرعت بحرانی به سمت مقادیر بیشتر می‌شود. البته، این رویداد با افزایش اندکی در دامنه و کاهش در SLS همراه است. برای اجتناب از اثرات جانبی، روش

نیاز، می‌تواند به‌خوبی دامنه ارتعاشات را در نزدیکی سرعت بحرانی کاهش و ناحیه پایداری روتور را گسترش دهد.

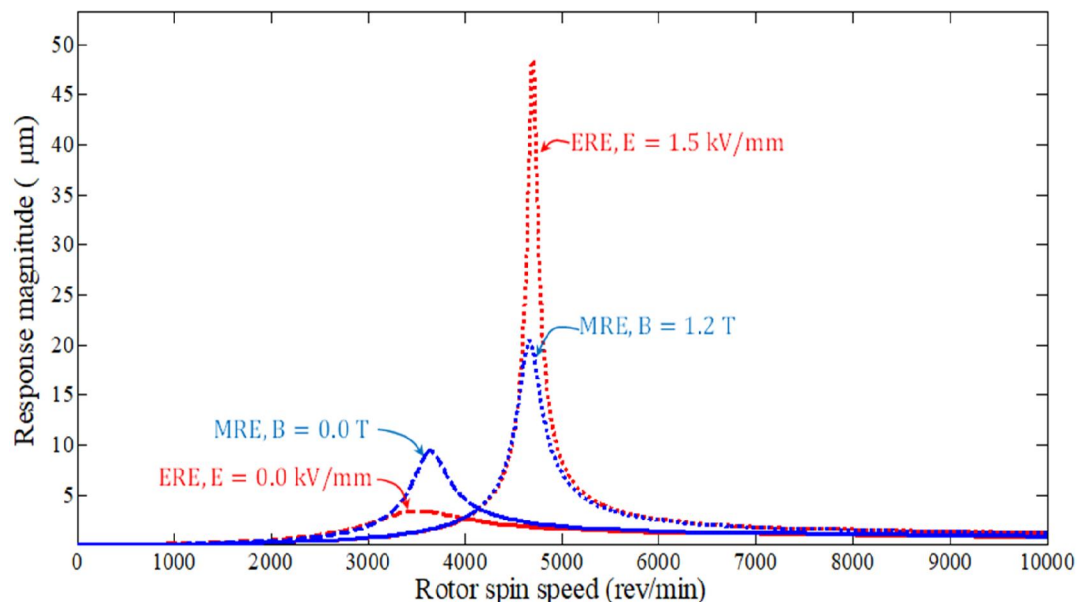
(۳) نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌ها حاکی از این بود که استفاده از الاستومرهای MR در مقایسه به الاستومرهای ER، عملکرد بهتری در بهبود سرعت حدی پایداری و کاهش دامنه‌ی ارتعاشات دارند.

نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به صورت عملی در سیستم‌های دواری که از ارتعاشات در سرعت‌های بحرانی رنج می‌برند مورد استفاده قرار بگیرند و باعث بهبود عملکرد آن‌ها شود.

نتایج ویژه‌ی بدست آمده را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

(۱) تکیه‌گاه‌های الاستومری ER/MR در مقایسه با یاتاقان‌های معمولی به‌خوبی ارتعاشات روتور نامیزان را کاهش می‌دهند. علاوه‌براین، سرعت حدی پایداری روتور افزایش می‌یابد. البته سرعت‌های بحرانی روتور، و همین‌طور دامنه‌ی ارتعاشات در این سرعت‌های بحرانی، اندکی کاهش می‌یابند.

(۲) ملاحظه شد که تکیه‌گاه الاستومری ER/MR با استفاده از یک روش کنترلی ساده روشن-خاموش برای تعیین میدان الکتریکی یا مغناطیسی مورد



شکل ۱۴- تأثیر روش کنترلی روشن-خاموش بر دامنه شفت در گره ۶ (دیسک)

vibration control: a survey. Smart Mater Struct 5: 464-482.

[4] Nikolajsen JL, Hoque MS (1990) An electro viscous damper for rotor applications. J Vib Acoust 112: 440-443.
 [5] Yao Z, Meng G (1999) Vibration control of a rotor system by disk type electro rheological damper. Sound Vib 219: 175-188.
 [6] Bauer J, Daniel GB (2011) Modeling and testing of an ERF vibration damper For Light Rotors with large amplitudes. 21st International Congress of

۵- مراجع

[1] Yalcintas M, Dai H (1999) Magneto rheological and electro rheological materials in adaptive structures and their performance comparison. Smart Mater Struct 8: 560-573.
 [2] Gawade SS, Jadhav AA (2012) A review on electro rheological (ER) fluids and its applications. Int J Eng Tech 1: 1-7.
 [3] Stanway R, Sproston JL, El-Wahed AK (1996) Applications of electro-rheological fluids in

- [21] Ladipo IL, Fadly JD, Faris WF (2016) Characterization of magneto rheological elastomer (MRE) engine mounts. *Mater Today-Proc* 3: 411-418.
- [22] Behrooz M, Wang X, Gordaninejad F (2014) Modeling of a new semi-active/passive magneto rheological elastomer isolator. *Smart Mater Struct* 23: 045013 (7pp).
- [23] Gao L, Zhao X (2007) Mechanical and electrical properties of hydrous electro rheological elastomers based on gelatin/glycerin/water hybrid. *J Appl Polym Sci* 104: 1738-1743.
- [24] Yu M, Xing Z, Zheng X, Fu J, Choi SB (2015) Experimental investigation on the field-dependent properties of magneto rheological elastomer with circular honeycomb holes. *Smart Mater Struct* 1: 1-5.
- [25] Li WH, Zhou Y, Tian TF (2010) Viscoelastic properties of MR elastomers under harmonic loading. *Rheol Acta* 49: 733-740.
- [26] Zhu G, Liu X (1996) Theory of viscoelasticity. 1st edn. The Press of the University of Science and Technology of China, Hefei.
- [27] Liebich R, Scholz A, Wieschalla M (2012) Rotors supported by elastomer ring dampings: Experimental and numerical investigations. 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, London.
- [28] Alexander B (2005) Elastomer rings for vibration suppression in rotor dynamics: Theory, measurements and optimized design. Technische Universität Berlin.
- [29] Zorzi ES, Nelson HD (1977) Finite element simulation of rotor-bearing systems with internal damping. *J Eng Power-T ASME* 99: 71-76.
- [30] Han Q, Chu F (2015) Parametric instability of flexible rotor-bearing system under time-periodic base angular motions. *Appl Math Model* 39: 4511-4522.
- [31] Das AS, Dutt JK, Ray K (2010) Active vibration control of unbalanced flexible rotor-shaft systems parametrically excited due to base motion. *Appl Math Model* 34: 2353-2369.
- [32] Ozgiiven HN, Ozkan ZL (1984) Whirl speeds and unbalance response of multi bearing rotors using finite elements. *J Vib Acoust* 106: 72-79.
- [33] Friswell M, Penny J, Garvey S, Lees A (2010) Dynamics of rotating machines. 1st edn. Cambridge University Press.
- [34] Ku DM (1998) Finite element analysis of whirl speeds for rotor-bearing systems with internal damping. *Mech Syst Signal Pr* 12: 599-610.
- [35] Kalita M, Kakoty SK (2004) Analysis of whirl speeds for rotor-bearing systems supported on Mechanical Engineering, October 24-28, Natal, Brazil.
- [7] Lim S, Park S, Kim K (2005) AI vibration control of high-speed rotor systems using electro rheological fluid. *Sound Vib* 284: 685-703.
- [8] Dimarogonas AD, Kollias A (1992) Electro-rheological fluid controlled Smart Journal Bearings. *STLE Tribol T* 35: 611-618.
- [9] Guozhi Y, Fah YF, Guang M (2000) Electro-rheological multi-layer squeeze film damper and its application to vibration control of rotor system. *J Vib Acoust* 122: 7-11.
- [10] Morishita S, Mitsui Y (1992) Controllable squeeze film damper an application of electro-rheological fluid. *J Vib Acoust* 114: 354-357.
- [11] Tichy JA (1993) Behavior of a squeeze film damper with an electro-rheological fluid. *STLE Tribol T* 36: 127-133.
- [12] Loumpasefski O, Tzifas I, Nikolakopoulos PG, Papadopoulos CA (2017) Dynamic analysis of rotor-bearing systems lubricated with electro rheological fluids. *P I Mech Eng K-J Mul* 232: 153-168.
- [13] Zhu C (2001) Dynamics of a rotor supported on magneto-rheological fluid squeeze film damper. *Chinese J Aeronaut* 14: 7-12.
- [14] Wang J, Meng G (2005) Study of vibration control of a rotor system using a magneto rheological fluid damper. *J Vib Control* 11: 263-276.
- [15] Wang J, Meng G, Feng N, Hahn EJ (2005) Dynamic performance and control of squeeze mode MR fluid damper-rotor system. *Smart Mater Struct* 14: 529-539.
- [16] Ghasemi AH, Ohadi AR, Ghaffari MH (2008) Vibration control of a rotor-bearing system with smart bearing using magneto rheological fluids. 15th International Congress on Sound and Vibration, Daejeon, Korea.
- [17] Irannejad M, Ohadi A (2017) Vibration analysis of a rotor supported on magneto rheological squeeze film damper with short bearing approximation: A contrast between short and long bearing approximations. *J Vib Control* 23: 1792-1808.
- [18] Zapoměl J, Ferfecki P, Kozánek J (2017) Modelling of magneto rheological squeeze film dampers for vibration suppression of rigid rotors. *Mech Sci* 127: 191-197.
- [19] Wei K, Bai Q, Meng G, Ye L (2.11) Vibration characteristics of electro rheological elastomer sandwich beams. *Smart Mater Struct* 20: 055012 (8pp).
- [20] Zhou GY, Wang Q (2005) Magneto rheological elastomer-based smart sandwich beams with nonconductive skins. *Smart Mater Struct* 14: 1001-1009.

- [37] Ribeiro EA, Pereira JT, Bavastrri CA (2015) Passive vibration control in rotor dynamics: Optimization of composed support using viscoelastic materials. *Sound Vib* 351: 43-56.
- [36] Bavastrri CA, Ferreira ES, Espíndola JJ, Lopes EO (2008) Modeling of dynamic rotors with flexible bearings due to the use of viscoelastic materials. *J Braz Soc Mech SCI* 30: 22-29.
- fluid film bearings. *Mech Syst Signal Pr* 18: 1369-1380.