

طراحی و تحلیل عددی یک جداساز ارتعاش با سختی شبه صفر

مهدی غلامی^{۱*}، رضا تیکنی^۲^۱ ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مکانیک، ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک^۲ ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مکانیک، ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، دانشیار مهندسی مکانیک

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.gholami@me.iut.ac.ir

چکیده

ارتعاشات مکانیکی ناخواسته یکی از چالش‌های اساسی در سامانه‌های حساس و دقیق محسوب می‌شوند و می‌توانند موجب کاهش کارایی، فرسایش اجزا و بروز خطاهای عملکردی شوند. هدف این پژوهش، طراحی و بررسی یک ساختار فراماده مکانیکی با رفتار سختی شبه‌صفر به منظور بهبود جداسازی ارتعاشات در فرکانس‌های پایین است. در این راستا، یک سلول واحد فراماده با ترکیب المان‌های دارای سختی مثبت و تیرهای پیش‌کمانش به عنوان المان سختی منفی طراحی شد و رفتار آن به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی با استفاده از نرم‌افزارهای کامسول و متلب انجام شده‌اند. در تحلیل استاتیکی، رفتار سازه از طریق استخراج منحنی نیرو-جابجایی و شناسایی ناحیه سختی شبه‌صفر ارزیابی گردید. همچنین برای بررسی عملکرد دینامیکی، پاسخ سیستم تحت تحریک هارمونیک پایه در بازه‌ای از فرکانس‌ها محاسبه شد و نرخ انتقال‌پذیری ارتعاش به عنوان شاخص اصلی ارزیابی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج عددی نشان می‌دهند که با تنظیم مناسب پارامترهای هندسی، می‌توان محدوده پایداری و ناحیه سختی شبه‌صفر ساختار را کنترل کرد. همچنین تحلیل فرکانسی بیانگر کاهش محسوس نرخ انتقال ارتعاش در یک بازه مشخص از فرکانس‌های پایین نسبت به مدل خطی معادل است. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ساختارهای فراماده مکانیکی با رفتار سختی شبه‌صفر می‌تواند راهکاری مؤثر و کم‌هزینه برای جداسازی ارتعاشات فرکانس پایین فراهم آورد.

کلمات کلیدی: سختی منفی، سختی شبه صفر، جداساز ارتعاش

۱- مقدمه

کاهش و جداسازی ارتعاشات ناخواسته یکی از مسائل مهم و رایج در بسیاری از حوزه‌های مهندسی از جمله تجهیزات دریایی [۱]، هوافضا [۲] و وسایل نقلیه [۳] است، این ارتعاشات می‌توانند عملکرد تجهیزات را کاهش دهند، دقت سیستم‌ها را مختل کنند و در برخی شرایط باعث خرابی یا کاهش طول عمر سازه شوند. جداسازی ارتعاشات معمولاً از طریق نصب جداکننده‌های غیرفعال بین منبع ارتعاش و سازه محافظت‌شده انجام می‌شود. از نظر تئوری، عملکرد هر جداسازی را می‌توان با کاهش فرکانس طبیعی آن بهبود داد [۴]، زیرا باعث می‌شود ارتعاشات در فرکانس‌های پایین بهتر جذب شوند. با این حال، ساخت جداکننده‌های سنتی با سختی بسیار پایین دشوار است؛ چراکه چنین سازه‌هایی در برابر بار فرو می‌ریزند و پایدار نمی‌مانند. برای غلبه بر این محدودیت، پژوهش‌های اخیر بر توسعه مکانیزم‌های سختی شبه صفر متمرکز شده‌اند [۵]. فان و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۰ یک تیر سینوسی و دو قوس نیم‌دایره را به ترتیب به عنوان

عنصر سختی منفی و سختی مثبت انتخاب کردند و بدین ترتیب یک سلول واحد با ویژگی‌های سختی شبه صفر ساختند. بانرجی و همکاران [۷] در سال ۲۰۲۳ یک فراماده دوکاربردی مبتنی بر سختی شبه صفر پیشنهاد دادند که هم‌زمان قابلیت جذب لرزش و برداشت انرژی را داشت. دستگاه پیشنهادی شامل یک تکیه‌گاه با سختی شبه صفر است که به‌طور چشمگیری فرکانس طبیعی سیستم را کاهش می‌دهد و چهار تیر طره‌ای پیزوالکتریک که انرژی لرزشی را متمرکز و برداشت می‌کنند. ژانگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۱ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، یک تیر منحنی با شکل هندسی منحصر به فرد طراحی کردند و ویژگی‌های سختی شبه صفر سفارشی ایجاد کردند. باوجود پیشرفت‌های فوق، چالش اصلی همچنان پابرجاست، بیشتر ساختارهای موجود برای دستیابی به عملکرد مطلوب در فرکانس پایین، حجیم و پیچیده هستند و کاربرد آن‌ها در محیط‌های با محدودیت فضایی دشوار است؛ بنابراین، توسعه ساختارهای فشرده، سبک و قابل سفارشی‌سازی که هم عملکرد بالایی در جذب ارتعاشات فرکانس پایین داشته باشند و هم پایداری استاتیکی کافی فراهم کنند، ضرورت دارد.

در این پژوهش، یک ساختار مکانیکی با رفتار سختی شبه صفر طراحی و تحلیل شده است. هدف اصلی، ارائه چارچوبی برای طراحی واحدهای سازنده بهینه^۱ (RUCs) است که بتوانند ضمن حفظ ابعاد جمع‌وجور، عملکرد پهن باند در جداسازی ارتعاشات فرکانس پایین را ارائه دهند. این رویکرد می‌تواند پایه‌ای مناسب برای توسعه فرامواد کاربردی در سامانه‌های مهندسی با محدودیت فضایی و نیاز به جداسازی ارتعاشات فرکانس پایین باشد.

۲- سختی مثبت^۲

در سامانه‌های مکانیکی متداول، هنگامی که نیروی فشاری یا کششی به یک جسم وارد می‌شود، جسم در برابر تغییر شکل مقاومت می‌کند و این رفتار به‌صورت سختی مثبت شناخته می‌شود. به‌صورت کلی، اگر رابطه نیرو و جابه‌جایی در ناحیه خطی سیستم با رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$k(x) = \frac{dF}{dx} \quad (1)$$

که در آن F نیروی بازگرداننده و x جابه‌جایی است، در صورت مثبت‌بودن مقدار k ، سیستم دارای سختی مثبت است. در این حالت، افزایش جابه‌جایی موجب افزایش نیروی بازگرداننده در جهت مخالف تغییر شکل می‌شود که نشان‌دهنده پایداری تعادل مکانیکی است. در اغلب سازه‌ها و مواد الاستیک متداول، از جمله فنرهای خطی، تیرها و الاستومرها، رفتار سختی مثبت مشاهده می‌شود؛ این ویژگی موجب می‌شود که سیستم پس از اعمال نیرو، تمایل به بازگشت به وضعیت اولیه داشته باشد. بااین‌حال، وجود صرف سختی مثبت باعث محدود شدن عملکرد سیستم‌های جداسازی ارتعاش در فرکانس‌های پایین می‌شود، زیرا فرکانس طبیعی چنین سیستم‌هایی مستقیماً به مقدار سختی بستگی دارد. ازاین‌رو، برای دستیابی به جداسازی مؤثر در محدوده فرکانس‌های پایین، استفاده از مفاهیم جدید مانند سختی منفی و در ادامه سختی شبه صفر موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است [۹-۱۱].

۳- سختی منفی^۳

سختی منفی زمانی رخ می‌دهد که با افزایش جابه‌جایی، نیروی بازگرداننده کاهش یابد؛ به عبارتی مشتق نیرو نسبت به جابه‌جایی مطابق رابطه (۲) منفی شود [۱۲].

^۱ Representative Unit Cells

^۲ Positive Stiffness

^۳ Negative Stiffness

$$k(x) = \frac{dF}{dx} < 0 \quad (۲)$$

در مکانیک کلاسیک، پایداری یک سیستم مکانیکی را می‌توان با تحلیل انرژی پتانسیل کل آن بررسی کرد. فرض کنیم سیستم تحت بارگذاری خارجی قرار دارد و جابه‌جایی تعادلی آن برابر با x است. انرژی پتانسیل کل سیستم را می‌توان به صورت رابطه (۳) بیان کرد.

$$U(x) = U_s(x) - p(x) \quad (۳)$$

که در آن $U_s(x)$ انرژی کرنشی ذخیره شده در سازه (مثلاً انرژی خمشی یا کششی) و $p(x)$ کار انجام شده توسط بار خارجی است. شرط تعادل سیستم از رابطه (۴) حاصل می‌شود.

$$\frac{dU}{dx} = 0 \quad (۴)$$

و شرط پایداری تعادل نیز به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$\frac{d^2U}{dx^2} > 0 \quad (۵)$$

مطابق رابطه (۶) سختی مؤثر $k(x)$ برابر با مشتق نیروی بازگرداننده نسبت به جابه‌جایی است.

$$k(x) = \frac{dF}{dx} = \frac{d^2U}{dx^2} \quad (۶)$$

بنابراین، مطابق رابطه (۷) علامت مشتق دوم انرژی پتانسیل، نوع رفتار سختی سیستم را تعیین می‌کند و سختی منفی در حالت ناپایدار سیستم ایجاد می‌شود.

$$k(x) = \frac{d^2U}{dx^2} < 0 \quad (۷)$$

بنابراین، از دیدگاه انرژی پتانسیل، سختی منفی زمانی رخ می‌دهد که منحنی انرژی پتانسیل کل سیستم دارای انحنای منفی باشد، یعنی سیستم در حالت تعادل ناپایدار قرار گرفته است. همچنین مطالعات مختلف نشان داده‌اند که تیرهای پس کمانش می‌توانند رفتار سختی منفی از خود نشان دهند [۱۳، ۱۴]. این مفهوم پایه اصلی طراحی سازه‌های دوپایداره^۱ و فرامواد دارای سختی شبه صفر محسوب می‌شود که با کنترل هوشمندانه هندسه و مرزها، می‌توان پاسخ دینامیکی سیستم را در فرکانس‌های پایین به شدت کاهش داد.

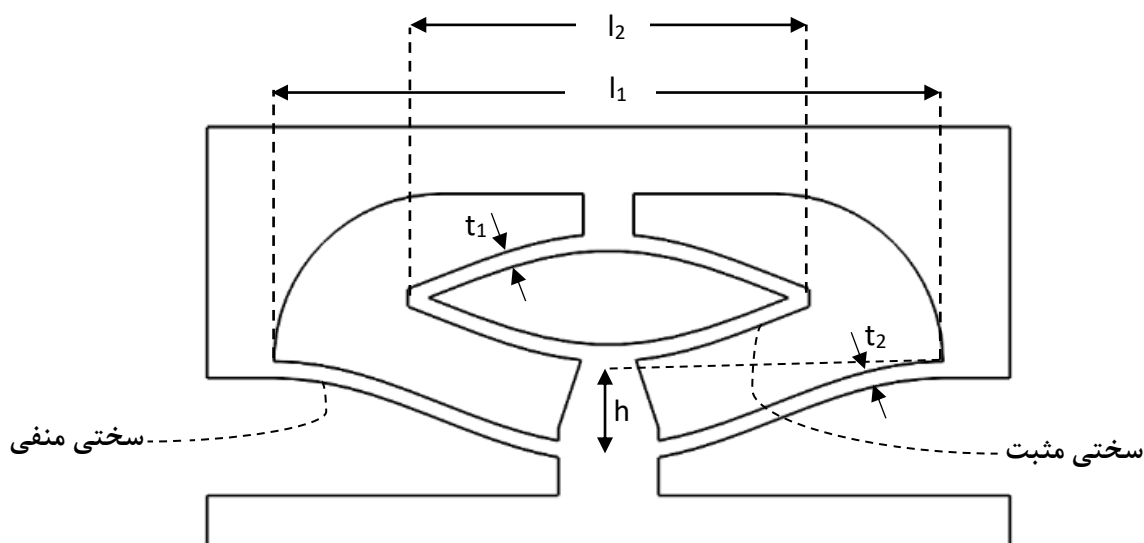
^۱ bistable

۴- سختی شبه صفر^۱

سختی شبه صفر یک مفهوم کلیدی در طراحی جاذب‌های ارتعاشی فرکانس پایین است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که سیستم مکانیکی در یک بازه مشخص از جابه‌جایی، به گونه‌ای رفتار کند که تقریباً هیچ نیروی بازگرداننده‌ای ایجاد نمی‌کند. به عبارت دیگر، سیستم در این ناحیه بسیار نرم عمل می‌کند و حتی تغییرات کوچک جابه‌جایی باعث حرکت قابل توجه می‌شود. این ویژگی امکان کاهش چشمگیر فرکانس طبیعی سیستم و در نتیجه جذب مؤثر ارتعاش در محدوده‌های فرکانس پایین را فراهم می‌آورد [۱۵]. در عمل، سختی شبه صفر معمولاً با ترکیب عناصر دارای سختی مثبت و عناصر دارای سختی منفی به دست می‌آید. عناصر دارای سختی مثبت رفتار پایدار و معمولی از خود نشان می‌دهند، در حالی که عناصر دارای سختی منفی، مشابه تیرهای پسا کمانش، در محدوده‌ای از جابه‌جایی تمایل دارند انرژی سیستم را کاهش دهند و رفتار ناپایدار ایجاد کنند. ترکیب این دو نوع المان باعث می‌شود سیستم در یک بازه مشخص، سختی مؤثر تقریباً صفر داشته باشد و در خارج از این بازه، سختی مثبت سیستم مانع از ناپایداری کامل شود [۱۳].

۵- شرح مدل پیشنهادی

شکل (۱)، نمای کلی ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این ساختار از دو بخش مکانیکی مکمل اعم از بخش سختی مثبت و بخش سختی منفی تشکیل شده است. طراحی این ترکیب به گونه‌ای انجام شده است که ساختار بتواند در محدوده مشخصی از جابه‌جایی، رفتار سختی شبه صفر را ارائه دهد و در نتیجه فرکانس طبیعی سیستم کاهش یافته و جذب ارتعاش در فرکانس پایین بهبود یابد.



شکل ۱. نمای کلی ساختار پیشنهادی

در طراحی بخش سختی منفی، از تیر پیش کمانش استفاده شده است. شکل اولیه این تیر بر اساس رابطه (۸) و مطابق روش ارائه شده در مرجع [۱۶] تعیین شده است تا هندسه‌ای ایجاد شود که رفتار پسا کمانش را بازتولید کند. هدف از به کارگیری این هندسه آن است که در محدوده‌ای از جابه‌جایی، شیب منحنی نیرو-جابه‌جایی کاهش یافته و سختی مؤثر به مقدار بسیار کوچک برسد. این ویژگی، برخلاف تیرهای صاف مورب که در مطالعات پیشین به کار رفته‌اند [۱۳] و امکان کنترل دقیق‌تر ناحیه کاهش سختی را فراهم می‌کند. بخش سختی مثبت نیز با بهره‌گیری از هندسه «چشم» طراحی شده است؛ این هندسه از دو منحنی با معادله مشابه رابطه (۸)

^۱ Quasi-Zero Stiffness

تشکیل شده و به گونه‌ای انتخاب شده است که ضمن حفظ پایداری کلی سازه، بتواند سختی مثبت لازم را برای ترکیب با سختی منفی فراهم کند. انتخاب پارامترهای هندسی شامل طول‌ها، ارتفاع‌ها و ضخامت‌ها مطابق جدول (۱) بر اساس چندین بار تحلیل عددی و بررسی پارامتری انجام شده است تا ناحیه سختی شبه‌صفر در محدوده جابه‌جایی مورد نیاز شکل بگیرد.

$$y = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{x}{l_1} \right) \right) \quad (۸)$$

جدول ۱. مقادیر هندسی مربوط به ساختار مورد بررسی

پارامتر	اندازه (mm)
h	۵
l_1	۴۰
t_1	۱
l_2	۲۴
t_2	۱

در این تحقیق تحلیل تنها بر روی یک سلول واحد انجام شده است، زیرا اصول ایجاد سختی شبه‌صفر و رفتار مکانیکی اصلی ساختار در همین مقیاس قابل بررسی و استخراج است. از آنجاکه سلول واحد نقش واحد سازنده فراساختار را دارد، تحلیل اولیه آن برای ارزیابی مفهوم طراحی کافی است. با این حال، توسعه مدل و بررسی سازه‌های چندسلولی و چیدمان‌های تناوبی به عنوان ادامه طبیعی این پژوهش در مراحل بعدی دنبال خواهد شد.

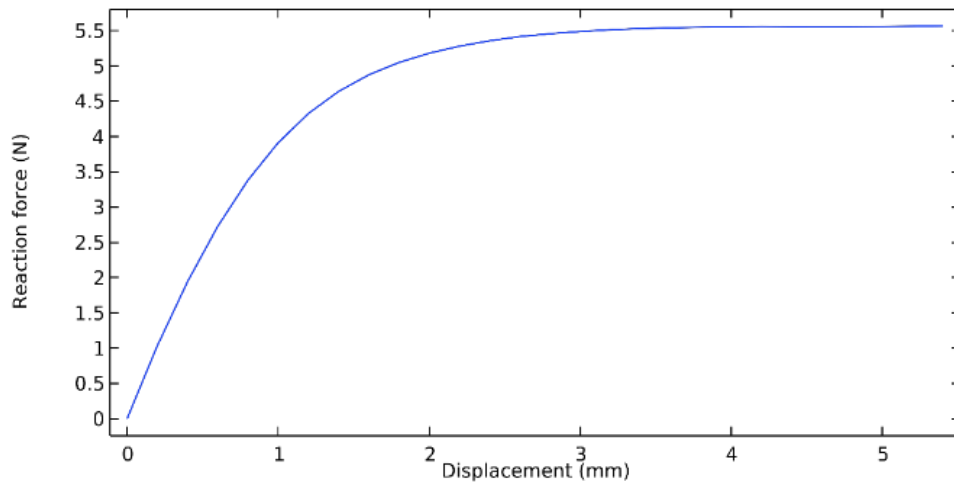
۶- تحلیل استاتیکی و ناحیه با سختی شبه صفر

در این پژوهش برای بررسی رفتار نیرو - جابه‌جایی و تعیین ناحیه سختی شبه‌صفر، تحلیل غیرخطی استاتیکی در محیط دوبعدی نرم‌افزار کامسول انجام شد. هندسه بخش سختی مثبت و تیرهای پیش‌کمانش بر اساس رابطه (۸) به صورت دقیق ترسیم شد و هیچ تنش یا خمش اولیه‌ای به مدل اعمال نگردید. ماده سازه از نوع پلی‌یورتان گرمانرم^۱ انتخاب گردید و خواص مکانیکی آن شامل مدول یانگ، ضریب پواسون و چگالی مطابق مقادیر گزارش شده در مرجع [۱۷] به ترتیب برابر با $E = 4.95 \times 10^7 \text{ Pa}$ ، $\nu = 0.45$ و $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شد. برای افزایش دقت به‌ویژه در نواحی دارای خمیدگی، از مش چهارضلعی بسیار ریز^۲ استفاده شد. در این تحلیل، اثر تغییر شکل‌های بزرگ فعال گردید و لبه پایینی سازه به صورت کامل مقید شد. جابه‌جایی کنترل شده نیز روی لبه بالایی اعمال شد و برای استخراج منحنی نیرو - جابه‌جایی، از یک جابه‌جایی پارامتری در بازه ۰ تا ۶ میلی‌متر با گام ۰/۲ میلی‌متر استفاده گردید. در هر گام، نیروی واکنش از لبه بالایی برداشت شد. حل عددی به صورت ایستا و با استفاده از حلگر تفکیک شده^۳ انجام شد و سایر تنظیمات همگرایی به صورت پیش‌فرض باقی ماند. نتایج به دست آمده در شکل (۲) نشان می‌دهد که ترکیب بخش سختی مثبت و تیرهای پیش‌کمانش، ناحیه‌ای با شیب تقریباً صفر ایجاد کرده و رفتار سختی شبه‌صفر را فراهم می‌کند.

^۱ Thermoplastic Polyurethane (TPU)

^۲ Extremely Fine

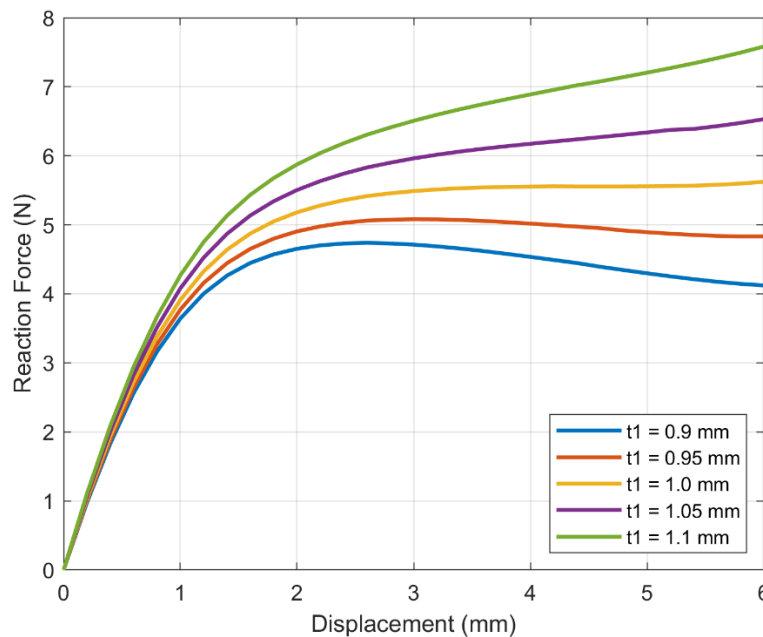
^۳ Segregated Solver



شکل ۲. نمودار نیرو بر حسب جابجایی

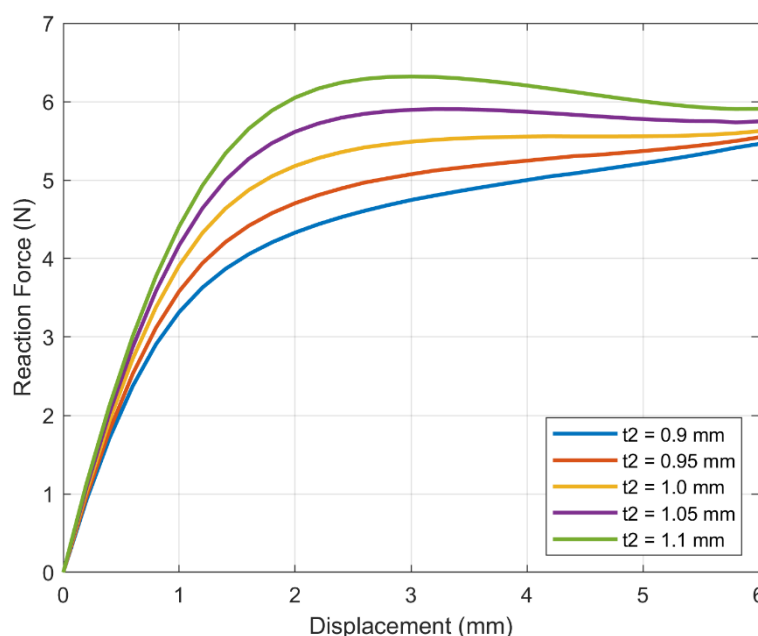
نتایج شکل (۲) نشان می‌دهد که در ابتدا، با افزایش جابه‌جایی، نیرو نیز افزایش می‌یابد که نمایانگر رفتار سختی مثبت است. با ورود المان‌های پیش‌کمانش، شیب منحنی کاهش یافته و تقریباً صفر می‌شود؛ این بازه، ناحیه سختی شبه صفر (QZS) را تشکیل می‌دهد. این تحلیل پهنای بازه سختی شبه صفر و موقعیت آن را به صورت کمی مشخص می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب المان‌های سختی مثبت و منفی، رفتار شبه‌صفر موردنظر را ایجاد می‌کند.

به منظور بررسی اثر پارامترهای هندسی بر رفتار سختی شبه‌صفر، تحلیل حساسیت موضعی بر روی ضخامت شکل چشم (به عنوان سختی مثبت) و ضخامت تیر پیش‌کمانش (به عنوان سختی منفی) انجام شد. مطابق شکل (۳)، تغییر ضخامت بخش سختی مثبت t_1 تأثیر مستقیمی بر شیب کلی منحنی نیرو-جابجایی و مقدار سختی مثبت ساختار دارد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش t_1 ، نیروی بازگرداننده و سختی مؤثر سیستم افزایش یافته و ناحیه سختی شبه‌صفر محدودتر می‌شود، در حالی که کاهش این پارامتر منجر به نرم‌تر شدن پاسخ و گسترش نسبی ناحیه QZS می‌گردد. این رفتار بیانگر نقش کلیدی ضخامت بخش سختی مثبت در تنظیم پایداری و پهنای ناحیه سختی شبه‌صفر ساختار پیشنهادی است.



شکل ۳ تأثیر تغییرات $\pm 5\%$ و $\pm 10\%$ ضخامت بخش سختی مثبت t_1 بر منحنی نیرو-جابجایی سلول واحد.

همچنین مطابق شکل (۴)، تغییر ضخامت تیر پیش‌کمانش t_2 تأثیر قابل‌توجهی بر شکل منحنی نیرو-جابجایی و پهنای ناحیه سختی شبه‌صفر دارد. نتایج نشان می‌دهد که با تغییرات محدود ($\pm 5\%$) رفتار سختی شبه‌صفر حفظ می‌شود، در حالی که با افزایش یا کاهش بیشتر ضخامت ($\pm 10\%$)، سختی مؤثر افزایش یافته و ناحیه QZS تضعیف می‌گردد. این موضوع بیانگر حساسیت طراحی و لزوم انتخاب دقیق ضخامت تیر پیش‌کمانش است.



شکل ۴: تأثیر تغییرات $\pm 5\%$ و $\pm 10\%$ ضخامت بخش سختی مثبت t_2 بر منحنی نیرو-جابجایی سلول واحد

۷- تحلیل دینامیکی

برای تحلیل دینامیکی، ابتدا منحنی نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل استاتیکی شکل (۲) با استفاده از ابزار برازش منحنی^۱ نرم‌افزار متلب مورد برازش قرار گرفت. به دلیل وجود نواحی غیرخطی، از جمله سختی شبه‌صفر و تغییرات سریع شیب، چندجمله‌ای مرتبه پنجم بهترین دقت را در بازتولید رفتار واقعی نشان داد. معادله نیرو به صورت رابطه (۹) به دست آمد.

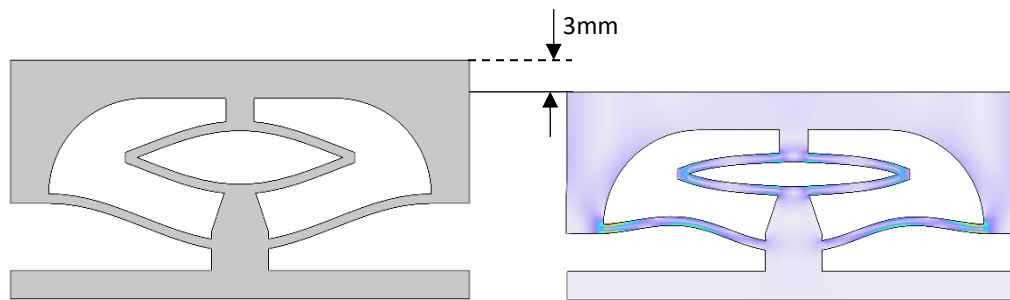
$$F(X) = 293 \times 10^{-5}X^5 - 657 \times 10^{-4}X^4 + 591 \times 10^{-3}X^3 - 26707 \times 10^{-4}X^2 + 60767 \times 10^{-4}X - 491 \times 10^{-4} \quad (9)$$

همچنین با مشتق‌گیری از رابطه (۹)، سختی مؤثر ساختار به صورت تابعی از جابجایی با واحد نیوتون بر حسب میلی‌متر در رابطه (۱۰) نشان داده شده است.

$$K(x) = 0.01465x^4 - 0.2628x^3 + 1.773x^2 - 5.3414x + 6.0767 \quad (10)$$

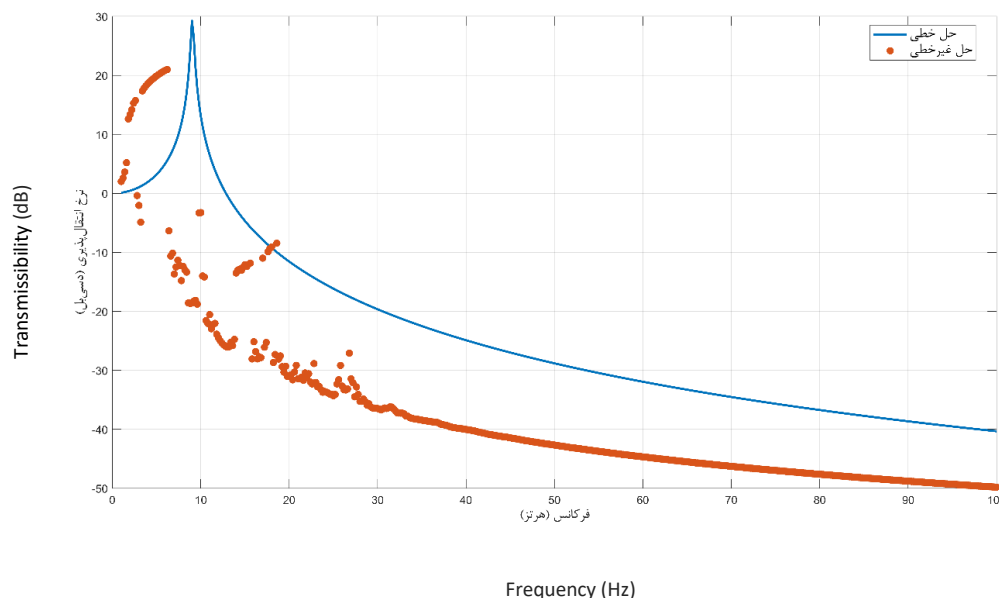
برای قرارگرفتن سلول واحد در ناحیه سختی شبه‌صفر، جرم ۵۶۰ گرمی روی سلول واحد در نظر گرفته شد تا جابجایی ۳ میلی‌متری مطابق شکل (۵) روی سلول واحد ایجاد شود. جرم سلول واحد در مقایسه با جرم ۵۶۰ گرمی قابل صرف‌نظر کردن است.

^۱ Curve Fitting



شکل ۵. جابجایی ۳ میلی‌متری با اضافه کردن جرم ۵۶۰ گرمی به منظور قرار گیری در ناحیه ی سختی شبه صفر

در تحلیل دینامیکی، برای بررسی رفتار ارتعاشی ساختار و تعیین نرخ انتقال‌پذیری، از شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار متلب استفاده شد. با توجه به غیرخطی بودن رابطه نیرو-جابجایی، معادله حرکت سیستم شامل جرم، میرایی و نیروی فنر غیرخطی استخراج و به‌صورت عددی در حوزه زمان حل گردید. در این روش، تحریک ورودی به‌صورت جابجایی هارمونیک پایه در بازه‌ای از فرکانس‌های مختلف به سیستم اعمال شد و پاسخ جابجایی جرم و تکیه‌گاه با استفاده از حل‌گرهای زمانی^۱ محاسبه گردید. سپس برای هر فرکانس، با به‌کارگیری تحلیل طیفی و استخراج دامنه مؤلفه متناظر با فرکانس تحریک، دامنه پاسخ خروجی و دامنه تحریک ورودی تعیین و نرخ انتقال‌پذیری^۲ بر حسب فرکانس محاسبه شد. نمودار حاصل در شکل (۶) ارائه شده است. به‌منظور مقایسه دقیق میان تحلیل خطی و غیرخطی، سختی معادل مدل خطی به‌گونه‌ای انتخاب شد که جابجایی ناشی از بار وزن اولیه در هر دو مدل یکسان باشد تا شرایط اولیه یکسان برقرار گردد و اثرات رفتار غیرخطی بر کاهش ارتعاشات به‌درستی قابل ارزیابی باشد.



شکل ۶. نمودار نرخ انتقال‌پذیری بر حسب فرکانس

^۱ Time-domain analysis

^۲ Transmissibility

نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که در مدل خطی، یک قله مشخص در نزدیکی فرکانس طبیعی سیستم دیده می‌شود که بیانگر بیشینه پاسخ در حالت خطی است. در مدل غیرخطی، اگرچه رفتار سیستم در حوالی این فرکانس تغییر می‌کند، اما مهم‌ترین تفاوت در ناحیه فرکانس‌های پایین‌تر مشاهده می‌شود. در این محدوده، سختی مؤثر سیستم در ناحیه سختی شبه‌صفر بسیار کوچک است و در نتیجه پاسخ دینامیکی ماهیتی تقریباً شبه‌استاتیکی پیدا می‌کند. در فرکانس‌های پایین، نیروی اینرسی ناچیز بوده و سیستم تمایل دارد جابه‌جایی پایه را دنبال کند؛ از این‌رو کاهش نرخ انتقال‌پذیری در این ناحیه محدود است. این رفتار ناشی از ویژگی‌های ذاتی سختی شبه‌صفر و تفاوت بنیادی آن با سازه‌های خطی با سختی ثابت است. با افزایش فرکانس و غلبه اثرات دینامیکی، نقش سختی بسیار کم ساختار پررنگ‌تر شده و در بازه فرکانسی حدود ۷ تا ۱۰۰ هرتز کاهش قابل توجهی در انتقال ارتعاشات رخ می‌دهد که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب ساختار پیشنهادی در جداسازی ارتعاشات فرکانس پایین است. این مقایسه بیان می‌کند که برای تحلیل دقیق و پیش‌بینی رفتار واقعی چنین ساختارهایی، در نظر گرفتن اثرات غیرخطی ضروری است.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک ساختار شامل دو بخش سختی مثبت و سختی منفی طراحی و بررسی شد. بخش سختی منفی با استفاده از تیرهای دارای انحنا اولیه به‌منظور نزدیک‌شدن به شرایط پساکمانش ایجاد گردید و بخش سختی مثبت بر اساس هندسه‌ای با شکل چشم طراحی شد تا پایداری کلی ساختار حفظ شود. تحلیل استاتیکی نشان داد که در محدوده‌ای از جابه‌جایی، نیروی بازگرداننده تقریباً ثابت می‌ماند و ناحیه‌ای با سختی شبه‌صفر ایجاد می‌شود. این ویژگی امکان جذب ارتعاش در فرکانس‌های پایین را بدون نیاز به جرم زیاد فراهم می‌سازد. به‌منظور بررسی اثر پارامترهای هندسی مؤثر، تحلیل حساسیت موضعی بر روی ضخامت تیر پیش‌کمانش و ضخامت بخش سختی مثبت انجام شد. نتایج نشان داد که رفتار سختی شبه‌صفر تنها در بازه مشخصی از تغییرات این پارامترها حفظ می‌شود و با افزایش یا کاهش بیش از حد آن‌ها، سختی مؤثر سیستم افزایش یافته و ناحیه QZS تضعیف می‌گردد. این موضوع بیانگر حساسیت طراحی و لزوم انتخاب دقیق پارامترهای هندسی برای دستیابی به عملکرد مطلوب است و درعین‌حال نشان می‌دهد که رفتار ساختار قابلیت تنظیم‌پذیری از طریق پارامترهای هندسی را دارد. در ادامه، تحلیل فرکانسی رفتار دینامیکی ساختار مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که در بازه فرکانسی متناظر با ناحیه سختی شبه‌صفر، کاهش قابل توجهی در نرخ انتقال ارتعاش رخ می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که ترکیب مناسب المان‌های دارای سختی مثبت و منفی می‌تواند منجر به طراحی سازه‌هایی با کارایی بالا در جداسازی ارتعاش شود. همچنین ساختار پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه فراماده‌های مکانیکی با رفتار تنظیم‌پذیر و گستره توقف فرکانسی وسیع مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، لازم به ذکر است که اعتبارسنجی تجربی نمونه در حال انجام بوده و به‌عنوان گام تکمیلی در مراحل بعدی پژوهش دنبال خواهد شد.

مراجع

1. Song, Y., et al., *Reduction of vibration and noise radiation of an underwater vehicle due to propeller forces using periodically layered isolators*. Journal of Sound and vibration, ۲۰۱۴. ۳۳۳(۱۴): p. ۳۰۳۱-۳۰۴۳.
2. Yan, B., et al., *Self-sensing electromagnetic transducer for vibration control of space antenna reflector*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, ۲۰۱۷. ۲۲(۵): p. ۱۹۴۴-۱۹۵۱.

۳. Suman, S., et al., *Nonlinear vibration control device for a vehicle suspension using negative stiffness mechanism*. Journal of Vibration Engineering & Technologies, ۲۰۲۱. ۹(۵): p. ۹۵۷-۹۶۶.
۴. Ibrahim, R., *Recent advances in nonlinear passive vibration isolators*. Journal of sound and vibration, ۲۰۰۸. ۳۱۴(۳-۵): p. ۳۷۱-۴۵۲.
۵. Dalela, S., P. Balaji, and D. Jena, *Design of a metastructure for vibration isolation with quasi-zero-stiffness characteristics using bistable curved beam*. Nonlinear Dynamics, ۲۰۲۲. ۱۰۸(۳): p. ۱۹۳۱-۱۹۷۱.
۶. Fan, H., et al., *Design of metastructures with quasi-zero dynamic stiffness for vibration isolation*. Composite Structures, ۲۰۲۰. ۲۴۳: p. ۱۱۲۲۴۴.
۷. Banerjee, P., et al., *Simultaneous vibration isolation and energy harvesting using quasi-zero-stiffness-based metastructure*. Acta Mechanica, ۲۰۲۳. ۲۳۴(۸): p. ۳۳۳۷-۳۳۵۹.
۸. Zhang, Q., D. Guo, and G. Hu, *Tailored mechanical metamaterials with programmable quasi-zero-stiffness features for full-band vibration isolation*. Advanced Functional Materials, ۲۰۲۱. ۳۱(۳۳): p. ۲۱۰۱۴۲۸.
۹. Rao, S.S. and F.F. Yap, *Mechanical vibrations*. Vol. ۴. ۱۹۹۵: Addison-Wesley New York.
۱۰. Hamzehei, R., M. Bodaghi, and N. Wu, *Mastering the art of designing mechanical metamaterials with quasi-zero stiffness for passive vibration isolation: a review*. Smart Materials and Structures, ۲۰۲۴. ۳۳(۸): p. ۰۸۳۰۰۱.
۱۱. Liu, C., et al., *Quasi-zero-stiffness vibration isolation: Designs, improvements and applications*. Engineering Structures, ۲۰۲۴. ۳۰۱: p. ۱۱۷۲۸۲.
۱۲. Rao, S.S., *Vibration of continuous systems*. ۲۰۱۹: John Wiley & Sons.
۱۳. Cai, C., et al., *Design and numerical validation of quasi-zero-stiffness metamaterials for very low-frequency band gaps*. Composite structures, ۲۰۲۰. ۲۳۶: p. ۱۱۱۸۶۲.
۱۴. Fulcher, B.A., et al., *Analytical and experimental investigation of buckled beams as negative stiffness elements for passive vibration and shock isolation systems*. Journal of Vibration and Acoustics, ۲۰۱۴. ۱۳۶(۳): p. ۰۳۱۰۰۹.
۱۵. Zhao, F., et al., *An innovative quasi-zero stiffness isolator with three pairs of oblique springs*. International Journal of Mechanical Sciences, ۲۰۲۱. ۱۹۲: p. ۱۰۶۰۹۳.
۱۶. Qiu, J., J.H. Lang, and A.H. Slocum, *A curved-beam bistable mechanism*. Journal of microelectromechanical systems, ۲۰۰۴. ۱۳(۲): p. ۱۳۷-۱۴۶.
۱۷. Liu, J., et al., *Customized quasi-zero-stiffness metamaterials for ultra-low frequency broadband vibration isolation*. International Journal of Mechanical Sciences, ۲۰۲۴. ۲۶۹: p. ۱۰۸۹۵۸.