

مقایسه‌ی شاخص‌های رفتار میراگر فلزی آکاردئونی توخالی و پر شده با فوم پلیمری در بارگذاری محوری رفت و برگشتی

اسماعیل ایزدی زمان آبادی¹، فریبرز ناطقی الهی^{2*}، مهرتاش معتمدی³

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
۲- استاد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

Nateghi@iiees.ac.ir

(دریافت مقاله: آذر 1386، پذیرش مقاله: آذر 1387)

چکیده- در چند دهه گذشته تحقیقات بسیاری در زمینه قطعات الحاقی مستهلک کننده انرژی به ویژه میراگرهای فلزی پسماند انجام شده و نمونه‌های متنوعی از آن با قابلیت‌های مختلف توسعه یافته است. درسالیان اخیر استفاده از کمانش آکاردئونی سیستمهای جدار نازک لوله‌ای نظر پژوهشگران را جلب کرده و به توسعه‌ی میراگر فلزی آکاردئونی منجر شده است. در این مقاله پس از معرفی میراگر فلزی آکاردئونی پر شده، شاخص‌های رفتار میراگر پر شده و توخالی برای بارگذاری محوری چرخه‌ای مطالعه و مقایسه شده است. بدین منظور ابتدا به روشی تحلیلی اجزای محدود، مشخصات تقریبی پلیمر پرکننده مؤثر تعیین و سپس چهار نمونه آزمایشگاهی شامل دو نمونه میراگر پر شده با نوع خاصی فوم پلیمریک و دو نمونه‌ی میراگر توخالی متناظر با آنها، با استفاده از یک هیدرولیکی کشش و فشار آزمایش شده است. سپس تأثیر پرشوندگی میراگر با فوم بر برخی از مهمترین شاخصهای رفتار تعیین و سعی شده از این روش به‌منظور پایداری و بهبود رفتار میراگر استفاده شود. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ماده پرکننده متناسب در داخل میراگر، روشی مناسب به‌منظور افزایش برخی شاخص‌های رفتاری میراگر مانند تعداد چرخه‌ی قابل تحمل، میزان جذب انرژی و همچنین ظرفیت خمیری کشش و فشار میراگر بوده و اثر اندرکنش بین فوم و جدار آکاردئونی در افزایش جذب انرژی و افزایش ظرفیت خمیری سیستم به‌ویژه برای نمونه‌های جدار نازک آکاردئونی با ظرفیت باربری پایین، چشمگیر است.

کلید واژگان: مطالعه آزمایشگاهی، میراگر فلزی آکاردئونی پر شده، فوم پلیمریک

1- مقدمه و مرور

به دلیل فراوانی استفاده از لوله‌های جدارنازک به عنوان المان‌های سازه‌ای، این لوله‌ها به عنوان معمول‌ترین شکل و احتمالاً قدیمی‌ترین شکل مورد استفاده در سیستم‌های جذب انرژی هستند [1]. لوله‌های جدارنازک تحت فشارمحوری، به دلیل ظرفیت زیاد جذب انرژی و طول لهیدگی یکی از بهترین شیوه‌های جذب انرژی را فراهم می‌سازند [2]. روش‌های جذب انرژی با استفاده از لوله‌های جدارنازک شامل وارونش¹، پارگی محوری²، کمانش محوری³، تورفتگی جانبی⁴، فشردگی جانبی⁵ و لوله‌های شامل مواد پرکننده می‌شود. کمانش محوری به عنوان یکی از بهترین روش‌های جذب انرژی در سه الگوی آکاردئونی⁶، الماسی⁷ و اولری⁸ انجام می‌شود و پارامترهای هندسی تأثیر زیادی بر الگوی کمانش دارد [3]. در هریک از این الگوها، در صورتی که طول تمامی قطعات یکسان فرض شود، الگوی کمانش آکاردئونی بیشترین جذب انرژی را دارد که این ناشی از تغییر شکل بیشتر جداره‌های لوله در تغییر شکل آکاردئونی است [4]. مطالعات بسیاری در زمینه توسعه، پایداری رفتار و افزایش جذب انرژی در لوله‌های جدار نازک تحت بارگذاری ضربه انجام شده که در ادامه معرفی می‌شود. هان و یامازاکی [5] بهینه‌سازی میزان انرژی جذب شده در لوله‌های جدارنازک دایره‌ای تحت ضربه محوری از طریق انتخاب ترکیب مناسبی از پارامترهای هندسی لوله جدار نازک صاف را مطالعه کردند.

1. Inversion
2. Splitting
3. Axial Crushing
4. Lateral Indentation
5. Lateral Flattening
6. Concertina Buckling Mode
7. Diamond Buckling Mode
8. Euler Buckling

دانشی و حسینی پور [6] ایجاد شیارهای حلقوی یک در میان در داخل و خارج لوله‌های جدار نازک دایره‌ای را به عنوان روش مؤثری در تقویت یکنواختی در رفتار نمودار بار- تغییر مکان و همچنین پیش‌بینی ظرفیت جذب انرژی در این لوله‌ها تحت فشردگی محوری معرفی کردند.

سینگیس و ال سابکی [7] ایجاد موج در طول لوله‌های جدارنازک صاف را به عنوان روش دیگری برای تقویت یکنواختی و همچنین ایجاد نظم مطلوب در رفتار لوله‌های جدارنازک تحت ضربه محوری معرفی کرده و رفتار این لوله‌ها را به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. ایجاد موج در طول لوله موجب اجبار در ایجاد لنگرهای خمیری بیشینه و در نتیجه ایجاد مفاصل خمیری در نقاط قعر و اوج موج‌ها به عنوان نواحی از پیش تعیین شده می‌شود. مطالعه تأثیر عملیات حرارتی، تأثیر پرکردن لوله‌های موجدار با استفاده از فوم، تأثیر تغییر عمق موج‌ها و همچنین تغییر محل اعمال بار بر عملکرد لوله به عنوان المان جاذب انرژی ضربه، مهمترین مطالعاتی است که توسط سینگیس و ال سابکی انجام شده است. در روش استفاده از لوله‌های جدارنازک آکاردئونی⁹ به عنوان یک میراگر فلزی پسماند که نخستین بار از سوی معتمدی و ناطقی الهی [8] در سال 2004 پیشنهاد شده، از لوله جدارنازک آکاردئونی تحت نیروی محوری چرخه‌ای به منظور تحریک الگوی کمانش آکاردئونی و در نتیجه افزایش میزان جذب انرژی استفاده شده است. معتمدی و ناطقی الهی [9] به مطالعه‌ی آزمایشگاهی میراگر فلزی آکاردئونی پرداخته و نشان دادند که این میراگر از جذب انرژی کافی و پایداری رفتاری مناسبی برخوردار است. مطالعه‌ی استهلاک انرژی در لوله‌های جدارنازک

9. Accordion Thin-Walled Tubes

آکاردئونی به روشهای تحلیلی و پارامتری نیز توسط معتمدی و همکاران [10] انجام شده است. بدین منظور مدل‌های اجزای محدود لوله‌های آکاردئونی با شکل‌ها و پارامترهای متنوع هندسی ایجاد و کالبره شده و مشخصه‌های جذب انرژی در آنها با تغییر پارامترهای مختلف مطالعه شده است. معتمدی و ناطقی الهی [11] به مطالعه تجربی کاربرد میراگر فلزی آکاردئونی در مقاوم‌سازی لرزه‌ای قابهای فولادی پرداختند و استفاده از میراگر فلزی آکاردئونی را به‌عنوان یک روش مؤثری در مقاوم‌سازی لرزه‌ای قابهای فولادی پیشنهاد کردند. استفاده از مواد پرکننده در سیستمهای جاذب انرژی ضربه مانند سیستمهای جدار نازک لوله‌ای جزو راهکارهای اثبات شده برای تثبیت و بهبود رفتار این سیستمها به شمار می‌رود. رید و همکاران [12] با طبقه‌بندی کماتش لوله‌های جدار نازک مربعی و مستطیلی به کماتشهای اولری، فشرده و غیر فشرده، تأثیر پرکنندگی لوله‌های جدارنازک مربعی و مستطیلی را در دو حالت توخالی و پر شده با استفاده از فومهای پلیمری (با چگالی مختلف) بر گسیختگی این سیستمها برای شرایط بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی محوری آزمایش کرده و نشان دادند که متوسط نیروی لهیدگی¹ این سیستمها با افزایش چگالی فوم افزایش یافته و لهیدگی غیرفشرده و همچنین کماتش اولری ستونها در این لوله‌ها هنگامی که با فوم پر شدند مشاهده نشده است. فشردگی محوری لوله‌های جدار نازک تک مخروطی² و دومخروطی³ توسط رید و ردی [13] مطالعه شده و تأثیر پر شدگی لوله‌های جدار نازک مخروطی به کمک فوم پلی اورتان⁴ صلب و چنین نتیجه‌گیری شد که دامنه‌ی

نوسان‌ای بار در حضور مواد پرکننده در لوله‌های جدار نازک مخروطی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر لوله‌های جدارنازک مخروطی توخالی رفتاری غیر فشرده نشان دادند در حالی که لوله‌های جدارنازک مخروطی پر شده با فوم بیشتر رفتار کماتش فشرده نشان دادند. در مطالعات رید [3] در زمینه استفاده ترکیبی از مصالح مختلف در مؤلفه جاذب انرژی ضربه، استفاده از فوم پلیمری به‌منظور پایدار سازی و همچنین تقویت عملکرد لوله‌های جدار نازک مورد توجه قرار گرفته و نشان داده شده که استفاده از فوم به‌عنوان ماده پرکننده می‌تواند موجب انتقال رفتار کماتش غیرفشرده این سیستمها به حالت کماتش فشرده شود. تأثیر فوم‌های با چگالی بالا یا پرکننده‌های از جنس چوب کاج بر مود تغییر شکل کماتشی شبه‌استاتیکی و دینامیکی لوله‌های جدار نازک غیردایره‌ای نیز توسط ردی و ال حسانی [14] مطالعه شده است. مطالعات ایشان نشان داد که استفاده از این پرکننده‌ها موجب کاهش طول موج لهیدگی محوری لوله‌های جدار نازک مربعی می‌شود که این ناشی از خاصیت غیرایزوتروپیک چوب است. تأثیر مواد پرکننده بر رفتار لوله‌های جدار نازک موجدار نیز توسط سینگیس و ال سابکی [7] مطالعه شده است. بدین منظور داخل چند نمونه جدار نازک موجدار⁵ را با استفاده از فوم پلی اورتان با چگالی کم پر کرده و سپس نمونه را تحت آزمایش فشردگی محوری قرار دادند که تعدادی از حلقه‌های آکاردئونی دچار بهم ریختگی و بی‌نظمی شدند؛ ایشان علت این را احتمالاً تغییرات در چگالی و همچنین میزان پرشدگی نمونه‌ها دانستند. در چندین مطالعه هنسن و همکاران [15] و همچنین سانتوسا و همکاران [16] به دنبال استخراج معادلاتی برای محاسبه متوسط نیروی لهیدگی لوله‌های جدارنازک پر

1. Mean Crushing Load

2. Single-Tapered

3. Double-Tapered

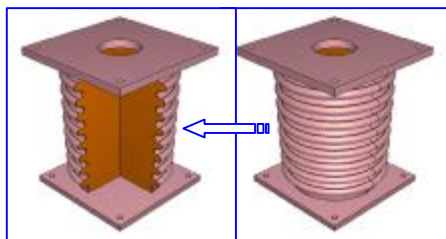
4. Polyurthane Foam

5. Corrugated Tubes

و مقدار آن برای نمونه‌های جدار نازک پر شده بیشتر از مجموع انرژی جذب شده توسط لوله توخالی و فوم هریک به‌تنهایی است مطالعه جذب انرژی در مقاطع جدار نازک کلاهی شکل⁴ پر شده با فوم آلومینیوم به روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی توسط سُنْگ و همکاران [22] نشان داده است که این سیستمها نیز مانند بسیاری از سیستمهای دیگر جاذب انرژی ضربه - هنگامی که با فوم آلومینیوم پر شوند- پایداری رفتاری بهتری از خود نشان می دهند.

2- چالش تحقیق

با وجود مطالعات گسترده در زمینه‌ی استفاده از مواد پرکننده در سیستمهای جاذب انرژی ضربه، رفتار این سیستمها تحت بارگذاری محوری رفت و برگشت خاص میراگرهای سازه‌ای تاکنون مطالعه نشده است. در این تحقیق ضمن معرفی میراگر فلزی آکاردئونی پر شده، با مدل‌سازی تحلیلی و انجام آزمون- های آزمایشگاهی میراگر پر شده، رفتار آن تحت بارگذاری محوری رفت و برگشت مطالعه شده است. در شکل (1) میراگر فلزی آکاردئونی پر شده و مقطع آن و در جدول (1) پارامترهای هندسی میراگر فلزی آکاردئونی آورده شده است. در شکل (2) این پارامترها روی مقطع میراگر نشان داده شده است.



شکل ۱ میراگر فلزی آکاردئونی پر شده به‌همراه مقطع میراگر

شده با فوم با در نظر گرفتن مشارکت متوسط نیروی لهدگی لوله جدارنازک توخالی، تنش مسطح¹ مربوط به فوم و همچنین اندرکنش بین فوم و لوله بوده‌اند. تأثیر پرکننده‌های چوبی شبه فوم بر تغییر شکل لوله‌های جدارنازک پی‌وی‌سی به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی توسط سینگیس [17] مطالعه شده است. این مطالعه‌ی شامل مطالعه کاربرد خاک اره و خرده‌های چوب درودگری در طراحی المان‌های جاذب انرژی بوده و نتایج آزمایشها نشان داد که مود کماتش محوری لوله‌ی پی‌وی‌سی از مود الماسی به مود متقارن محوری آکاردئونی در ازای چگالی مشخصی از پرکننده‌های چوبی انتقال می‌یابد. مدل‌سازی اجزای محدود و همچنین مطالعه‌ی آزمایشگاهی به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسی کلیدی بر کماتش محوری لوله جدار نازک دایره‌ای پر شده با فوم پی‌وی‌سی نیز توسط میگوئید و همکاران [18 و 19] انجام و نشان داده شده که تأثیر اندرکنش² فوم- جداره بر مجموع انرژی جذب شده قابل توجه است. کاوی و همکاران [20] مطالعاتی را در زمینه- ی پیش‌بینی میزان جذب انرژی در لوله جدارنازک آلومینیومی پر شده با فوم بر مبنای تعیین آزمایشگاهی ثابت سخت‌کنندگی³ انجام دادند. نتایج مطالعات ایشان در زمینه بررسی تأثیر استفاده از فوم‌های مذکور نشان داد که مود کماتش الماسی مربوط به لوله جدارنازک توخالی به مود کماتش آکاردئونی صرف‌نظر از نوع و همچنین دانسیته فوم استفاده شده در لوله جدار نازک پر شده با فوم تغییر می‌کند. تحلیل عددی و آزمایشگاهی کماتش محوری لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای از جنس آلومینیوم در دو حالت توخالی و پر شده با فوم پلی استایرن با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود PAM-CRUSH بوسیله آکائی و همکاران [۲۱] نشان داده است که با افزایش چگالی ماده پرکننده، میزان انرژی جذب شده افزایش می‌یابد

1. Plateau Stress

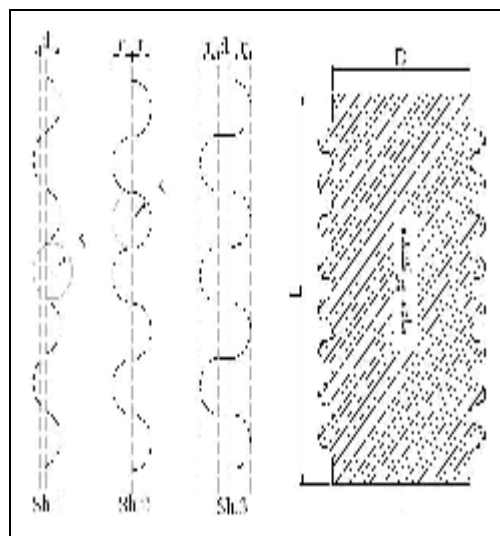
2. Interaction

3. Strengthening Coefficient

4. Hat Section Thin-Walled Tubes

3- انتخاب ماده پرکننده

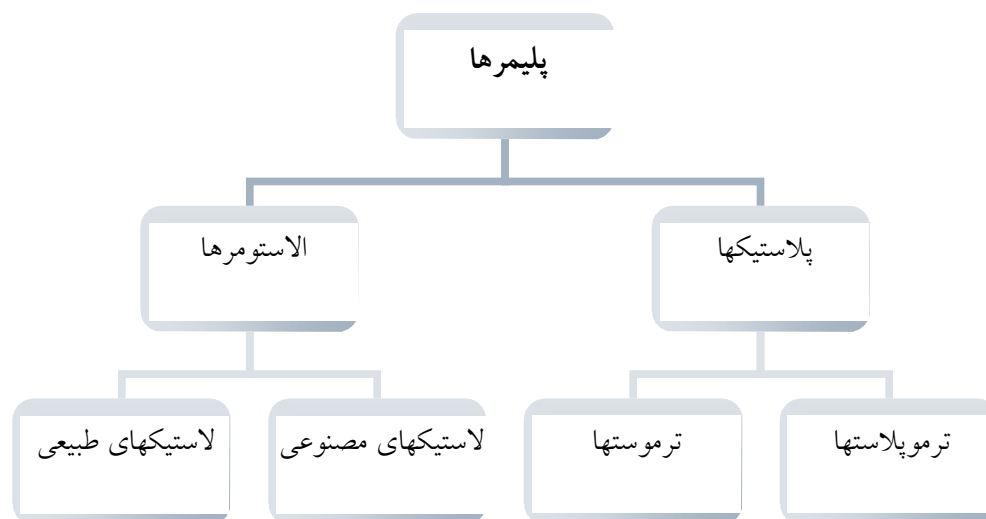
در مقدمه گفته شد که از مصالحی مانند فوم‌های ترد پلیمری و فلزی مانند پلی اتیلن، پی‌وی‌سی و آلومینیم یا موادی مانند خاک اره خرد شده‌های چوب و غیره برای بهبود رفتار سیستمهای جاذب ضربه استفاده شده است. نکته قابل توجه در تمامی این پرکننده‌ها آن است که فقط تحت نیروی فشرده‌گی محوری ضربه کارائی دارند و با توجه به خواص ذاتی آنها، تحت تحریک‌های محوری رفت و برگشتی و دینامیکی خاص میراگرهای سازه‌ای عملکرد خاصی نخواهند داشت.



شکل 2 میراگر فلزی آکاردئونی پر شده به همراه مقطع آن

جدول 1 پارامترهای تعریف شده برای میراگر فلزی آکاردئونی [11]

تپ شکل هندسی	قطر لوله	طول لوله	ضخامت جداره	تعداد موجها	شعاع موج	فاصله مرکز دو موج	عمق موج	گام موج
Sh	D	L	T	n	r	d	s	g



شکل 3 طبقه بندی پلیمرها بلحاظ خواص فیزیکی

در نگاه کلی، پلیمرها، به دلیل خواص فیزیکی، به دو گروه اصلی لاستیک‌ها (الاستومرها) و پلاستیک‌ها تقسیم می‌شوند. در شکل (3) طبقه‌بندی پلیمرها از نظر خواص فیزیکی نشان می‌دهد.

گروه‌های مختلف پلیمری افزون بر مشخصات مکانیکی خاص، قابلیت فوم شدن را نیز دارند.

از دو گروه اصلی و شناخته شده از فوم‌ها معمولاً به- عنوان جاذب انرژی استفاده می‌شود. فوم‌های پلیمری و فوم‌های فلزی. فوم‌های پلیمری¹ معمولاً با دمیدن حباب گاز به درون مونومر مایع به‌دست می‌آید.

حباب‌ها اجازه دارند که قبل از آن که پلیمر سفت شود توسعه یافته و پایدار شوند [1]. به‌منظور انتخاب ماده پرکننده مناسب در گام اول بخشی از مشخصه‌های مطلوب برای ماده پرکننده به‌صورت شهودی استخراج شده و در ادامه خواص مکانیکی طیف وسیعی از پلیمرها مانند لاستیک‌های طبیعی و مصنوعی و همچنین فوم‌های انعطاف پذیر پلیمری مطالعه شده است. با در نظر گرفتن خواص مکانیکی و نتایج مطالعات تحلیلی مقدماتی به- دست آمده که در بخش بعدی آورده شده، نمونه‌ای فوم پلیمری انعطاف پذیر پلی‌اورتان برای مطالعات آزمایشگاهی انتخاب شده است.

4- توسعه‌ی مدل اجزای محدود و تحلیلی مقدماتی

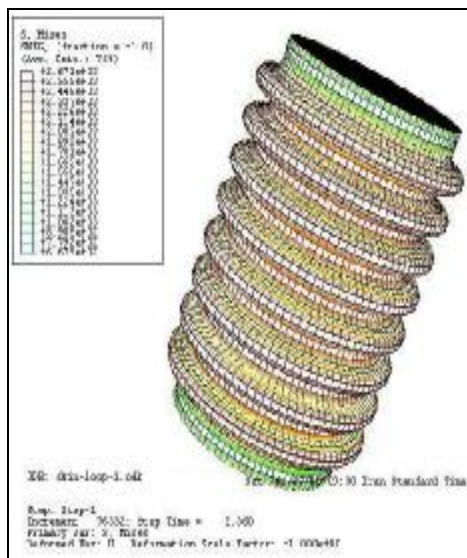
در این مطالعه از نرم افزار اجزای محدود Abaqus برای مدل‌سازی میراگر فلزی آکاردئونی پر شده تحت بارگذاری چرخه‌ای استفاده شده است. این نرم‌افزار چندمنظوره‌ی توانمند توانایی شبیه‌سازی مسائل را در محدوده‌ی وسیعی از تحلیل‌های سازه، مکانیک خاک، انتقال حرارت، آکوستیک

و غیره داشته و قابلیت خوبی در شبیه‌سازی تصویری مدل‌های اجزای محدود دارد. در این نرم افزار همچنین امکان ورود مدل با پسوندهای شناخته شده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی مانند Catia, Solid Work و Autocad وجود دارد. پس از ساخت هندسه مدل‌ها به کمک نرم‌افزار Catia، مش‌بندی انجام شده است. به‌منظور توسعه مدل اجزای محدود از المان‌های Shell برای مدل‌سازی لوله‌های جدار نازک و المان Solid برای مدل‌سازی مواد پرکننده استفاده شده است. المان S4R که بیانگر المان Shell چهار وجهی با چهارگره است، برای مدل‌سازی لوله جدار نازک آکاردئونی و المان C3D8R به منظور مدل‌سازی مواد پرکننده استفاده شده است. المان C3D8R المان هشت گرهی و خطی با فرمولبندی انتگرال گیری کاهش یافته² است. استفاده از انتگرال گیری کاهش یافته موجب کاهش زمان اجرای برنامه به‌ویژه در مسائل سه‌بعدی می‌شود [23]. بهینه‌سازی مش‌بندی³ تا رسیدن به پاسخهایی پایدار و همگرا شدن نتایج ادامه می‌یابد تا هم زمان اجرای برنامه زیاد نباشد و هم نتایج تحلیلی دقت کافی داشته باشد. بدین منظور ابعاد مش بندی مدل اجزای محدود به‌صورت گام به گام تا جایی کاهش یافته که تغییرات پاسخ در تمامی گامهای زمانی حل مسئله کمتر از یک درصد نسبت به گام قبل از آن شود. مدل پلاستیسیته فلزی با سخت‌شوندگی جنبشی⁴ برای مدل- سازی لوله جدار نازک استفاده شده است. در این تحقیق برای ساخت لوله‌های جدار نازک آکاردئونی از فولاد زنگ‌نزن⁵ A304 استفاده شده است. نمودار تنش - کرنش حاصل از آزمون کشش فولاد بر اساس استاندارد آزمایش مصالح ASTM A370-97a، در مدل‌سازی مورد استفاده

2. Reduced Integration
3. Mesh Optimization
4. Isotropic Hardening
5. Stainless Steel

1. Polymeric Foams

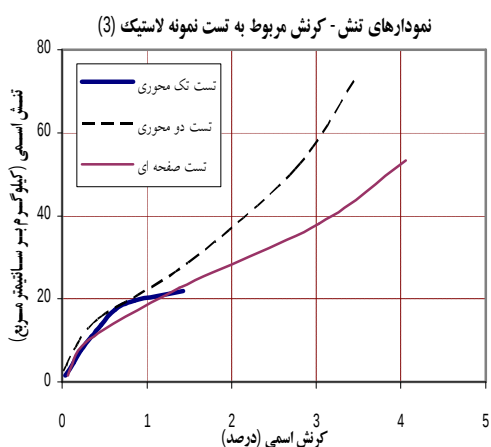
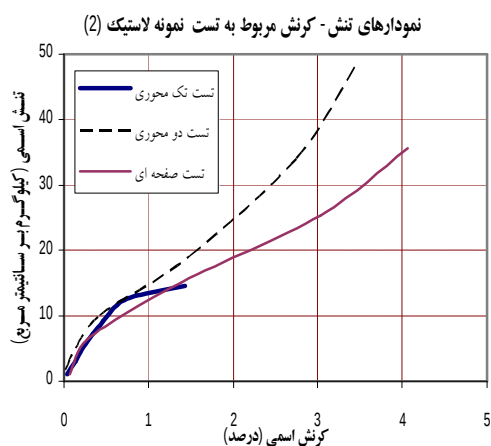
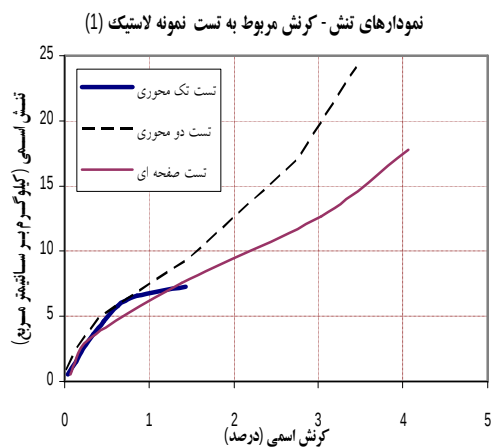
مربوط به تغییر شکلی است که میراگر هنگامی که سازه تحت تغییرشکلهای جانبی نسبی مجاز قرار می گیرد تحمل می کند. انجام تحلیل مودی، محاسبه ی بزرگترین فرکانس طبیعی سازه و محاسبه حد پایداری برای تعیین حداکثر طول گامهای زمانی حل مسئله با توجه به اینکه از دستورالعمل صریح برای یافتن پاسخها استفاده شده است از جمله فعالیتهایی است که به منظور مدل سازی صحیح و دقیق در دستور کار قرار گرفته است. به منظور اطمینان از تأثیر نداشتن مودهای صفر با توجه به این که در مدل سازی از انتگرال گیری کاهش یافته و مش بندی منظم استفاده شده، از قابلیت های نرم افزار برای پیشگیری از تأثیر این مودها (مقایسه انرژی جذب شده توسط مودهای صفر با انرژی داخلی) استفاده شده است. در شکل (4) نمونه ای از مدل های اجزای محدود توسعه یافته برای میراگر پر شده با نمونه ای پلیمر با مشخصات مفروض آورده شده است.



شکل 4 مدل اجزای محدود میراگر پر شده با نمونه ی پلیمر

قرار گرفته است. برای مدل سازی مواد پرکننده نیز از مدل های هایپرالاستیک¹ و همچنین هایپر فوم² موجود در نرم افزار استفاده شده است. تغییر شکل مصالح هایپرالاستیک و هایپر فوم تا دامنه کرنش های با مقادیر زیاد ارتجاعی اما به شدت غیرخطی است. نرم افزار Abaqus، رفتار مصالح هایپرالاستیک را ارتجاعی، همسانگرد و تقریباً تراکم ناپذیر فرض می کند. رفتار مصالح هایپر فوم، ارتجاعی، همسانگرد اما کاملاً تراکم پذیر فرض می شود. به منظور مدل سازی این مصالح به انجام حداقل یک آزمون کشش و فشار تک محوری و دو محوری نیاز است که با توجه به این که در مرحله مطالعه تحلیلی مقدماتی، هدف، انتخاب ماده پرکننده بوده، از نتایج آزمون نمونه های پلیمر استفاده شده است. به منظور مدل سازی شرایط مرزی بین سطح خارجی ماده پرکننده و سطح داخلی لوله آکاردئونی در نرم افزار دو روش وجود دارد. روش اول مدل سازی بصورت Solid-Skin بوده و در این روش فرض بر آن است که المان های مرزی مربوط به جداره آکاردئونی و همچنین ماده پرکننده کاملاً به یکدیگر مقید هستند. روش دوم استفاده از مدل های تماسی سطح به سطح³ موجود در نرم افزار است. در مدل اولیه استفاده شده در تحلیلهای مقدماتی از روش اول استفاده شده اما به منظور ارائه مدل نهایی اجزای محدود برای میراگر می باید در مطالعه آزمایشگاهی، رفتار فصل مشترک ماده پرکننده و لوله جدارنازک آکاردئونی مد نظر قرار گرفته و در صورت نیاز، مدل اصلاح شود. بارگذاری به کار رفته در تحلیلهای مقدماتی به صورت نیروی محوری رفت و برگشتی با الگوی مثلثی و به صورت کنترل تغییر مکانی با دامنه $3 \pm$ سانتی متر بوده است. دامنه بارگذاری انتخابی در واقع

1. Hyperelastic
2. Hyperfoam
3. Surface to Surface Contact



توسعه‌ی تنشهای وان میز¹ به عنوان معیار تنش انتخابی در نقاط قعر و اوج چین خوردگیهای آکاردئونی نشان داده شده است.

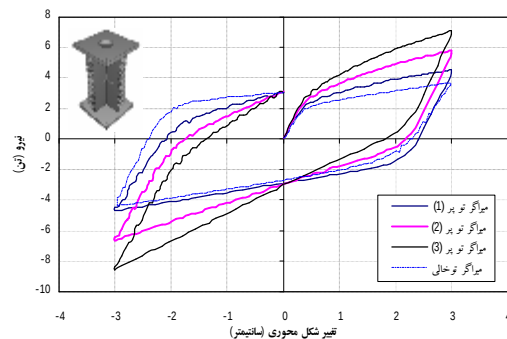
مطالعات تحلیلی مقدماتی به منظور انتخاب ماده پرکننده برای مطالعات آزمایشگاهی در دستور کار قرار گرفته و سعی شده از نمونه‌ای پلیمر با سختی متناسب به عنوان پرکننده در داخل نمونه توخالی استفاده شود تا مؤثر باشد. بدین منظور مدل‌های اجزای محدود نمونه توخالی و همچنین نمونه توپر میراگر با نمونه‌های مختلف پلیمر - مانند لاستیک طبیعی²، سیلیکون، اورتان و مانند آن با سختیهای مختلف توسعه یافته و سپس از نتایج این تحلیلها در انتخاب نوع و میزان سختی ماده پرکننده استفاده شده است. مدل‌های توسعه یافته اجزای محدود به‌تنهایی - با توجه به در اختیار نبودن نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی گزینه قابل قبولی برای رفتارسنجی نمی‌باشند و لازم است پس از انجام آزمایشها مدل اجزای محدود اصلاح و کالیبره شود تا بتوان مدل تحلیلی میراگر را استخراج و در مطالعات پارامتری از آن استفاده کرد. در شکل (5) نمونه‌ای از نمودارهای تنش - کرنش مربوط به نمونه‌ای از پلیمرهای پرکننده با سختیهای مختلف که در تحلیلهای مقدماتی به کار رفته نشان داده شده است. در شکل (6) تأثیر اضافه شدن این پرکننده‌ها بر منحنی رفتاری میراگر نشان داده شده است.

شکل ۵ نمودارهای تنش - کرنش نمونه های پلیمر استفاده شده در نمونه ای از مطالعات تحلیلی مقدماتی

1. Von-Misses
2. Natural Rubber

۵-۱- مشخصات نمونه‌ها و روش ساخت

مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی بر مبنای پارمترهای هندسی میراگر در جدول (3) آورده شده است. برای ساخت لوله‌های جدار نازک آکاردئونی از شکل‌دهی به‌روش پانچ با توجه به امکانات ساخت و خطوط تولید موجود استفاده شده است. برای پرکردن نمونه با استفاده از فوم پلیمری از روش قالب‌گیری آمیزه¹ استفاده شده است. در این روش نخست سطح داخلی میراگر برای پاکسازی از هرگونه زنگار یا پلیسه، سنبلاست می‌شود. به‌منظور چربی زدائی از سطوح، نمونه‌ها در حمام استون² قرار می‌گیرند. به‌علت چسبندگی نسبتاً خوب سطح خارجی فوم پلیمری و سطح داخلی جداره آکاردئونی، در فصل مشترک سطوح از اپوکسی استفاده نشده است. البته لازم است مطالعاتی نیز در زمینه میزان چسبندگی فوم جداره انجام شود. در این حالت از ترکیب طراحی شده متناسب با میزان سختی مورد نیاز از مواد اولیه موجود، افزودنیها و همچنین هاردنر استفاده می‌شود و آمیزه ساخته شده داخل نمونه ریخته شده و پر می‌شود سپس نمونه به وسیله گیره و پیکربندی طراحی شده محکم می‌شود. پس از قالب‌گیری، آمیزه مورد نظر کاملاً سخت شده و نوعی لاستیک‌فوم با کیفیت خوب تولید می‌شود.



شکل 6 منحنیهای رفتاری میراگر فلزی آکاردئونی پر شده با نمونه‌هایی از پلیمرهای پرکننده مفروض با سختیهای مختلف

۵- مطالعات آزمایشگاهی

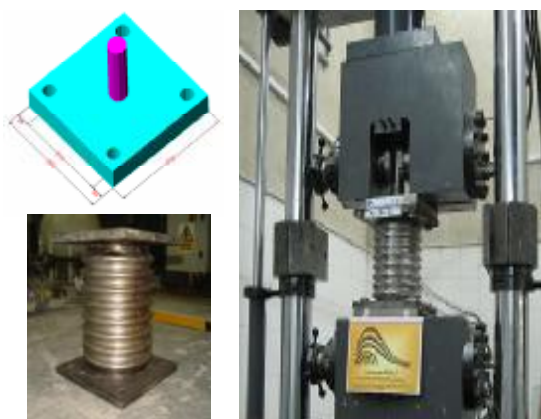
به‌منظور مطالعه رفتار میراگر فلزی آکاردئونی توخالی و پر شده با فوم پلیمری، در این تحقیق از آزمون آزمایشگاهی برای لوله‌های جدارنازک آکاردئونی توخالی و پر شده با فوم - در شرایطی که میراگر در طی فرایند، بارگذاری در قاب سازه‌ای تحمل می‌کند - استفاده شده است.

جدول ۳ مشخصات و پارامترهای هندسی نمونه‌های مورد آزمایش

شماره نمونه	S.h	D	L	T	n	r	s	d	سختی ماده پرکننده
واحد	-	میلیمتر	-	-	-	-	میلیمتر	Sure.A	
P-1	۲	۱۵۰	۲۵۶	۲	۸	۸	۱۳	-	۵۰ نمونه با ظرفیت باربری بالا
P-1*	۲	۱۵۰	۲۵۶	۲	۸	۸	۱۳	-	نمونه توخالی متناظر
P-2	۳	۱۵۸	۱۵۲	۰/۶	۱۰	۴	-	۸	۴۰ نمونه با ظرفیت باربری پائین
P-2*	۳	۱۵۸	۱۵۲	۰/۶	۱۰	۴	-	۸	نمونه توخالی متناظر

1. Compound
2. Aston Bath

به منظور نصب نمونه‌ها در دستگاه از دو فک اتصال که بدین منظور طراحی و ساخته شده استفاده می‌شود. این دو فک شرایط اتصال بدون چرخش را در انتهای لوله‌های آکاردئونی ایجاد می‌کنند. فک‌ها در داخل گیره‌های دستگاه نصب شده و فلنج‌های دو انتهای نمونه با استفاده از هشت عدد پیچ پرمقاومت به این فک‌ها متصل شده و محکم می‌شود. در شکل (7) شکل فک ساخته شده و نحوه نصب نمونه‌ای میراگر در داخل دستگاه رول - امسلر نشان داده شده است.



شکل (7) فک ساخته شده و نمونه نصب شده در دستگاه رول - امسلر

به علت افزایش حجم آمیزه در دقایق اولیه مورد نیاز برای عمل آوری و به علت فشاری که آمیزه تولید می‌کند تمامی چین‌خوردگی‌های لوله جدار نازک آکاردئونی، به‌خوبی پر شده و از این نظر مشکل خاصی وجود نخواهد داشت.

5-2- پیکربندی و روش انجام آزمایشها

به منظور انجام آزمایش بر روی نمونه‌ها از دستگاه کشش و فشار دینامیکی رول امسلر¹ آزمایشگاه پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله استفاده شد. نصب میراگر در قاب سازه‌ای به‌گونه‌ای انجام می‌شود که لوله‌های جدار نازک آکاردئونی در طول فرایند بارگذاری جانبی قاب، نیروی محوری خالص بدون دوران در انتها را تحمل می‌کنند. به منظور رسیدن به چنین شرایطی در دو انتهای نمونه‌های آکاردئونی، دو فلنج با ابعاد $260 \times 260 \times 18$ میلی‌متر جوش داده شده است. در محل اتصال لوله آکاردئونی به فلنج‌ها، شیاری تعبیه شده که لبه‌های لوله داخل آن قرار گرفته و سپس جوشکاری آرگون شده است.

جدول 4 جزئیات الگوهای بارگذاری مورد استفاده در آزمون‌های آزمایشگاهی

شماره نمونه	نوع سیگنال	(تعداد سیکل در هر دامنه) دامنه حداکثر بر حسب میلی‌متر							فرکانس (هرتز)
		n=1	n=2	n=3	n=4	N=5	n=6	n=8	n=9
P-1	$A_n \sin(wt)$	2(2)	5(2)	10(3)	15(3)	20(3)	25(3)	30(3)	35(∞)
P-2	$A_n \sin(wt)$	50(10)	60(10)	70(10)	80(10)	90(∞)	-	-	-

1. Roell Amsler

مستهلك شده در فرایند بارگذاری، تا 5 درصد افزایش را برای میراگر پر شده نسبت به میراگر توخالی نشان می‌دهد. به علاوه همان‌گونه که انتظار داشتیم سختی محوری ارتجاعی میراگر توپر افزایشی در حدود 15 درصد برای نمونه توپر نسبت به نمونه توخالی داشته است.

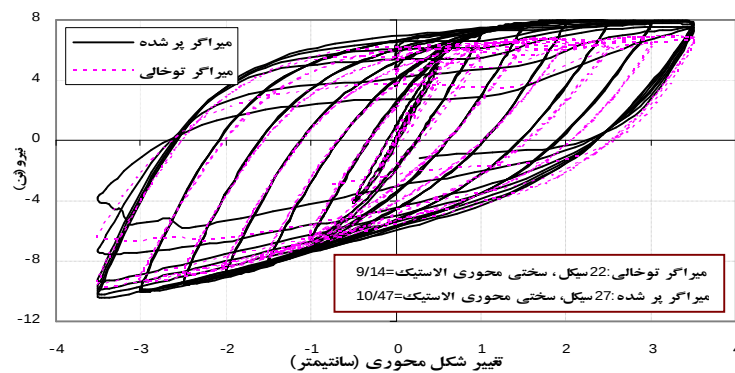
نمونه P-2 که مربوط به نمونه‌ای با ظرفیت باربری پائین است، در هر دو حالت توخالی و پر شده با فوم در حدود 70 چرخه کامل را در حالتی کاملاً پایدار و بدون شکست تحمل کرده است. مود تغییر شکل مربوط به نمونه توخالی کماتش آکاردئونی همراه با تمرکز تغییر شکل بوده در حالیکه برای نمونه پر شده، مود تغییر شکلی به شکل کماتش آکاردئونی بدون تمرکز تغییر شکل در چین‌خوردگیهای لوله آکاردئونی است. منحنی رفتاری پسماندی نمونه P-2 و نمونه میراگر توخالی متناظر برای دامنه‌های مختلف تغییر مکانی در شکل (9) آورده شده است. همان‌گونه که در شکل نیز دیده می‌شود منحنیهای پسماند به‌دست آمده برای این نمونه نسبت به نمونه توخالی، سطح بزرگتری دارد. سطح منحنی پسماند به عنوان میزان انرژی مستهلك شده در فرایند بارگذاری میراگر به‌شمار می‌رود. منحنیهای پسماند تشکیل شده حاصل از رفتار چرخه‌ای میراگر از پایداری خوبی برخوردار بوده و نشانه‌ای از کاهش مقاومت یا سختی در آنها دیده نمی‌شود و تنها در دامنه تغییر مکانی 9 سانتی-متری، چرخه‌ها دچار بی‌نظمی اندکی هستند که علت آن احتمالاً جدا شدگی فوم از سطح جداره همچنین ایجاد شکست در جداره آکاردئونی است. میزان انرژی مستهلك شده توسط میراگر، ظرفیت خمیری میراگر در حالت کشش و فشار و نسبت میرایی معادل مهمترین شاخصهای میراگر است که از روی نتایج آزمایشگاهی برای نمونه توپر و توخالی P-2 با استفاده از برنامه‌های نوشته شده در متلب استخراج و با یکدیگر مقایسه شده است.

با توجه به اینکه در آزمایشها، دو نمونه میراگر آکاردئونی پر شده با ظرفیتها و پارامترهای هندسی مختلف آزمایش شده لذا دو نمونه الگوی بارگذاری برای این آزمونها به صورت قراردادی بنحوی طراحی شده که هدف رفتار سنجی این قطعات مانند ظرفیت تغییر شکل‌پذیری و همچنین ظرفیت خستگی کم چرخه¹ به‌خوبی تأمین شود. بارگذاریهای اعمال شده به‌صورت دو الگوی سینوسی با دامنه‌های متغیر همراه با کنترل تغییر مکان² بوده که جزئیات آنها در جدول (4) آورده شده است.

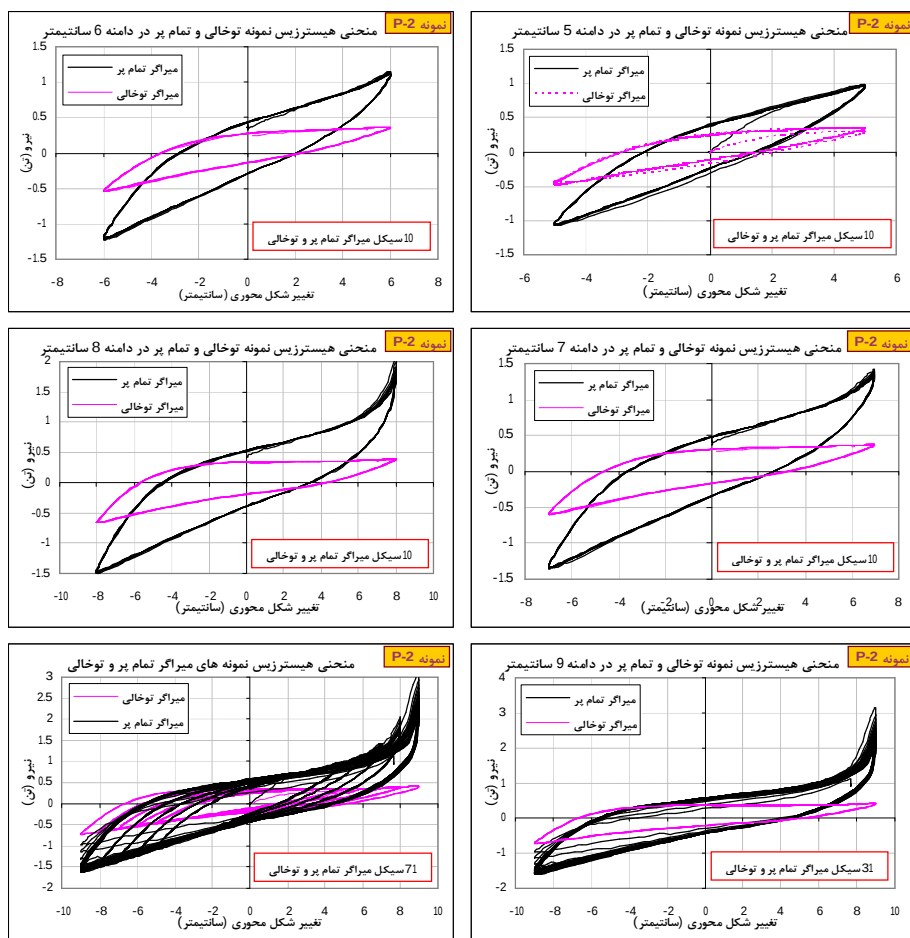
3-5- انجام آزمایشها و تحلیل نتایج

بارگذاریهای طراحی شده برای نمونه‌های پر و توخالی متناظر آنها اعمال شده است. P-1 مربوط به نمونه‌ای با ظرفیت باربری بالا است که، در حالت توخالی، تعداد 22 چرخه کامل با رفتار پایدار را تحمل کرده است. این در حالی است که در حالت پر شده با فوم پلیمری، تعداد چرخه قابل تحمل به 27 سیکل افزایش یافته است. مود تغییر شکلی مشاهده شده مربوط به نمونه توخالی از نوع کماتش آکاردئونی همراه با تمرکز تغییر شکل بوده که در چین‌خوردگیهای میانی آغاز شده و شکست میراگر نیز در همان نقطه رخ داده است. اما برای نمونه پر شده، مود تغییر شکل مشاهده شده از نوع آکاردئونی بدون تمرکز تغییر شکل بوده و در دامنه 35 میلی‌متری بروز مورد کماتش الماسی موجب شکست میراگر شده است. به نظر می‌رسد که تمرکز تنش ناشی از نقص هندسی ایجاد شده در فرایند ساخت لوله و همچنین جدایش فوم از جداره آکاردئونی در این امر تأثیرگذار بوده است. منحنی رفتاری پسماندی مربوط به نمونه P-1 پر شده با فوم با نمونه توخالی متناظر در شکل (8) با یکدیگر مقایسه شده است. سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان، معیاری از انرژی

1. Low-Cycle Fatigue
2. Displacement Control



شکل ۸ منحنی پسماند مربوط به نمونه P-1 پر شده با فوم در مقایسه با نمونه توخالی متناظر

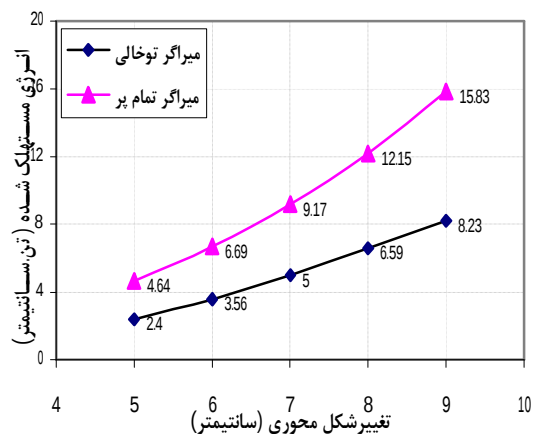


شکل 9 مقایسه منحنیهای پسماند نمونه P-2 و نمونه میراگر توخالی متناظر به صورت مجزا شده برای دامنه‌های مختلف تغییر شکل محوری

ظرفیت فشاری نمونه میراگر در حالت توخالی در دامنه‌های بزرگ تغییر مکان ثابت است، اما ظرفیت کششی این نمونه متناسب با دامنه تغییر مکان و به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. با اضافه شدن ماده پرکننده در داخل میراگر، ظرفیت کششی میراگر تقریباً شکل خطی (متناسب با دامنه تغییر مکانی) خود را حفظ کرده و فقط نمودار آن در جهت افزایش انتقال یافته است. اضافه شدن ماده پرکننده در داخل میراگر، افزایشی تا حدود 130 درصد در ظرفیت کششی میراگر را نشان می‌دهد. ظرفیت فشاری میراگر برای نمونه توخالی در دامنه‌های بزرگ، تقریباً ثابت است در حالیکه برای نمونه‌های پر شده، افزایش کاملاً محسوس متناسب با دامنه تغییر شکل بصورت تابع درجه دوم به‌نحوی است که در دامنه تغییر شکل (9) سانتیمتری، ظرفیت خمیری فشاری تا حدود 6 برابر افزایش یافته است. این افزایش شدید نشان دهنده بروز رفتار سخت شونده‌گی سیستم در دامنه‌های بالای فشردگی محوری است. در دامنه‌های بالای تغییر شکل در اثر فشردگی زیاد، فوم پرکننده به حداکثر تراکم رسیده و در نتیجه سخت شونده‌گی شدید در رفتار چرخه ای میراگر در حالت فشار دیده می‌شود. با مقایسه ظرفیت کششی و خمیری میراگر توخالی در دامنه‌های تغییر مکانی یکسان چنین برداشت می‌شود که میراگر رفتار متفاوتی را در کشش و فشار نشان داده است. در مورد نمونه پر شده تا قبل از بروز سخت شونده‌گی شدید بر اثر فشردگی سیستم در دامنه تغییر مکانی حدود 7 سانتی‌متر، میراگر رفتار تقریباً مشابهی را در کشش و فشار نشان داده است. به‌طور کلی تأثیر اندرکنش بین ماده پرکننده و جداره آکاردئونی بر افزایش ظرفیت میراگر نیز چشمگیر است. نسبت میرایی ویسکوز معادل¹ یکی دیگر از معیارها و

در شکل (10) تغییرات انرژی مستهلک شده توسط میراگر در دامنه‌های مختلف تغییر شکل محوری رفت و برگشت، برای نمونه P-2 و همچنین نمونه توخالی متناظر با یکدیگر مقایسه شده است. با افزایش دامنه تغییر شکل، سطح منحنی پسماند افزایش یافته و لذا میزان انرژی مستهلک شده نیز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل (10) نیز نشان داده شده پر شدگی میراگر با فوم انعطاف‌پذیر پلی‌اورتان افزایشی در حدود 100 درصد در میزان انرژی تلف شده را برای دامنه‌های مختلف به‌دنبال داشته است.

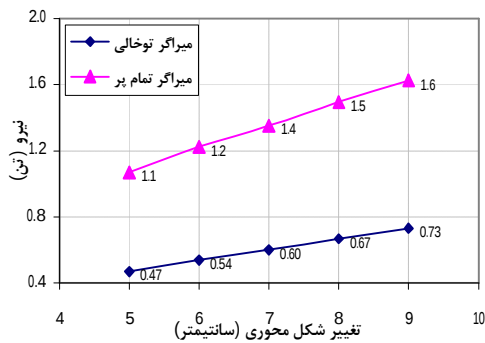
این افزایش چشمگیر در میزان انرژی مستهلک شده برای نمونه پر شده با فوم، تأثیر اندرکنش فوم و جداره لوله آکاردئونی، تأثیر فوم داخل میراگر در تغییر شکل منظم چین‌خوردگیهای لوله آکاردئونی و همچنین جلوگیری از تمرکز تغییر شکل در آنها و در نتیجه افزایش میزان مصالح شرکت کننده در فرایند تغییر شکل خمیری را نشان می‌دهد.



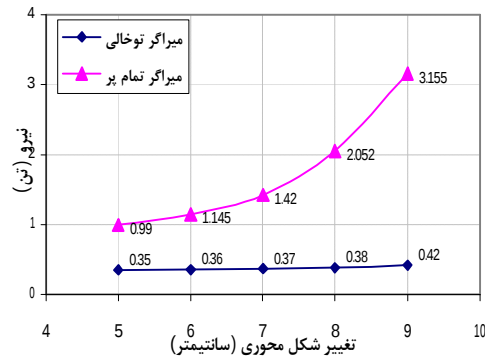
شکل 10 تغییرات انرژی مستهلک شده توسط میراگر برای نمونه P2 و نمونه توخالی متناظر

در شکل‌های (11) و (12) به ترتیب، ظرفیت خمیری میراگر توپر نمونه P-2 برای حالت کشش و فشار با ظرفیت خمیری کشش و فشار نمونه توخالی مقایسه شده است.

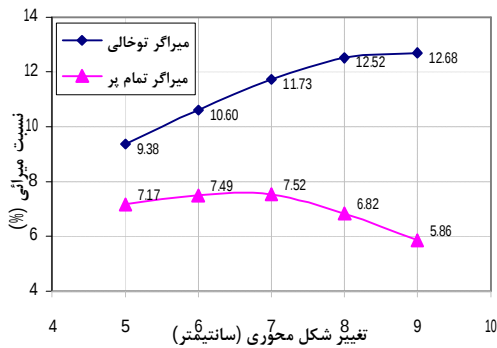
1. Equivalent Damping Ratio



شکل ۱۱ تغییرات ظرفیت خمیری کششی در نمونه P-2 و نمونه توخالی متناظر



شکل ۱۲ تغییرات ظرفیت خمیری فشاری در نمونه P-2 و نمونه توخالی متناظر



شکل ۱۳ تغییرات میرایی پسماندی معادل در نمونه P-2 و نمونه توخالی متناظر

شاخص‌های جذب انرژی میراگرها است. معمولاً در تحلیل‌های ارتجاعی، میرایی ایجاد شده توسط سیستم‌های پسماندار به وسیله میرایی ویسکوز معادل سازی می‌شود. اساس این روش معادل‌سازی سیستم فنر غیرارتجاعی برای تحریک‌های سینوسی، با سیستم فنر ارتجاعی میرا با همان تحریک پایه‌ای، فرکانس طبیعی و سطح انرژی است. نسبت میرایی ویسکوز معادل، از رابطه زیر محاسبه می‌شود. در رابطه E_h انرژی تلف شده در سیستم در هر چرخه، E_s انرژی کرنشی ارتجاعی و X میرایی پسماندی معادل است:

$$z = \frac{E_h}{4pE_s} \quad (1)$$

شکل (۱۳) میرایی پسماندی معادل نمونه P-2 و همچنین نمونه توخالی متناظر را در یک چرخه کامل به ازای دامنه‌های مختلف تغییر شکل نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود با وجود افزایش انرژی مستهلک شده در نمونه پر شده نسبت به نمونه توخالی متناظر، میرایی پسماندی معادل با اضافه شدن ماده پرکننده در این نمونه کاهش یافته و نرخ افزایش ظرفیت سیستم با افزایش دامنه تغییر شکل، بیشتر از نرخ افزایش انرژی مستهلک شده بوده است. در نمونه توخالی روند افزایشی نمودار میرایی با افزایش دامنه تغییر شکل حفظ شده و این در حالی است که در نمونه پر شده میرایی پسماندی معادل از حدود دامنه ۷ سانتی‌متری به بالا کاهش یافته و نمودار روند نزولی شدیدی یافته است که این روند نزولی ناشی از بروز سخت شوندگی شدید در سیستم است. لذا ماده پرکننده در این نمونه یا سختی آن برای افزایش نسبت میرایی فاقد کارایی مناسب بوده است.

6- نتایج

- مطالعات تحلیلی بر روی نمونه‌های جدار نازک آکاردئونی پر شده با فوم نشان داده است که استفاده از فوم پلی اورتان انعطاف‌پذیر - با توجه به خواص آن و میزان سختی قابل دسترس - تأثیر مخرب از نظر به هم ریختگی توزیع مناسب تنشهای وان میز در جداره میراگر پر شده ندارد و با اضافه شدن مواد پرکننده در داخل میراگر، وضعیت توسعه منظم مفاصل خمیری در نقاط قعر و اوج چین‌خوردگیهای آکاردئونی دچار بی‌نظمی نمی‌شود.
- بر اساس نتایج آزمایشگاهی، استفاده از ماده پرکننده متناسب از نظر نوع و میزان سختی ماده پرکننده در داخل میراگر، موجب کنترل مود کمانشی میراگر فلزی آکاردئونی تحت سازو کار تغییر شکل محوری و در نتیجه توزیع مناسب و تقریباً یکسان تغییرشکلهای محوری بین چین‌خوردگیهای آکاردئونی (جلوگیری از تمرکز تغییرشکلهای) بین آنها می‌شود که در نتیجه تعداد چرخه قابل تحمل توسط میراگرافزایش خواهد یافت.
- تأثیر استفاده از فوم پرکننده برای نمونه میراگر با ظرفیت باربری زیاد (P-1) با توجه به نمونه‌های فوم با سختیهای استفاده شده، در افزایش تعداد چرخه قابل تحمل توسط میراگر (قبل از شکست)، و برای نمونه با ظرفیت باربری کم (P-2) در افزایش میزان جذب انرژی میراگر و همچنین ظرفیت خمیری کشش و فشار میراگر بیشتر بوده است.
- اثر اندرکنش بین ماده پرکننده و جداره میراگر آکاردئونی بر افزایش ظرفیت جذب انرژی و همچنین ظرفیت خمیری کشش و فشار میراگر چشمگیر است. بر اساس نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی می‌توان مدل تحلیلی ارائه شده برای میراگر را اصلاح و در صورت

نیاز کالیبره کرده و با ارائه مدل تحلیلی میراگر، مطالعه پارامتری تأثیر پارامترهای مختلف هندسی لوله جدارنازک بر میراگر فلزی آکاردئونی پر شده را انجام داد.

7- منابع

- [1] Nagel Gregory.B.Eng., "Impact and Energy Absorption of Straight and Tapered Rectangular Tubes", Phd Thesis, Queensland University of Technology, Feb 2005
- [2] دانشی غلامحسین، حسینی پور سید جمال؛ «کاربرد لوله های جدار نازک در سیستمهای جذب انرژی ضربه»، مجله مهندسی متالوژی، دانشگاه صنعتی شریف، تابستان و پائیز 1380
- [3] Reid S.R., "Plastic Deformation Mechanisms in Axially Compressed Metal Tubes Used as Impact Energy Absorbers", International journal of Mechanical Science, Vol.35, No.12, 1993, PP. 1035-1052.
- [4] Alghamdi A.A.A. "Collapsible Impact Energy Absorbers : an Overview", Journal of Thin Walled Structures, Vol.39, 2001, PP. 189-213.
- [5] Yamazaki K., Han J., "Maximization of the Crushing Energy Absorption of Cylindrical Shells", Journal of Advances in Engineering Software, Vol.31, 2000, PP. 425- 434.
- [6] Daneshi G.H., Hosseinpour S.J., "Grooves Effect on Crashworthiness Characteristics of Thin-walled Tubes Under Axial Compression", journal of Material& Design, Vol.23, 2003, PP. 611-617.
- [7] Singace A.A., El-Sobky H. "Behaviour of Axially Crushed Corrugated Tubes", International Journal of Mechanical Science, Vol.39, No.3, 1997, PP. 249-268.
- [8] Motamedi M., N.Elahi F. "Using Accordion Thin-Walled Tube as a Hystertic Metallic

- [17] Singace A.A. "Collapse Behaviour of Plastic Tubes Filled With Wood Sawdust", Journal of Thin Walled Structures, Vol.37, 2000, PP. 163-187.
- [18] Meguid S.A. et all. "Finite Element Modeling of the Axial Collapse of Foam-Filled Structures", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.39, No.6, 2002, PP. 828-832.
- [19] Meguid S.A. et all. "On the Crush Behaviour of Ultralight Foam-Filled Structures", Journal of Material and Design, Vol.25, 2004, PP. 183-189.
- [20] Kavi Halit., Toksoy A. Kaan., Guden Mustafa. "Predicting Energy Absorption in a Foam-Filled Thin-Walled Aluminum Tube Based on Experimentally Determined Strengthening Coefficient", Journal of Material and Design, Vol.27, 2006, PP. 263-269.
- [21] Aktay L., Toksoy A.K., Guden M. "Quasi Static Axial Crushing of Extruded Polystyrene Foam-Filled Thin-Walled Aluminum Tubes: Experimental and Numerical Analysis", Journal of Material and Design, Vol.27, 2006, PP. 556-565.
- [22] Song Hong-Wei et all. "Partition energy Absorption of Axially Crushed Aluminum Foam-Filled Hat Sections", International Journal of solid and Structures, Vol.42, 2005, PP. 2575-2600.
- [23] Hibbitt Karlsson and Sorensen, Inc. 2006. "Getting Started with ABAQUS/Explicit & ABAQUS/Standard Version 6.5. Pawtucket", USA: HKS.
- Damper", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 2004, Paper No.2264
- [9] Motamedi M., N.Elahi F. "Experimental Study of Accordion Metallic Dampers", First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Sweetzerland, 3-8 September 2006, Paper No.38
- [۱۰] معتمدی مهرتاش، ناطقی الهی فریبرز، ضیائی فر منصور، کریمی محمد، «مطالعه استهلاک انرژی درلوله های جدار نازک آکاردئونی تحت نیروی محوری رفت و برگشتی»، مجله استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان، سال 25، شماره 1، شهریور 1385
- [11] معتمدی مهرتاش، «مطالعه تجربی کاربرد میراگر فلزی آکاردئونی در مقاوم سازی لرزه ای قابهای فولادی»، رساله دکتری تخصصی رشته مهندسی عمران - گرایش سازه و زلزله، تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات
- [12] Reid S.R., Reddy T.Y., Gray M.D. "Static and Dynamic Axial Crushing of Foam-Filled Sheet Metal Tubes", International Journal of Mechanical Science, Vol.28, No.5, 1986, PP. 295-322.
- [13] Reid S.R., Reddy T.Y. "Axial Crushing of Foam-Filled Tapered Sheet Metal Tubes", International Journal of Mechanical Science, Vol.28, No.10, 1986, PP. 643-656.
- [14] Reddy TY, Al-Hassani STS. "Axial Crushing of Wood-Filled Square Metal Tubes", International Journal of Mechanical Science, Vol.35, 1993, PP. 231-246.
- [15] Hanssen AG., Langseth M., Hopperstad OS. "Static crushing of Square Aluminum Extrusions With Aluminum Foam Filler", International Journal of Mechanical Science, 1998.
- [16] Santosa Sigit. et all, "Experimental and Numerical Studies of Foam-Filled Sections", International Journal of Impact Engineering, Vol.24, 2000, PP. 509-534.