



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۸۱ تا ۱۹۰
Vol. 48, No. 2, Summer 2016, pp. 181-190



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science & Research
Civil and Environmental Engineering
(ASJR-CEE)

میرایی در سازه فضاکار با سیستم اتصالی MERO با توجه به درجه سفت‌شدگی پیچ

محمد رضا داودی^۱، جواد واثقی امیری^۲، مصطفی حبیبی ملک کلایی^{۳*}

۱-استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل

۲-دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل

۳-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل

(دریافت: ۱۳۹۱/۹/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۶)

چکیده

یک سیستم متداول اتصالی برای ساخت سازه‌های فضاکار، سیستم اتصالی MERO است. مطالعات نشان می‌دهد درجه سفت‌شدگی پیچ در اتصال MERO نقش مهمی را بر رفتار دینامیکی سازه‌های فضاکار دارد. در تحقیق حاضر، تأثیر درجه سفت‌شدگی پیچ و میزان دامنه ارتعاش بر مشخصات دینامیکی سازه فضاکار با اتصال MERO به صورت تجربی بررسی شد. به این منظور، یک عضو ساخته‌شده با این سیستم به صورت تیر کنسولی در درجات مختلف سفت‌شدگی، به روش ارتعاش آزاد با ایجاد جابجایی اولیه، برای تعیین مقدار عوامل دینامیکی آزمایش گردید و نتایج حاصله نشان داد که میزان سفت‌شدگی پیچ رابطه مستقیم با فرکانس سازه داشته و مقدار بیشینه نسبت و ضریب میرایی در درجه سفت‌شدگی ۶۰ نیوتن‌متر رخ می‌دهد. یعنی با افزایش درجه سفت‌شدگی از ۳۰ به ۶۰ نسبت میرایی از ۰/۰۳ به ۰/۰۵ درصد می‌رسد (افزایش حدود ۶۰ درصدی) و هرچه سفت‌شدگی از ۶۰ بالاتر رود، نسبت و ضریب میرایی کمتر و در درجه ۱۸۰ نسبت میرایی سازه کمتر از ۰/۰۲ درصد می‌شود. همچنین رابطه مستقیمی بین جابجایی اولیه با میرایی وجود دارد؛ به آن معنی که هر چه دامنه ارتعاش بیشتر باشد، میرایی نیز بیشتر است و برعکس.

کلمات کلیدی:

سیستم اتصالی MERO، درجه سفت‌شدگی، ارتعاش آزاد، میرایی

۱- مقدمه

دامنه نوسانات یک جسم در حال ارتعاش آزاد به وسیله نیروهای مقاومی که در طی دوره‌های تناوب آن ایجاد می‌شوند، کاهش می‌یابد. مجموعه این نیروهای مقاوم که با تلف کردن انرژی باعث از بین رفتن ارتعاش می‌شوند، نیروی میرایی نام دارد. به عبارت دیگر، در صورتی که میرایی وجود نداشت، دامنه ارتعاش آزاد هیچ‌گاه کاهش نمی‌یافت.

تحقیق در مورد خاصیت میرایی مواد جامد و مفهوم مهندسی آن تقریباً از ۲۵۰ سال گذشته شروع شده است. در سال ۱۷۸۴ میلادی کولمب در تحقیقات تجربی و نظری خود در مورد پیچش و قابلیت ارتجاعی در سیم‌های فلزی به این نتیجه رسید که میرایی سبب اتلاف داخلی انرژی در ماده می‌شود [۴].

میرایی یکی از معیارهایی است که در تعیین رفتار دینامیکی سازه‌ها نقش اساسی دارد و این نقش اساسی به واسطه استهلاک انرژی جنبشی است. اتلاف انرژی گاهی به وسیله مواد تشکیل‌دهنده و در اثر هیستریزس داخلی مواد که ناشی از رابطه غیرخطی تنش-کرنش، اصطکاک مابین ذرات و خاصیت ترموالاستیسیته است، ایجاد می‌شود (میرایی ویسکوز و هیستریزس) و گاهی در اثر اصطکاک حاصل از مالش و لغزش در ناپوستگی‌های سازه یا محیط اطراف سازه (میرایی کلمب).

میرایی با درجات متفاوت در تمام سازه‌ها وجود دارد، اما ماهیت و اندازه آن به طور کامل مشخص نیست. با وجود مطالعات فراوان، میرایی هنوز یکی از جنبه‌های ناشناخته در تحلیل دینامیکی سازه‌ها باقی مانده و مدل تحلیلی دقیقی برای آن ارائه نشده است. توانایی تخمین صحیحی از میرایی، تا حدود زیادی باعث کاهش میزان خطا در تحلیل سازه‌ها می‌شود. به همین دلیل، این موضوع محققان را برآن داشت تا با وجود مشکلات بررسی تحلیلی موضوع و با توجه به پیشرفت تکنولوژی در تولید تجهیزات جدید و پیشرفته آزمایشگاهی، به دنبال اندازه‌گیری میرایی به صورت تجربی و مدل‌سازی تغییرات آن باشند.

با توجه به این موارد می‌توان گفت که تعریف یک رابطه ریاضی برای هر یک از این پدیده‌ها در یک ساختمان واقعی غیرممکن است و میرایی یک سازه واقعی به طور معمول به روش خیلی ایده‌آلی در نظر گرفته می‌شود. در عمل برای اغلب حالات، میرایی واقعی یک سیستم یک درجه آزادی را به طور رضایت‌بخشی می‌توان با یک میراگر خطی ویسکوز (لزجی) نشان داد [۵]. ضریب میرایی طوری انتخاب می‌شود که سرعت استهلاک انرژی در مدل ریاضی در حدود سازه واقعی باشد.

در این تحقیق، میرایی سیستم مورد آزمایش به عنوان میرایی ویسکوز در نظر گرفته شد. این میرایی، ساده‌ترین نوع میرایی قابل دسترس از نظر تئوری است؛ به این معنی که معادلات حرکت متناظر با این نوع میرایی برای هر نوع ورودی به سادگی حل می‌شوند. معادله دیفرانسیل حاکم بر ارتعاش آزاد سیستم یک درجه آزادی میرا با مکانیسم ویسکوز به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (1)$$

که در آن، u تغییر مکان، \dot{u} سرعت، \ddot{u} شتاب، m جرم، k سختی و c ضریب میرایی سیستم است. با تقسیم رابطه (۱) بر m داریم:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad (2)$$

که در آن، $\omega_n = \sqrt{k/m}$ و ω_n فرکانس زاویه‌ای طبیعی سیستم است. همچنین:

$$\zeta = c / 2m\omega_n = c / c_{cr} \quad (3)$$

$$c_{cr} = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} = 2k / \omega_n$$

که در آن، ζ نسبت میرایی و c_{cr} ضریب میرایی بحرانی است. ضریب میرایی c بیانگر استهلاک انرژی در یک دور نوسان آزاد یا یک دور ارتعاش اجباری هارمونیک است. نسبت میرایی که یک نسبت بدون بعد است، خاصیتی از سیستم است که به جرم و صلبیت سیستم نیز بستگی دارد. با رابطه (۱)، معادله تغییر مکان سیستم بر حسب زمان به دست خواهد آمد:

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[\frac{u(0)\cos\omega_D t}{\omega_D} + \left(\frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \right) \sin\omega_D t \right] \quad (4)$$

که در آن، ω_D (فرکانس زاویه‌ای سیستم میرا) برابر است با:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (5)$$

با توجه به رابطه (۴) می‌توان گفت که پوش منحنی نمودار آن، به صورت تابع نمایی است. با داشتن نمودار تغییر مکان یا شتاب سیستم بر حسب زمان می‌توان رابطه‌ای برای یافتن میرایی سیستم به دست آورد که به روش کاهش لگاریتمی معروف است. این روش ساده‌ترین روش محاسبه نسبت میرایی با استفاده از نمودار پاسخ زمانی سازه است.

از پاسخ شتاب سیستم نیز می‌توان برای محاسبه میرایی استفاده کرد که اندازه‌گیری آن از تغییر مکان ساده‌تر است. برای تعیین رابطه شتاب سیستم با میرایی ویسکوز، باید دو بار از رابطه (۴) مشتق گرفته شود که در این صورت داریم:

$$\ddot{u}(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[\frac{(-2\zeta\omega_n\dot{u}(0) - \omega_n^2 u(0))\cos\omega_D t + \left(\frac{\dot{u}(0)(\zeta^2\omega_n^2 - \omega_D^2) + \zeta\omega_n^3 u(0)}{\omega_D} \right) \sin\omega_D t}{\omega_D} \right] \quad (6)$$

با توجه به رابطه (۶) به راحتی می‌توان تشخیص داد که با داشتن پاسخ شتاب سیستم نیز می‌توان به روش کاهش لگاریتمی نسبت میرایی را تعیین نمود. اما روش استفاده شده در این تحقیق، روشی ابتکاری است که از روش کاهش لگاریتمی برگرفته شده است و در ادامه توضیح داده می‌شود.

به هم متصل نماید. این امر نخستین بار برای ساخت دقیق سازه‌های فضاکار متشکل از اجزای تولید انبوه کارخانه‌ای، که با روش ساده مونتاژ می‌شدند امکان‌پذیر شد. حمل و نقل آن‌ها هیچ مشکلی ایجاد نمی‌کرد. زیرا بخش‌های مجزا، اندازه و وزن قابل کنترلی داشتند. مجموعه سازه‌های فضایی را می‌توان در مکان‌های دور و با استفاده از کارگر نسبتاً غیرمتخصص اجرا نمود. روش کار منجرینگ هازن موجب پیشرفت‌های مشابهی در سراسر جهان شد. لازم به ذکر است که کلمه MERO ترکیبی از دو حرف اول Mengerlinghausen (مخترع آلمانی این نوع سیستم اتصالی) و دو حرف اول Rohr (به معنی پیچ در زبان آلمانی) است.

استفاده از سازه‌های فضاکار در ایران از سال ۱۳۵۷ آغاز شد. در ادامه نمونه‌هایی از سازه‌های ساخته‌شده با سیستم اتصالی MERO معرفی شده‌اند.

در سال ۱۳۵۸، سقف سالن ورزشی شهید چمران اهواز به ابعاد ۴۲ متر در ۴۲ متر، ساخته و نصب گردید و هم‌اکنون نیز در وضعیت خوبی می‌باشد. آشیانه بوئینگ ۷۴۷ فرودگاه بین‌المللی تهران به ابعاد ۹۲ متر در ۸۵ متر در سال ۱۳۵۷ ساخته شد. از این آشیانه همچنان به طور کامل استفاده می‌شود و کماکان بزرگ‌ترین آشیانه فرودگاه در ایران است.

نتایج مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که اتصال نقش مهمی در رفتار سازه‌های فضاکار دارد. قاسمی رابطه بین نیرو-تغییر مکان در سازه‌های فضایی با اتصال MERO و تأثیر میزان سفت‌شدگی پیچ بر آن را به طور تجربی مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایش نشان داد که درجه سفت‌شدگی پیچ اثر قابل‌توجهی بر رفتار اتصال از جمله رابطه نیرو-تغییر مکان اتصال دارد [۲].

در کاری دیگر، عبادی تأثیر میزان درجه سفت‌شدگی را بر سختی محوری اتصال MERO بررسی کرد. او یک اتصال را به کمک رایانه مدلسازی کرد. نتایج حاصل از تحلیل رایانه‌ای با نتایج عملی تفاوت‌هایی داشت. نتایج همچنین نشان داد درجه سفت‌شدگی تأثیر بسزایی بر سختی محوری دارد [۶].

سوزا، گنگالوز و مالیت رفتار اتصالات خرپاهای فضایی با ابعاد مختلف و با عضوهای لوله‌ای که در آن‌ها از اتصالات مختلفی استفاده شده بود را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک تحلیل تئوری و تجربی از رفتار اتصال در خرپاهای فضایی ارائه دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که اتصالات نقش مهمی در پاسخ سازه از جمله توان نهایی سازه برای تحمل بار دارد [۷].

فاتل باب رفتار یک گنبد شبکه‌ای تک لایه با اتصال از نوع MERO را به صورت نظری و تجربی بررسی کرد. او نمودارهای لنگر-دوران اتصال را با درجات مختلف سفت‌شدگی به دست آورد. رابطه لنگر-دوران اتصال با سه سطح مختلف سفت‌شدگی شل، کمی سفت و کاملاً سفت به دست آمد. نتایج تجربی نشان داد که درجه سفت‌شدگی اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر رفتار اتصال دارد [۸].

در این روش ابتکاری برای تعیین نسبت میرایی، به جای استفاده از مختصات دو نقطه پیشینه، از تعداد نقاط پیک بیشتری استفاده شد. از آنجایی که عبارت داخل کروشه در رابطه (۶) تناوبی است، به همین جهت در تمامی نقاط، پیک مقدار یکسانی دارد و تنها مقدار $e^{-\xi\omega_n t}$ متفاوت است. بنابراین با داشتن مختصات چند نقطه پیک و مقدار فرکانس طبیعی سازه می‌توان بهترین تابع نمایی که با این نقاط همخوانی داشته باشد را یافت که به تبع آن نسبت میرایی سیستم تعیین می‌شود.

در این مقاله، رفتار دینامیکی سیستم اتصالی MERO مورد بررسی قرار گرفته است که یکی از متداول‌ترین سیستم‌های اتصالی در ساخت سازه‌های فضاکار است. اصطلاح سازه فضاکار به سازه‌ای اطلاق می‌شود که دارای عملکرد سه بعدی است. در مقابل به سازه‌هایی مانند خرپاهای صفحه‌ای که دارای عملکرد دو بعدی هستند، سازه‌های صفحه‌ای گویند. به عبارت دقیق‌تر، در سازه‌های صفحه‌ای بارهای خارجی و نیروهای داخلی در یک صفحه قرار می‌گیرند و این صفحه همان صفحه‌ای است که خود سازه هم در حالت بدون بار و هم در حالت تغییر شکل یافته تحت اثر بار در آن واقع است.

در سازه‌های فضاکار، بارهای خارجی، نیروهای داخلی و تغییر مکان‌های سازه جملگی در یک صفحه نیستند. سازه‌های شبکه‌ای دو لایه از زیرمجموعه‌های مهم سازه‌های فضاکار می‌باشند. برای سهولت در حمل و نقل و نصب سریع در محل، این سازه‌ها اغلب به صورت پیش‌ساخته می‌باشند. از سیستم‌های متنوعی در ساخت این سازه‌ها استفاده می‌شود که یکی از رایج‌ترین این سیستم‌ها، سیستم اتصالی نوع MERO است.

از دیدگاه تاریخی، اولین سازه‌های فضاکار، گنبدی بودند که توسط مهندسان آلمانی اسکوتدلر و زیمرمان که در قرن نوزدهم از پیشگامان این علم بودند، ساخته شدند. این تجربه‌های آغازین، تقریباً تا سال ۱۹۳۷ هنگامی که دکتر منجرینگ هازن تمایل به ساخت سازه‌های فضاکار را دوباره رواج داد، فراموش شده بود. او دریافته بود که رواج سازه‌های فضاکار در مقیاس بزرگ جهانی، فقط در صورتی امکان‌پذیر خواهد بود که اجزای سازه به صورت کارخانه‌ای تولید و مونتاژ آن در محل انجام شود. برای دستیابی به این دو هدف، لازم بود که تنوع عضوی کاهش یابد و روش مونتاژ آسان توسعه پیدا کند.

به طور مطلوب یک سازه فضاکار باید شامل عضوهایی با طول مساوی باشد. بنابراین در عمل سعی می‌شود که تعداد طول‌های متفاوت تا حد امکان کاهش یابد. تحقیقات توپولوژیکی پیشگامانه دکتر منجرینگ هازن به کاهش تنوع معطوف بود و اختراع اتصال MERO توسط او توانست به خوبی مشکل مونتاژ را حل کند [۱]. با این پیشرفت‌ها منجرینگ هازن توانست با موفقیت سازه‌های فضاکار را در سال ۱۹۴۲ به صورت تجاری درآورد.

اتصال گرهی MERO می‌تواند تا تعداد ۱۸ عضو را با زوایای مختلفی در سوراخ‌های قلاب‌باز شده که بر روی سطح آن قرار دارند،

پاشایی و آسور تأثیر میرایی بر روی رفتار دینامیکی سازه‌های خرپایی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دو نوع خرپا را مورد آزمایش قرار دادند: یکی با اتصالات جوشی و دیگری با اتصالات پیچ و مهره. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میزان میرایی در مدل با اتصالات پیچ و مهره بیشتر از میرایی در مدل با اتصالات جوشی است. در واقع نوع اتصال تأثیر بسزایی بر میرایی دارد [۱۳].

از دیگر موضوعات مورد بررسی در این تحقیق، اثر دامنه ارتعاش بر روی میرایی است. نتایج همه آزمایش‌هایی که توسط محققان انجام شده، نشان می‌دهد که ظرفیت میرایی ساختمان‌ها و سازه‌ها متأثر از مقدار دامنه ارتعاش است. مطابق این نتیجه واضح است که دامنه‌های متفاوت ارتعاش منجر به نسبت میرایی متفاوتی می‌شود.

به عنوان مثال، سلبی حرکت‌های با دامنه کم ایجاد شده به وسیله باد را در پنج ساختمان ثبت کرد. او همچنین حرکت‌های با دامنه زیاد آن ساختمان‌ها را به وسیله زلزله لوماپریتا در اکتبر سال ۱۹۸۹ میلادی ثبت کرد. نتیجه این ثبت یک نسبت میرایی بزرگتر را در ارتعاش با دامنه بزرگتر نشان داد. نسبت میرایی مرتبط با زلزله ۱/۶ تا ۶ برابر بزرگتر از نسبت میرایی به دست آمده از ارتعاش‌های ایجاد شده به وسیله باد بودند [۱۴].

مثال دیگر، نتایج به دست آمده توسط فوکووا در ژاپن است. او آزمون‌های ارتعاش آزاد و اجباری را روی تعدادی ساختمان انجام داد و نتیجه‌گیری کرد که مقدار نسبت میرایی به طور مستقیم به دامنه ارتعاش وابسته است [۱۵].

از آن‌جا که رفتار اتصال در پاسخ سازه‌های فضاکار با سیستم اتصالی MERO اثر قابل توجهی دارد، برای همین، مطالعه و بررسی دقیق این موضوع ضروری است. در این مقاله بررسی رفتار اتصال و اثر آن بر روی عوامل دینامیکی (شامل میرایی و فرکانس طبیعی) سازه فضایی با سیستم اتصالی از نوع MERO مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- معرفی نمونه مورد آزمایش

سیستم اتصالی MERO سیستمی است که امکان اتصال چندین عضو لوله‌ای (که می‌تواند تا ۱۸ عضو نیز باشد) را به یک‌دیگر از طریق گوی کروی مقدور می‌سازد. این سیستم اتصالی از گوی فلزی آهنگری شده با تعدادی سوراخ رزوه‌شده، مخروط ناقص آهنگری شده، پیچ‌های رزوه‌شده با مقاومت کششی زیاد، غلاف دريچه‌دار و یک پین تشکیل شده است. گوی در محل تقاطع محورهای طولی لوله‌ها واقع است. عضو مخروطی به انتهای لوله جوش می‌شود. پیچ مقاومت بالا از داخل عضو مخروطی عبور کرده و به وسیله غلاف در داخل گوی محکم می‌شود. از پین برای مقید کردن پیچ به غلاف استفاده می‌شود تا بتوان از طریق غلاف، پیچ را چرخاند.

با استفاده از دريچه موجود در غلاف می‌توان میزان نفوذ پیچ در گوی را کنترل کرد. ابعاد و اندازه‌های اجزای سیستم اتصالی MERO

کاگلایان و یوکسل، فروریزی کامل سقف خرپایی با اتصال MERO را در یک ساختمان بتنی به ابعاد ۲۵ در ۴۰ متر مورد بررسی قرار دادند. این فروریزی در ۲۵ فوریه سال ۲۰۰۳ میلادی در منطقه‌ای واقع در شرق ترکیه و در اثر بارش برف روی داد. آن‌ها چند عضو لوله‌ای و اجزای اتصالی باقی‌مانده از سقف را مورد بررسی قرار دادند. سپس برای بررسی دقیق موضوع سازه مورد نظر را به کمک نرم‌افزار مدل کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که سازه در اثر گسیختگی پیچ‌ها در اتصال فرو ریخت [۹].

از طرفی تجربه نشان می‌دهد که رفتار واقعی سازه‌های ساخته شده با این اتصال با نتایج تحلیلی آن‌ها متفاوت است. این تفاوت را می‌توان ناشی از تأثیر اتصال دانست [۱۰-۱۲].

برای نمونه آندروئیک سقف استادیوم MIS در شهر اسپیلت کرواسی که یک سازه فضاکار دو لایه‌ای با ۶۰۰۰ لوله و دهانه ۱۸۰ متری با اتصال نوع MERO می‌باشد را مورد مطالعه قرار داد. پس از ساخت و برداشتن تکیه‌گاه‌های موقت، تغییر مکان‌های بعضی از گره‌ها اندازه‌گیری شد. با مقایسه تغییر مکان‌های تجربی و نتایج حاصل از تحلیل، مشخص شد که در بعضی از گره‌ها تغییر مکان‌های تجربی تا ۷۰ درصد بیشتر از تغییر مکان‌های تحلیلی است [۱۰].

رفتار اتصال MERO پیچیده است و تعیین رابطه بین میرایی و درجه سفت‌شدگی پیچ به صورت تحلیلی در این نوع اتصال مشکل است. عمده‌ترین دلایل پیچیدگی رفتار سیستم اتصالی از نوع MERO عبارتند از: پیچیدگی هندسی، وجود مصالح با مشخصات مختلف در ساختار سیستم اتصال MERO، وجود پیچ با درجات مختلف سفت‌شدگی، وجود سطوح تماس و ناپیوستگی‌ها و خطای انسانی در ساخت و نصب.

با توجه به این عوامل، تعیین رابطه‌ای بین میرایی و درجه سفت‌شدگی پیچ از لحاظ تئوری کاری بسیار مشکل است و به همین دلیل در این کار سعی شد تا از طریق تجربی و با انجام یک سری آزمایش‌ها، رابطه بین میرایی و درجه سفت‌شدگی پیچ تعیین شود.

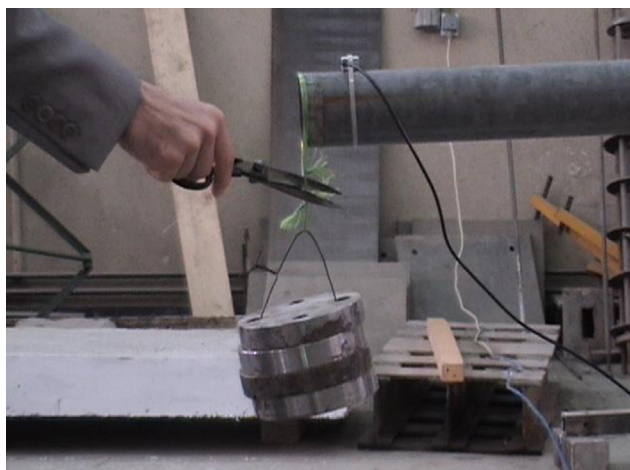
مطالعاتی که در گذشته بر روی سازه‌های فضایی با سیستم اتصالی از نوع MERO انجام شده، نشان می‌دهد که میرایی با درجه سفت‌شدگی پیچ رابطه دارد. پاشایی، داودی و نوشین اثر سفت‌شدگی پیچ را در میرایی شبکه دو لایه با سیستم اتصالی MERO مورد مطالعه قرار دادند. این سازه از ۳۶۰ عضو شامل ۸۴ عضو در لایه بالایی، ۱۸۰ عضو مورب و ۹۶ عضو در لایه پایینی ساخته شده است. فاصله مرکز تا مرکز لایه‌های بالا و پایین برابر با ۱۰۰۰ میلی‌متر و زوایای المان‌های مورب با سطح افقی ۴۵ درجه است و همه المان‌ها دارای طول برابر هستند. این شبکه دو لایه به ابعاد تقریبی ۱۰ متر در ۱۰ متر است. در این مطالعه از روش تغییر مکان اولیه برای ایجاد ارتعاش آزاد استفاده و سپس نسبت میرایی تعیین شد. آزمایش‌ها بر روی درجات مختلف سفت‌شدگی پیچ انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که درجه سفت‌شدگی پیچ اثر قابل ملاحظه‌ای بر میرایی شبکه دو لایه تحت دارد [۱۲].



شکل ۳: اتصال شتابسنج به انتهای آزاد لوله

۶ درجه سفت‌شدگی ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ نیوتن‌متر انجام شد و در هر درجه سفت‌شدگی جابجایی اولیه با سه وزنه مذکور و با هر وزنه نیز دو بار که در کل ۳۶ بار آزمایش انجام شد. پس از جمع‌آوری پاسخ سازه در حالات مختلف، عوامل فرکانس طبیعی، نسبت میرایی و ضریب میرایی سازه تعیین شدند.

مطابق شکل (۴)، با قطع ناگهانی نخ وزنه‌ای که به انتهای آزاد لوله وصل است، سازه شروع به ارتعاش آزاد می‌کند و سپس پاسخ سازه توسط یک شتابسنج^۱ دریافت و به یک دستگاه دیتالاگر^۲ انتقال و توسط این دستگاه پاسخ سازه از حالت آنالوگ به حالت دیجیتال درآمده و سپس پاسخ دیجیتالی شده به یک رایانه انتقال می‌یابد.



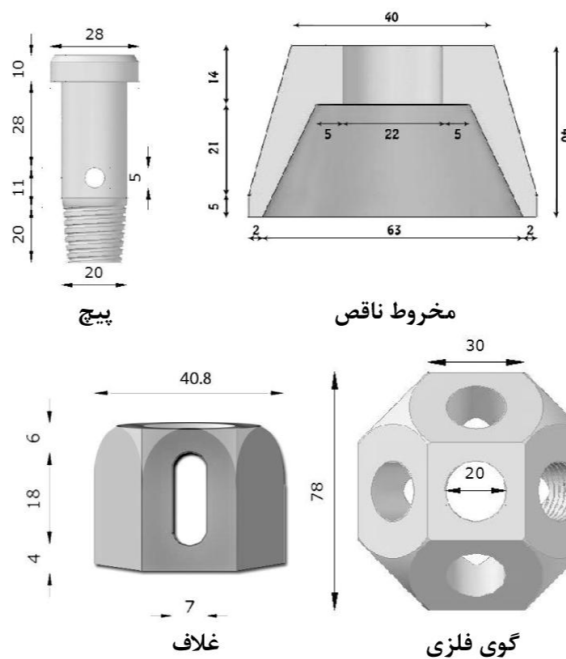
شکل ۴: اتصال وزنه به انتهای آزاد لوله و بریدن نخ با قیچی

پاسخ‌ها برای مدت ۵ ثانیه با نرخ ۱۰۰۰ هرتز ثبت شد. رایانه این قابلیت را دارد که اطلاعات دیجیتالی را در قالب هر نرم‌افزاری که قابلیت استفاده فرم دیجیتالی (رقمی) اطلاعات را دارد، ارائه کند که در این تحقیق، از نرم‌افزار اکسل^۳ برای این کار استفاده شد. لازم به ذکر است که

¹ Accelerometer

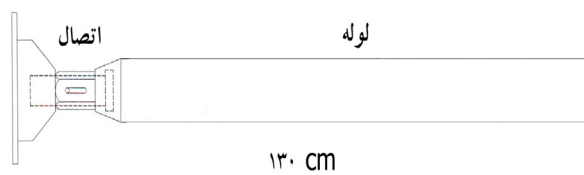
² Data Logger

³ Excel



شکل ۱: اجزای سیستم اتصالی MERO (ابعاد به میلی‌متر می‌باشد)

در شکل (۱) نشان داده شده است. یک سازه ساخته شده با سیستم اتصالی MERO از تعدادی لوله تشکیل شده که به وسیله اتصالات بهم وصل شده‌اند. از آن‌جا که یکی از اهداف مهم در این تحقیق، تعیین رابطه بین میرایی و درجه سفت‌شدگی پیچ در سیستم اتصالی MERO می‌باشد، برای بررسی رفتار تنها یک اتصال از یک عضو لوله‌ای که به صورت کنسولی و به وسیله یک نیم گوی به تکیه‌گاه صلب جوش شده به عنوان مدل آزمایش استفاده شد. قطعه مورد آزمایش به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: قطعه مورد آزمایش

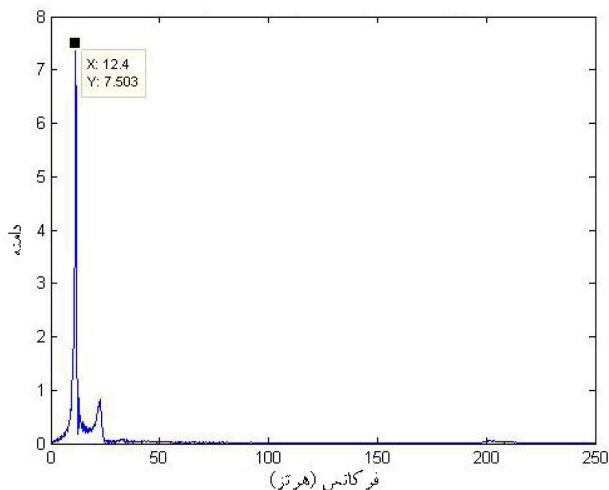
۳- روش آزمایش

در این تحقیق، برای ایجاد ارتعاش آزاد در قطعه مورد آزمایش برای تعیین عوامل دینامیکی، از آزمایش ارتعاش آزاد با ایجاد جابجایی اولیه در انتهای آزاد لوله استفاده شد. با متصل کردن یک وزنه به انتهای آزاد لوله به وسیله یک نخ، جابجایی اولیه در سر آزاد لوله ایجاد و با قطع ناگهانی نخ، ارتعاش آزاد در آن ایجاد گردید. برای بررسی اثر دامنه ارتعاش در رفتار دینامیکی قطعه، جابجایی‌های اولیه مختلفی با استفاده از وزنه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرمی ایجاد شد. پاسخ سیستم نیز با استفاده از یک شتابسنج که در شکل (۳) نشان داده شده است، ثبت شد. آزمایش در

است). با توجه به پاسخ سیستم یک درجه آزادی در شکل (۴)، رابطه پاسخ شتاب که مشتق دوم آن می‌باشد نیز به صورت یک معادله هارمونیک خواهد بود. لذا اگر یک منحنی نمایی بر این نقاط برازش شود، معادله آن به صورت $ke^{-\zeta\omega_n t}$ خواهد بود که ζ و ω_n به ترتیب نسبت میرایی و فرکانس طبیعی سازه هستند.

برای یافتن فرکانس طبیعی حاکم بر سیستم از دو روش استفاده شد. در یک روش به طور دستی زمان دوره تناوب میانگین چند نوسان ابتدایی پاسخ سیستم محاسبه شد و سپس از روی آن فرکانس طبیعی سیستم به دست آمد.

در روش دیگر، فرکانس طبیعی سیستم با استفاده از تبدیل فوریه در برنامه متلب^۱ به دست آمد. به طور مثال، برای پاسخ سیستم در درجه سفت‌شدگی ۱۲۰ نیوتن‌متر در بارگذاری ۱۰ کیلوگرم، فاصله زمانی بین بیشینه پیک اول و پیک پنجم و یا به عبارت دیگر زمان ۴ تناوب اول برابر $0/32154$ ثانیه است که با تقسیم این عدد بر ۴، زمان میانگین دوره تناوب برابر $T = 0/080385$ ثانیه و فرکانس میانگین برابر $f = 12/44$ هرترز است ($f = 1/T$). در روشی دیگر، برای یافتن فرکانس طبیعی از پاسخ سیستم در همین محدوده در برنامه متلب تبدیل فوریه گرفته شد که نمودار آن، در شکل (۵) آمده است. در این نمودار، محور x ها بر حسب فرکانس است و مختصه x قله در این نمودار برابر فرکانس طبیعی حاکم بر سیستم بوده که برابر $12/4$ هرترز است.



شکل ۵: نمودار پاسخ سیستم در حوزه فرکانس، مربوط به درجه سفت‌شدگی ۱۲۰ نیوتن‌متر و وزنه ۱۰ کیلوگرمی

برای تعیین نسبت میرایی از این فرکانس استفاده شد. زیرا نسبت به روش دستی دقیق‌تر است. پس از جمع‌آوری داده‌ها، مقادیر فرکانس طبیعی، نسبت میرایی و ضریب میرایی سازه در حالات مختلف محاسبه شد. برای تعیین میرایی از روش کاهش لگاریتمی استفاده شد. به این ترتیب، نقاط پیک دوره‌های تناوب انتخاب شده و یک رگرسیون نمایی

شتاب‌سنج و دیتالاگر مورد استفاده در این تحقیق، ساخت کارخانه TML ژاپن می‌باشند. مدل دیتالاگر ARF-A و مدل دیتالاگر TMR-200 است. در جدول (۱) مشخصات شتاب‌سنج مورد استفاده و در جدول (۲) مشخصات دیتالاگر مورد استفاده آمده است.

جدول ۱: مشخصات شتاب‌سنج مورد استفاده

توان اسمی (میلی‌ولت بر ولت)	۵۸۸	ضریب کالیبراسیون (متر بر مجذور ثانیه $\times 10^{-6}$)	۰/۰۴۲۶
حساسیت (بر میلی‌متر)	1175×10^{-6}	محدوده دمایی (درجه سانتی‌گراد)	-۱۰ تا ۵۰
مقاومت ورودی (اهم)	۱۲۱/۸	اضافه بار (درصد)	۳۰۰
مقاومت خروجی (اهم)	۱۲۱/۸	ولتاژ تحریکی مناسب (ولت)	کم‌تر از ۲
مقاومت القایی (میلی‌اهم)	۱۰۰۰	حداکثر ولتاژ تحریکی (ولت)	۵
ظرفیت (متر بر مجذور ثانیه)	۵۰	وزن (گرم)	۱۳

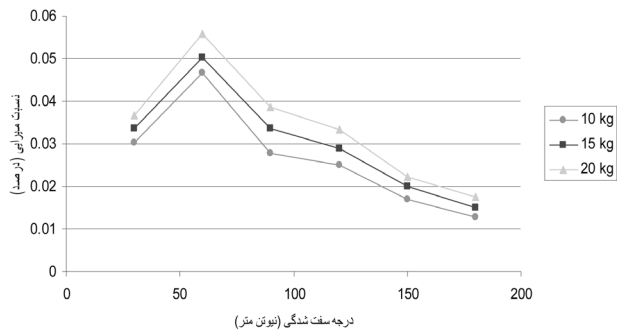
جدول ۲: مشخصات دیتالاگر دینامیکی

تعداد کانال‌های ورودی	حداکثر ۸۰
نمونه‌برداری (میلی‌ثانیه)	(سرعت بالا) ۰/۰۱-۰/۰۹
حافظه اطلاعات (میلیون کلمه بر کانال)	(سرعت پایین) ۱-۲۰۰۰۰
منبع تغذیه	(DC): (آمپر) ۰/۰۸، (ولت) ۱۰-۳۰ (AC): (آمپر) ۲۵، (هرترز) ۵۰-۶۰، (ولت) ۹۰-۲۵۰
دمای مناسب (درجه سانتی‌گراد)	۵۰-صفر
امکانات خروجی اطلاعات	USB و LAN
ابعاد و وزن	(گرم) ۸۰۰، (میلی‌متر) $200 \times 50 \times 100$

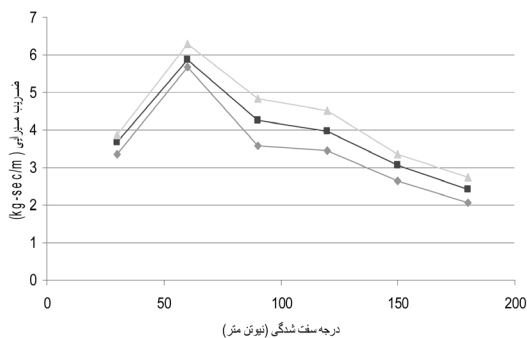
۴- نتایج

نمودارهای ارتعاش آزاد دربردارنده دو خاصیت اصلی دینامیکی سازه، یعنی فرکانس طبیعی و میرایی می‌باشند (البته شکل‌های مودی هم از آن‌ها قابل استخراج است) [۳]. برای استخراج این دو کمیت، ابتدا نقاط پیک منحنی شتاب-زمان انتخاب می‌شوند. این نقاط از اولین نقطه پیک پس از نیم سیکل اول تا جایی که روند کاهش دامنه ادامه داشته باشد انتخاب شدند (بین ۴ تا ۵ نقطه برای منحنی‌های مختلف متفاوت بوده

^۱ MATLAB

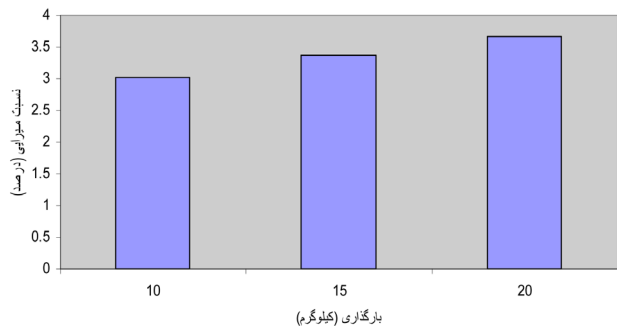


شکل ۹: نمودار نسبت میرایی-درجه سفت‌شدگی

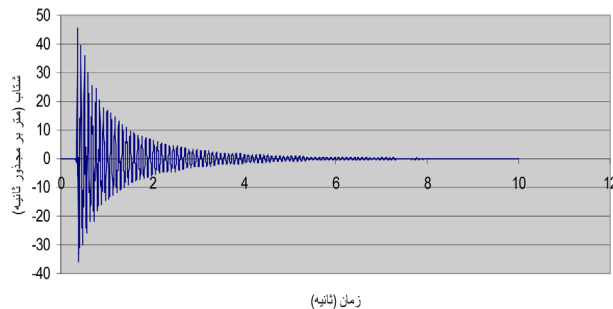


شکل ۱۰: نمودار ضریب میرایی-درجه سفت‌شدگی

تغییری در خود سازه ایجاد گردد (شرایط تکیه‌گاهی و درجه سفت‌شدگی یکسان) و تنها جابجایی‌های اولیه متفاوتی اعمال شد. نتایج نشان داد که هر چه میزان بارگذاری اولیه و به تبع آن جابجایی اولیه و دامنه ارتعاش افزایش یابد، مقدار نسبت میرایی نیز افزایش می‌یابد. به این معنی که میرایی، خود تابعی از دامنه ارتعاش است و با آن رابطه مستقیم دارد. به عنوان مثال، همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، در درجه سفت‌شدگی ۳۰ نیوتن‌متر، مقدار نسبت میرایی به دست آمده تحت بارگذاری ۱۰ کیلوگرم برابر ۳/۰۱۶۴ درصد، تحت بارگذاری ۱۵ کیلوگرم برابر ۳/۰۳۶۹۷ درصد و تحت بارگذاری ۲۰ کیلوگرم برابر ۳/۰۶۶۸۶ درصد است. این نشان می‌دهد که سیستم تحت دامنه ارتعاش بالاتر از خود مقاوت بیشتری در برابر حرکت نوسانی نشان می‌دهد و میل سیستم، به استهلاک سریع‌تر انرژی جنبشی بیشتر است و از این‌رو، نسبت میرایی بالاتر است. در شکل‌های (۱۱) تا (۱۶) با ارائه نمودارهای ستونی، در



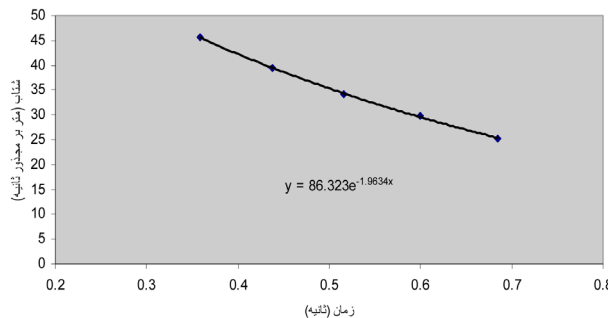
شکل ۱۱: تغییرات نسبت میرایی با افزایش بارگذاری در سفت‌شدگی ۳۰ نیوتن متر



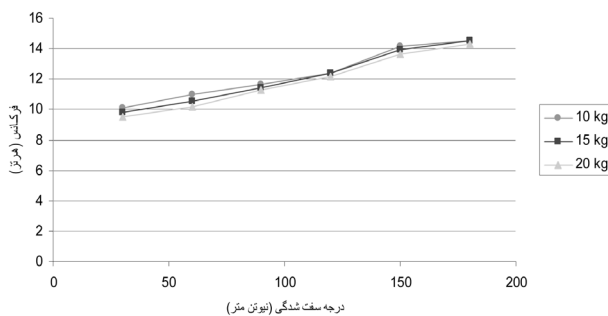
شکل ۶: منحنی پاسخ سیستم، مربوط به درجه سفت‌شدگی ۱۲۰ نیوتن‌متر و وزنه ۱۰ کیلوگرمی

بر این نقاط برازش شد. در شکل (۶) پاسخ سیستم در حوزه زمان و در شکل (۷) منحنی برازش‌شده این پاسخ به صورت نمونه آمده است. تابع رگرسیون به صورت $y = pe^{-\zeta\omega_n t}$ است. به همین دلیل، با داشتن فرکانس می‌توان نسبت میرایی یا ζ را یافت. ضریب میرایی یا c نیز از رابطه $c = 2m\zeta\omega_n$ قابل محاسبه است. لازم به ذکر است که جرم کل سازه برابر $0.18838 \text{ kgf} - \text{sec}^2/m$ است. در شکل‌های (۸) تا (۱۰)، نمودارهای فرکانس، نسبت میرایی و ضریب میرایی بر حسب درجه سفت‌شدگی آمده است.

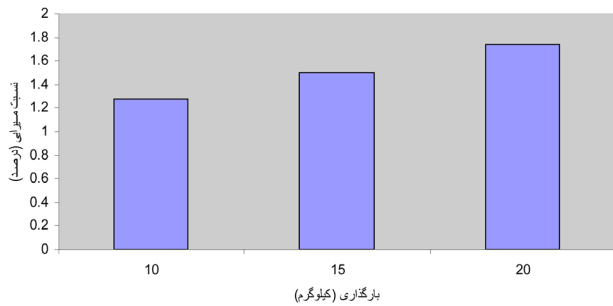
از دیگر موضوعات مورد بررسی در این تحقیق، بررسی اثر دامنه ارتعاش بر نسبت میرایی است که به این منظور از وزنه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرمی برای ایجاد جابجایی‌های اولیه مختلف استفاده شد. در واقع هدف اصلی پی‌بردن به رفتار دینامیکی سازه است؛ بدون آن که هیچ



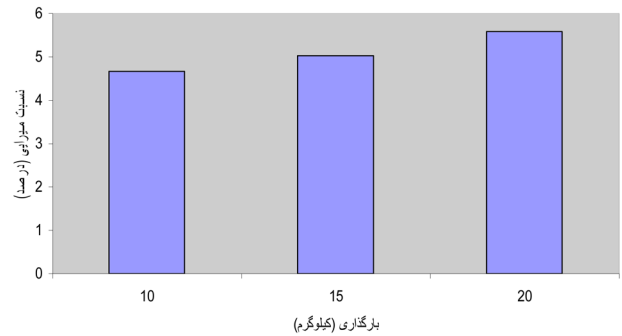
شکل ۷: منحنی برازش‌شده بر نقاط پیک، مربوط به درجه سفت‌شدگی ۱۲۰ نیوتن‌متر و وزنه ۱۰ کیلوگرمی



شکل ۸: نمودار فرکانس-درجه سفت‌شدگی



شکل ۱۶: تغییرات نسبت میرایی با افزایش بارگذاری در سفت‌شدگی ۱۸۰ نیوتن‌متر



شکل ۱۲: تغییرات نسبت میرایی با افزایش بارگذاری در سفت‌شدگی ۶۰ نیوتن‌متر

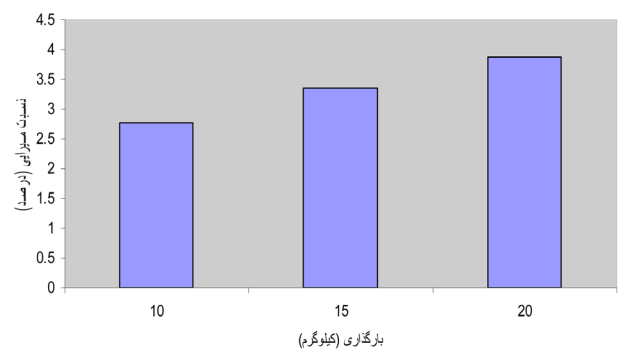
درجات سفت‌شدگی متفاوت این موضوع نشان داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

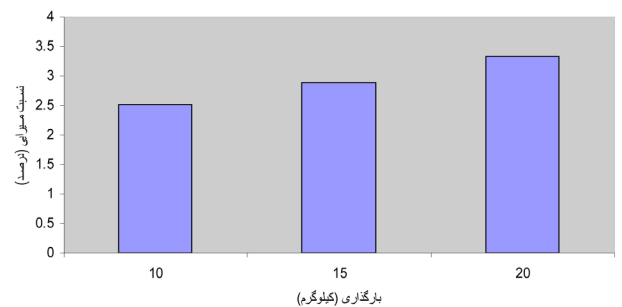
این تحقیق بر روی تأثیر عواملی مانند درجه سفت‌شدگی پیچ و میزان دامنه ارتعاش بر رفتار دینامیکی سیستم اتصالی از نوع MERO و یافتن رابطه‌ای بین آنها متمرکز است.

با بررسی دقیق، معلوم شد که از درجه سفت‌شدگی ۳۰ تا ۶۰ نیوتن‌متر، با افزایش درجه سفت‌شدگی پیچ، نسبت میرایی و ضریب میرایی افزایش و از درجه سفت‌شدگی ۶۰ تا ۱۸۰ نیوتن‌متر، با افزایش درجه سفت‌شدگی پیچ، نسبت میرایی و ضریب میرایی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر و به طور مشخص، می‌توان گفت که مقدار بیشینه نسبت میرایی و ضریب میرایی در درجه سفت‌شدگی ۶۰ نیوتن‌متر رخ می‌دهد و هر چه میزان سفت‌شدگی پیچ کمتر یا بیشتر از این مقدار شود، از میزان نسبت میرایی و ضریب میرایی کاسته خواهد شد. به عبارت دیگر، رابطه میرایی با درجه سفت‌شدگی غیرخطی است. این موضوع را چنین می‌توان توجیه کرد که در درجات سفت‌شدگی بالا، با سفت‌تر شدن پیچ، امکان لغزش و حرکت اجزای اتصال در محل اتصال کاهش یافته و در نتیجه، از مقدار میرایی (به ویژه میرایی کلمب یا اصطکاک) کاسته خواهد شد.

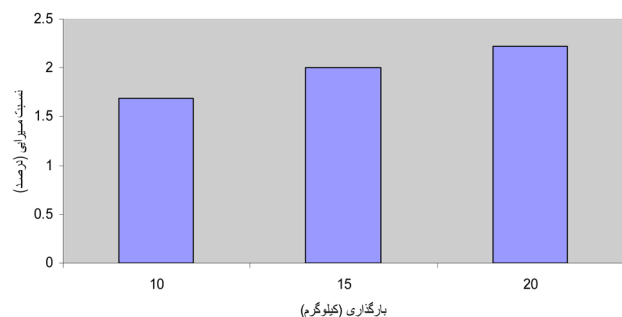
در واقع با افزایش درجه سفت‌شدگی، امکان حرکت و لغزش بین پیچ و گوی و همچنین بین پیچ و غلاف کمتر شده و بنابراین میرایی کلمب یا اصطکاک و به تبع آن میرایی کل کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که بیشترین نسبت میرایی در درجه سفت‌شدگی ۶۰ نیوتن‌متر دیده می‌شود. به این معنی که چنانچه در طراحی این گونه سازه‌ها، به میرایی بالایی نیاز باشد، می‌توان درجه سفت‌شدگی پیچ‌ها را روی ۶۰ نیوتن‌متر تنظیم کرد و اگر نیاز به میرایی پایینی باشد، می‌توان از درجات سفت‌شدگی بالا استفاده نمود. از این موضوع می‌توان نکات مهمی را استخراج کرد: از جمله این که در درجه سفت‌شدگی ۶۰ نیوتن‌متر اتصال بیشترین مقدار میرایی را دارد که به این معنی است که انرژی جنبشی سازه سریع‌تر و زودتر نسبت به دیگر درجات مستهلک می‌شود که این خود به معنی استهلاک و فرسایش بیشتر سازه در اثر حرکات دینامیکی است. از این رو، حالت اقتصادی آن است که سرعت و میزان استهلاک سازه را پایین آورد و بنابراین درجه



شکل ۱۳: تغییرات نسبت میرایی با افزایش بارگذاری در سفت‌شدگی ۹۰ نیوتن‌متر



شکل ۱۴: تغییرات نسبت میرایی با افزایش بارگذاری در سفت‌شدگی ۱۲۰ نیوتن‌متر



شکل ۱۵: تغییرات نسبت میرایی با افزایش بارگذاری در سفت‌شدگی ۱۵۰ نیوتن‌متر

اول، ۱۳۸۴.

- [4] Lazan, B.; "Damping of Materials and Members in Structural Mechanics", Pergamon Press, p. 317, 1968.
- [5] Chopra, A. K.; "Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering", 4th Edition, Prentice Hall, 2011.
- [6] Ebadi, M.; and Davoodi, M. R.; "Evaluate Axial Stiffness of the MERO Connection Under the Effect of Hardening the Screw", International Journal Sci. Emerging Tech., Vol. 4, pp. 116-122, 2012.
- [7] Souza, A.; Goncalves, R. M.; and Malite, M.; "Behaviour of Tubular Space Truss Connections with Stamped End Bars", Journal of Space Structures, Vol. 1, pp. 337-345, 2008.
- [8] Fathelbab, F.; "The Effect of Joints on The Stability of Shallow Single Layer Lattice Domes", Ph.D. Thesis, University of Cambridge, 270 pages, 1997.
- [9] Caglayan, O.; and Yoksel, E.; "Experimental and Finite Element Investigation on The Collapse of a MERO Space Truss Roof Structure", Journal of Engineering Failure Analysis, Vol. 15, pp. 458-470, 2007.
- [10] Androic, B.; "Deformations Observed On Systems Of long Span Space Trusses", International Journal of Space Structures, Vol. 7, pp. 219-222, 2002.
- [11] Davoodi, M. R.; Pashaei, M. H.; and Mostafavian, S. A.; "Experimental Study of the Effects of Bolt Tightness on The Behaviour of MERO-Type Double Layer Grids", Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Vol. 48, pp. 45-52, 2007.
- [12] Pashaei, M. H.; Davoodi, M. R.; and Noshin, H.; "Effects of Tightness of Bolts on The Damping of a MERO-Type Double Layer Grid", International Journal of Space Structures", Vol. 21, pp. 103-110, 2006.
- [13] Pashaei, M. H.; and Asoor, A. A.; "Experimentally Study on The Effects of Type of Joint On Damping", World Applied Sciences Journal, Vol. 8, pp. 608-613, 2010.
- [14] Celebi, M.; "Comparison of Damping in Buildings Under Low-Amplitude and Strong Motion", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 59, pp. 309-323, 1999.
- [15] Fukuwa, N.; Nishizaka, R.; Yagi, S.; Tanaka, K.; and Tumura, Y.; "Field Measurement of Damping and Natural Frequency of Actual Steel-Framed Building

سفت‌شدگی ۶۰ نیوتن‌متر به نوعی غیراقتصادی‌ترین درجه سفت‌شدگی است و سازه به مانند یک میراگر عمل می‌کند و هرچه درجه سفت‌شدگی بیشتر شود (البته در محدوده مجاز)، میزان استهلاک و فرسایش کمتر شده و بنابراین عمر سازه افزایش می‌یابد و این یک دستاورد مهم در طراحی این گونه سازه‌ها است.

از دیگر نتایج به دست آمده، رابطه مستقیم بین فرکانس و درجه سفت‌شدگی است که با توجه به رابطه مستقیم فرکانس و سختی، این افزایش فرکانس ناشی از افزایش سختی به دلیل افزایش درجه سفت‌شدگی است. در واقع، نتایج آزمایش به طور کامل با مبانی نظری تطبیق دارد.

از دیگر موارد بررسی‌شده در این تحقیق، بررسی جابجایی اولیه (دامنه ارتعاش) بر روی نسبت میرایی است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نسبت میرایی با تغییر میزان بارگذاری تغییر می‌کند. به این صورت که با افزایش میزان بارگذاری، مقدار نسبت میرایی نیز افزایش می‌یابد. در واقع افزایش میزان بارگذاری، جابجایی اولیه را افزایش داده و موجب افزایش دامنه ارتعاش می‌شود. این امر به آن معنی است که نسبت میرایی تابعی از دامنه ارتعاش است و با آن رابطه مستقیم دارد. به عبارت دیگر، رفتار دینامیکی سیستم در محدوده دامنه‌های مورد مطالعه غیرخطی است؛ یعنی سازه در مواجهه با میزان دامنه‌های ارتعاش متفاوت، دارای میرایی متفاوتی خواهد بود. نکته مهم این است که هر چه بتوان دامنه ارتعاش سازه را محدودتر و کمتر کرد، میزان میرایی و به تبع آن میزان استهلاک سازه نیز کمتر و در نتیجه عمر و دوام سازه بیشتر می‌شود؛ پس برای یک طراحی بهینه و اقتصادی در این نوع سازه‌ها، بهتر آن است که دامنه ارتعاش را کمتر نمود.

در این تحقیق، تأثیر درجه سفت‌شدگی پیچ و دامنه ارتعاش بر رفتار دینامیکی سازه فضایی با سیستم اتصالی MERO مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که این عوامل تأثیر بسزایی در رفتار دینامیکی سازه‌های با این نوع اتصال دارد. بنابراین برای ساخت سازه‌های فضایی با این نوع اتصال، باید توجه ویژه‌ای به اتصال و نقش آن در رفتار کل سازه داشت و با توجه به آن، اقتصادی‌ترین و مقاوم‌ترین و در کل بهینه‌ترین حالت را انتخاب نمود.

۶- مراجع

- [۱] سوامی، رام؛ کاوه، علی؛ کروی، فرهاد؛ کیوانی، جعفر؛ تحلیل، طراحی و ساخت سازه‌های فضایی فولادی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۳.
- [۲] قاسمی، میثم؛ مطالعه تجربی رابطه نیرو-تغییر مکان سیستم اتصالی MERO و بررسی اثر آن در پاسخ سازه‌های فضاکار دولایه تخت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل، ۱۳۸۷.
- [۳] جیمین، هی؛ ژئی فانگ، فو؛ ضیائی‌راد، سعید؛ صالحی، مهدی؛ آنالیز مودال، انتشارات مؤسسه علمی دانش پژوهان برین، اصفهان، چاپ

Over a Wide Range of Amplitudes", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 59, pp. 325-347, 1999.