

رفتار بهبودیافته‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی میراگر فلزی آکاردتونی تحت تأثیر افزایش لایه‌ها

فریبرز ناطقی‌الهی (استاد)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهدی تربت‌اصفهانی* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تفرش

مهندسی عمران تفرش، (پاییز ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۲۹-۱۹

در این مطالعه با هدف بهبود رفتار میراگر فلزی آکاردتونی به‌عنوان یکی از بارزترین میراگرهای فلزی جاری‌شونده در داخل کشور، تأثیر افزایش تعداد لایه‌های جداره‌ی این میراگر مورد مطالعه‌ی تحلیلی، آزمایشگاهی و پارامتریک قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های تک لایه و دو لایه انجام شده و مدل‌های تحلیلی تک لایه، دو لایه و سه لایه‌ی میراگر توسعه یافته و با استفاده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. همچنین تأثیر تغییر پارامترهای مهم هندسی جداره‌ی میراگر در رفتار استهلاکی آن بررسی و مدل ایده‌آل هندسی ارائه شده است. به‌علاوه مطالعه‌ی تحلیلی، به جهت شناسایی میزان تأثیر چند لایه‌شدن میراگر در قابلیت تحمل تعداد سیکل‌های بارگذاری انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌های میراگر به دلیل ایجاد پایداری بیشتر رفتاری، اصلاح مودهای کماتشی تغییرشکل و همچنین تأثیرات مطلوب اندرکنش بین لایه‌ها، تأثیر بسزایی در مشخصات رفتاری میراگر و افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری قابل تحمل آن دارد.

واژگان کلیدی: استهلاک انرژی، مطالعات آزمایشگاهی، روش اجزاء محدود، میراگر فلزی آکاردتونی چند لایه، مطالعات پارامتریک، خستگی کم‌چرخه.

nateghi@iiees.ac.ir
mehdi.torbat@yahoo.com

۱. مقدمه

طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله‌های بزرگ بر این اساس است که سازه بتواند با شکل‌پذیری خود انرژی زلزله را جذب و مستهلک کند. در سال‌های اخیر به‌توسعه‌ی وسایل مؤثر در استهلاک انرژی لرزه‌ی القاشده در سازه اهمیت بیشتری داده شده است. این وسایل با ایجاد تغییرشکل غیرکشسان در مواد، شکل‌پذیری مورد نیاز سازه را تأمین کرده است و پاسخ سازه را در ناحیه‌ی کشسان نگه می‌دارد. در حقیقت وسایل استهلاک انرژی قسمتی از ورودی انرژی زلزله به سازه را جذب و با مکانیسم تغییرشکل‌های غیرکشسان این انرژی را مستهلک می‌کنند. بر اساس طبیعت استهلاک انرژی زلزله، سیستم‌های کنترل سازه به ۳ دسته‌ی: کنترل فعال، غیر فعال و نیمه فعال تقسیم می‌شوند. مفهوم کنترل غیر فعال عبارت از اضافه‌کردن وسایل استهلاک انرژی و یا جداسازهای لرزه‌ی پایه به سازه است. وسایل استهلاک انرژی به آسانی می‌توانند اگر خسارت جدی به آن‌ها وارد شد، جایگزین و تعویض شوند. استفاده از این وسایل یکی از اقتصادی‌ترین و مؤثرترین راه‌های کاهش اثرات زلزله روی ساختمان‌هاست. از میان وسایل استهلاک انرژی، میراگرهای فلزی به دلیل عدم نیاز به تکنولوژی پیچیده جهت ساخت، علمی‌تر بودن کاربرد آن‌ها در سازه،

رفتار پایدار در برابر زلزله و دخیل نبودن عوامل محیطی (درجه حرارت، رطوبت و...)، در رفتار مکانیکی آن‌ها اهمیت خاصی دارند. این میراگرها از خاصیت رفتار هیسترتیک فلزات به هنگام تغییرشکل در ناحیه‌ی خمیری استفاده می‌کنند و باعث افزایش انرژی پسماند و لختی سیستم سازه‌ی می‌شوند. این میراگرها از نوع هیسترتیک هستند، که انرژی جذب‌شده در آن‌ها به‌صورت انرژی هیسترتیک است. نیروی پدیدآمده در این نوع میراگر از سرعت و بسامد لرزه‌ی مستقل است و مستهلک‌شدن انرژی در آن به واسطه‌ی تغییرشکل مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن است. طی چند سال گذشته، لوله‌های جدار نازک به‌عنوان قطعات جاذب انرژی ضربه مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به مطالعات صورت گرفته در سال ۱۹۹۳، لوله‌های جدار نازک پس از تحمل بارگذاری محوری با سه الگوی الماسی، اولری و آکاردتونی کماتش می‌کنند.^[۱] در این بین الگوی کماتش آکاردتونی جذب انرژی بالاتری دارد. به‌علاوه مطالعاتی در سال ۲۰۰۰ به روش اجزاء محدود بر روی لوله‌های جدار نازک آلومینیومی تحت بارگذاری محوری انجام شده است.^[۲] این مطالعات نشان داده است که مود کماتش آکاردتونی در مقایسه با دو مود کماتشی دیگر، جذب انرژی بالاتری دارد. مطالعاتی نیز در سال ۱۹۹۷ بر روی لوله‌های جدار نازک موج‌دار تحت بارگذاری ضربه انجام شده است.^[۳] همچنین در مطالعه‌ی در سال ۲۰۰۳ نشان داده شده است که به دو روش شیارزنی و ایجاد موج در جداره می‌توان کماتش آکاردتونی را به‌عنوان

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۳/۶، اصلاحیه ۱۳۹۲/۸/۲۷، پذیرش ۱۳۹۲/۱۰/۲۱.

مود غالب در بارگذاری محوری ایجاد کرد.^[۴] در سال‌های گذشته ایده‌ی تحریک مود کماتش آکاردتونی لوله‌های جدار نازک تحت بارگذاری محوری رفت و برگشتی مانند بارگذاری لوله‌ی توسط مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی صورت گرفته در سال ۲۰۰۴ به اثبات رسیده است.^[۵] این میراگر در سازه‌های فلزی با بادبند چورن و در محل اتصال بادبند و تیر نصب می‌شود و تحت بارگذاری رفت و برگشتی ناشی از زلزله با توجه به موج دار بودن جداره و در پی آن حاکم شدن کماتش آکاردتونی جذب انرژی بسیار مناسبی دارد.

با هدف بهبود رفتار میراگر فلزی آکاردتونی و جلوگیری از ایجاد مود کماتشی الماسی و افزایش قابلیت تحمل تعداد سیکل‌های بیشتر بارگذاری، تأثیر مثبت استفاده از مصالح پرکننده‌ی شکل پذیر و به ویژه فوم‌های پلی اورتان روی مشخصات اصلی میراگر از طریق مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی در سال ۲۰۱۰ به اثبات رسیده است.^[۶] با توجه به ارزیابی‌های انجام شده، استفاده از فوم پلی اورتان با سختی و الگوی پرکنندگی مناسب، راهی مناسب برای افزایش مقاومت در مقابل خستگی است. استفاده از فوم مناسب از لحاظ سختی موجب توزیع یکنواخت تنش‌ها در جداره‌ی میراگر می‌شود و از تمرکز تنش جلوگیری می‌کند.^[۶]

در این مطالعه با هدف بهبود مشخصات رفتاری میراگر فلزی آکاردتونی، تأثیر افزایش تعداد لایه‌های میراگر توسط مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی با انجام آزمون‌هایی روی نمونه‌های تک لایه و دو لایه انجام شده است. همچنین مطالعات تحلیلی بر پایه‌ی روش اجزاء محدود توسط آنالیز دینامیکی غیرخطی و صحت‌سنجی نتایج آن نیز توسط نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته است. مدل‌های تک لایه و دو لایه با صحت‌سنجی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی موجود توسعه یافته و تأثیر به‌سزای افزایش تعداد لایه‌ها با بررسی مشخصات رفتاری میراگر مانند: میزان جذب انرژی، ظرفیت باربری و میرایی لرح معادل تحت بارگذاری محوری رفتار برگشتی به اثبات رسیده است. در ادامه، مطالعات پارامتریک به منظور شناسایی عملکرد رفتاری میراگر فلزی آکاردتونی چند لایه و ارزیابی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف مانند: ضخامت لایه‌ها، شعاع لوله، طول لوله و شعاع پلیسه‌های موج آکاردتونی جداره در شاخصه‌ی مهم جذب انرژی انجام و مدلی بهینه با بیشترین میزان جذب انرژی و مشخصات هندسی مشخص ارائه شده است. در انتها میزان تحمل میراگر در مقابل تعداد سیکل‌های مختلف بارگذاری و اصطلاحاً پدیده‌ی خستگی کم‌چرخه به منزله‌ی یک پارامتر تأثیرگذار در تعداد سیکل‌های بارگذاری قابل تحمل توسط میراگر فلزی آکاردتونی، از دیگر شاخصه‌هایی است که در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. به این منظور مدل‌های تحلیلی به جهت شناسایی وقوع شکست در نمونه‌های مختلف تک لایه و دو لایه با نگرش بر مکانیک آسیب و محاسبه‌ی شاخص آسیب در یک مدل منطقی مانند مدل جانسون - کوک توسعه یافته و تأثیر افزایش تعداد لایه‌ها در تعداد سیکل‌های قابل تحمل یا همان تغییر در میزان شاخص آسیب در جداره‌ی میراگر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌های تک‌لایه و دو لایه

آزمون‌های آزمایشگاهی توسط معتمدی و ناطقی الهی بر روی نمونه‌های تک لایه و دو لایه‌ی میراگر فلزی آکاردتونی انجام شده است. به این منظور از دستگاه رول - اسلار با قابلیت اعمال نیروی کششی و فشاری دینامیکی تا بیشینه‌ی ۵۰ تن و استاتیکی تا بیشینه‌ی ۶۰ تن استفاده شده است. این دستگاه قابلیت اعمال تغییر مکان تا ۳۰

سانتی‌متر را دارد. همچنین این دستگاه دو فک دارد، که فک بالایی متحرک و فک پایینی دستگاه ثابت است. به منظور ایجاد شرایطی برای اعمال نیروی محوری خالص و بدون دوران از دو فلج برای اتصال دو لایه‌ی میراگر استفاده شده است. به طوری که لایه‌ی بالایی و پایینی میراگر داخل شیار تعبیه شده روی این دو فلج قرار گرفته‌اند و کاملاً جوش می‌شوند. این نوع اتصال شرایط اعمال نیروی محوری یکنواخت در لایه‌ی بالایی میراگر بدون هیچ‌گونه دوران و چرخش را ایجاد می‌کند.

نمونه‌های آزمایشگاهی با فولاد ضدزنگ A304 با مشخصات هندسی مطابق جدول ۱ در دمای معمول آزمایشگاه ساخته شده‌اند. نمونه‌ی AD.۱ تک لایه و نمونه‌ی AD.۲ با مشخصات هندسی یکسان با AD.۱ و فقط دو لایه‌ی کاملاً چسبیده به هم ساخته شده‌اند. در جدول مذکور، D نشان‌دهنده‌ی قطر لوله‌ها، L طول لوله‌ها، t ضخامت لایه‌ها، r شعاع موج جداره‌های عمق چین‌خوردگی و g طول موج جداره هستند. انتهای نمونه‌ها به منظور تأمین بارگذاری خالص محوری و بدون پیچش در شیار فلج‌های متصل‌کننده به فک‌های ثابت و متحرک دستگاه قرار گرفته و جوش شده‌اند. در این آزمایش فک پایینی دستگاه ثابت و به لایه‌ی بالایی نمونه اعمال شده است. ماهیت این نیرو یک نیروی محوری رفت و برگشتی است و در سیکل‌های مختلف با دامنه‌های متفاوت و با بسامد ۰/۱ به نمونه وارد می‌شود. در شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب نمونه‌ی میراگر قرار گرفته در دستگاه آماده‌ی بارگذاری و نمونه‌ی ساخته شده‌ی تک لایه و دو لایه نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب مشخصات هندسی جداره و مکانیسم جذب انرژی میراگر فلزی آکاردتونی تحت رژیم بارگذاری محوری نشان داده شده است. کلیه‌ی نمونه‌ها تحت رژیم بارگذاری نشان‌داده در شکل ۵ با بسامد ۰/۱ هرگز قرار گرفته‌اند.^[۶]

بارگذاری ذکر شده تحت کنترل تغییر مکان است و به هر دو نمونه‌ی تک لایه و دو لایه اعمال می‌شود. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که نمونه‌ی تک لایه پس از گذراندن ۳۱ سیکل از بارگذاری ذکر شده و در دامنه‌ی ۳/۵ سانتی‌متری دچار گسیختگی می‌شود، ولی نمونه‌ی دو لایه پس از گذراندن ۵۵ سیکل و همان دامنه‌ی ۳/۵ سانتی‌متری گسیخته می‌شود.^[۶]

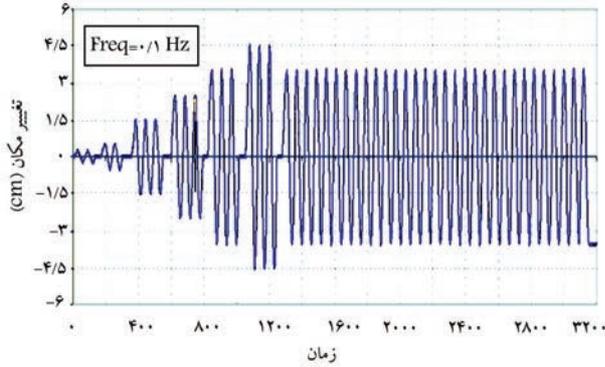
در هر دو نمونه‌ی تک لایه و دو لایه شکست در پلیسه‌ی هفتم از بالا یعنی نقطه‌ی که از ابتدا تمرکز تنش در آن آغاز شده بود، رخ داده است. در حین آزمایش



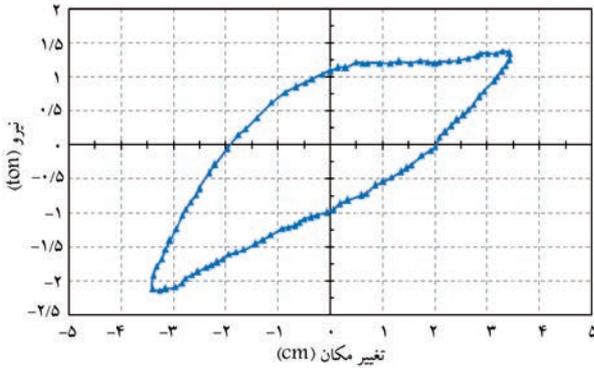
شکل ۱. نمونه‌ی میراگر فلزی آکاردتونی قرار گرفته در دستگاه آماده‌ی بارگذاری.

جدول ۱. مشخصات هندسی جداره‌ی میراگر فلزی آکاردئونی.

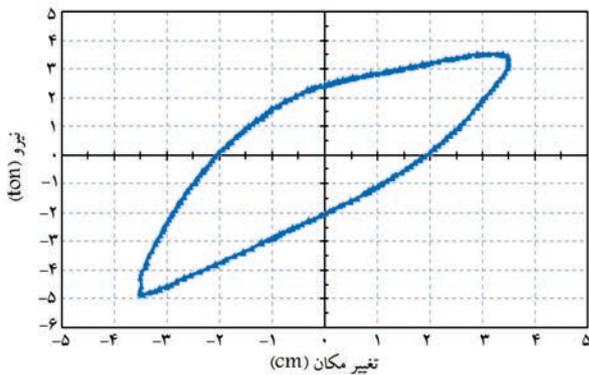
نان تست	تعداد لایه‌ها	D (mm)	L (mm)	T (mm)	r (mm)	N	S (mm)	g (mm)
AD.۱	۱	۲۰۰	۲۲۴	۱	۷	۸	۱۶	۲۸
AD.۲	۲	۲۰۰	۲۲۴	۱	۷	۸	۱۶	۲۸



شکل ۵. رژیم بارگذاری اعمال شده بر نمونه‌های آزمایشگاهی.



شکل ۶. منحنی هیستریزیس نمونه تک‌لایه‌ی آزمایشگاهی.



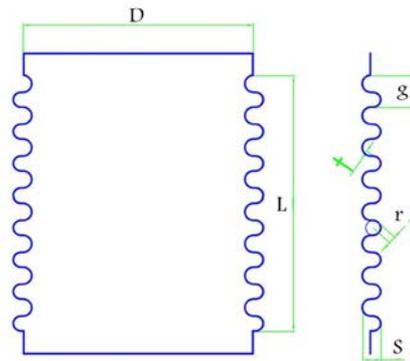
شکل ۷. منحنی هیستریزیس نمونه دولایه‌ی آزمایشگاهی.

نمونه‌ی دو لایه در حین فرآیند جمع‌شدگی پلیسه‌ها، تمرکز تغییرشکل از پلیسه‌های بالایی آغاز شده و در تغییرشکل‌های فشاری بیشینه، تقریباً تمامی پلیسه‌ها با یکدیگر برخورد داشته‌اند. به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ منحنی هیستریزیس حاصل آزمون آزمایشگاهی نمونه‌های تک لایه و دو لایه نشان داده شده است.

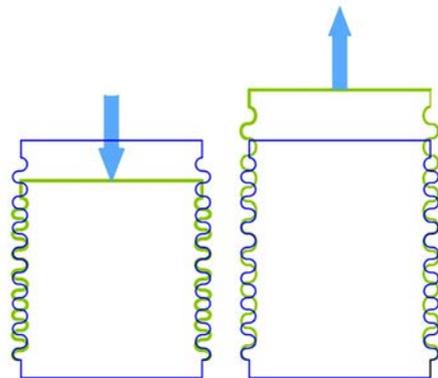
شکل ۸، افزایش سختی کشسان محوری در اثر دولایه‌شدن لوله‌ی آکاردئونی را



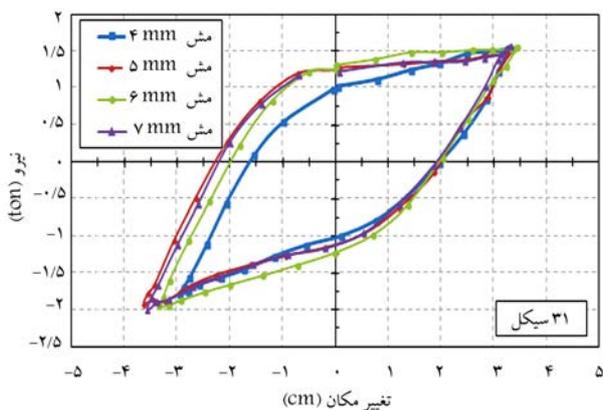
شکل ۲. نمونه‌ی ساخته‌شده میراگر فلزی آکاردئونی.



شکل ۳. مشخصات هندسی جداره‌ی میراگر فلزی آکاردئونی.



شکل ۴. مکانیسم تغییرشکل میراگر فلزی آکاردئونی تحت بارگذاری محوری.

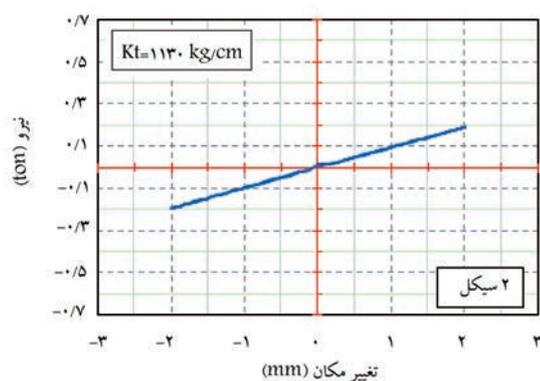


شکل ۹. منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌ی تک لایه با اندازه‌ی مش‌های متفاوت.

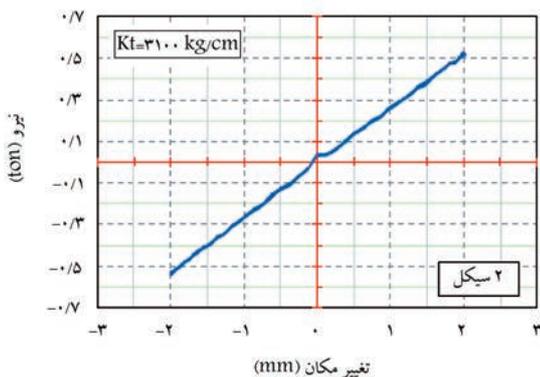
مقادیر پارامترهای ذکرشده در نمونه‌ی آزمایشگاهی تک لایه مدل‌سازی شده است. مشخصات فنی فولاد زنگ‌نزن $A304$ به‌عنوان فولاد مصرفی جداره‌ی میراگر بر اساس استاندارد API و مطابق با اطلاعات جدول ۲ در نظر گرفته شده است. بارگذاری نمونه نیز دقیقاً مطابق با رژیم بارگذاری ذکرشده برای مطالعات آزمایشگاهی به لایه‌ی بالایی میراگر اعمال شده و لایه‌ی تحتانی کاملاً صلب در نظر گرفته شده است. این تذکر لازم است که برای نمونه‌ی تک لایه، ۳۵ سیکل از این بارگذاری به نمونه اعمال شده است تا شرایط مدل تحلیلی و مدل آزمایشگاهی به منظور مقایسه‌ی منطقی بین نتایج این دو مدل فراهم شود. به منظور توسعه‌ی مدل اجزاء محدود لوله‌های جدار نازک از المان‌های پوسته‌ی غیر خطی ۴ گره‌ی و شیوه‌ی انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده شده است. در مدل تک لایه، آزمون هم‌گرایی مش برای رسیدن به بهترین اندازه‌ی المان‌های پوسته‌ی و دانستن پاسخ‌های منطقی و پایدار انجام شده است. به این منظور با اندازه‌های مختلف مش، مدلی با یک اندازه‌ی مشخص مش، مقایسه‌ی نتایج حاصل از هر مدل با توجه به کم‌بودن ضخامت جداره‌ی رفتار غیر خطی مدل، خاصیت تراکم‌پذیر بودن فولاد و تحت خمش‌بودن جداره که جوابی منطقی و مطابق با نتیجه‌ی آزمایشگاهی دارد و بعد از کوچک‌تر کردن اندازه‌ی مش آن تغییر معمولی در نتایج رخ ندهد، به‌عنوان مدل تهیه انتخاب شده است. با توجه به منحنی‌های هیستریزیس ارائه‌شده در شکل ۹ مربوط به مدل‌های مختلف، مدل با اندازه‌ی مش ۵ میلی‌متر به‌عنوان مدل انتخاب شده است.

با توجه به وجود رابطه‌ی غیر خطی تنش - کرنش مصالح، تأثیرگذار بودن تغییرشکل‌ها به پاسخ‌های سازه‌ی، بارگذاری رفتار برگشتی نمونه، وجود اصطکاک شدید غیر خطی بین لایه‌ها به‌عنوان یک نیروی بازدارنده از تحلیل دینامیکی و با در نظر گرفتن بارگذاری سریع رفتار برگشتی از روش حل صریح به‌عنوان تحلیل‌گر مدل استفاده شده است. از تحلیل دینامیکی به‌عنوان تحلیل‌گر مدل و با در نظر گرفتن بارگذاری سریع رفت و برگشتی از روش حل صریح به‌عنوان روش حل استفاده شده است. قدرت روش اجزاء محدود برای شبیه‌سازی تنش‌های حاصل از بارهای رفت و برگشتی نیز یک تحلیل منطقی دینامیکی را برآورده ساخته و اطلاعات زیادی از جمله تغییرات زمانی پارامترهایی همچون: شتاب، سرعت، تنش و ویژگی‌های مصالح را فراهم کرده است.^[۱۰]

برای مدل‌سازی برخورد و لغزش لایه‌ها بر یکدیگر از حالت اصطکاک مماسی ایزوتروپیک با در نظر گرفتن لغزش بین لایه‌ها و بدون وجود هیچ‌گونه استهلاک و خوردگی بین لایه‌ها استفاده شده است. تعریف اصطکاک مماسی ایزوتروپیک بین



الف) نمونه‌ی تک لایه؛



ب) نمونه دو لایه‌ی آزمایشگاهی.

شکل ۸. سختی کشسان محوری.

نشان می‌دهد. سختی محوری در لوله‌ی تک لایه مطابق شکل ۸الف، $1/13$ تن به سانتی‌متر است که در لوله‌ی دو لایه با توجه به شکل ۸ب، به بیش از دو برابر و $3/1$ تن به سانتی‌متر افزایش یافته است.^[۸] افزایش بیش از دو برابری سختی کشسان در نمونه‌ی دو لایه در مقایسه با نتیجه‌ی نمونه‌ی تک لایه می‌تواند به دلیل درگیری و اثر اندرکنش بین لایه‌ها باشد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که ظرفیت باربری در کشش و فشار لوله‌ی آکاردئونی در نمونه‌ی دو لایه نسبت به نمونه‌ی تک لایه به بیش از دو برابر افزایش یافته است.

۳. مطالعات تحلیلی

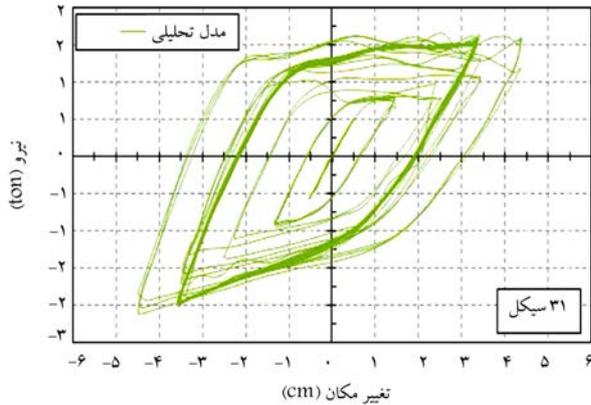
در این قسمت ابتدا مدل‌سازی نمونه‌ی تحلیلی بر پایه‌ی روش اجزاء محدود مطابق با مشخصات مکانیکی نمونه‌ی آزمایشگاهی توضیح داده شده است. سپس چگونگی صحت‌سنجی نمونه‌ی تحلیلی با آزمایشگاهی و نتیجه‌ی حاصل از این صحت‌سنجی ذکر شده است. در قسمت پایانی نیز صحت‌سنجی مدل‌های دو لایه با نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل‌شده از تحلیل مدل‌های دو لایه و سه لایه بیان شده است.

۱.۳. مدل‌سازی و صحت‌سنجی نمونه‌ی تک لایه

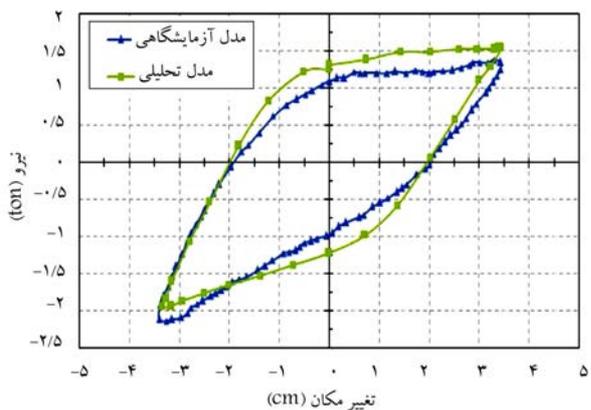
با توجه به مطالعات آزمایشگاهی صورت‌گرفته و لزوم انطباق مشخصات فنی نمونه‌ی تحلیلی با نمونه‌ی آزمایشگاهی، هندسه‌ی جداره‌ی آکاردئونی میراگر فولاد مصرفی، بارگذاری اعمال شده و شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌های تحلیلی مطابق با آنچه در نمونه‌های آزمایشگاهی وجود دارد، مدل‌سازی شده است. هندسه‌ی جداره با همان

جدول ۲. مشخصات فنی فولاد A۳۰۴ مصرفی برای مدل‌سازی مصالح.

عنوان مدل	مدول کشسانی (kg/cm ²)	تنش تسلیم (kg/cm ²)	تنش حد نهایی (kg/cm ²)	کرنش سخت‌شوندگی (%)	کرنش حد تسلیم (%)	کرنش شکست (%)
مدل تحلیلی	1.7×10^6	۱۹۵۰	۴۱۰۰	۲	۵۴	۶۰



شکل ۱۰. منحنی هیستریزس نمونه‌ی تک لایه‌ی تحلیلی بعد از سپری شدن ۳۱ سیکل بارگذاری.



شکل ۱۱. تطابق منحنی هیستریزس نمونه‌ی تک لایه‌ی تحلیلی و آزمایشگاهی در ۳۱ امین سیکل بارگذاری.

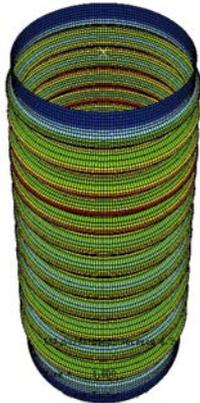
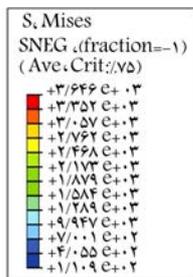
لایه‌ها وجود این امکان را فراهم می‌سازد تا با استفاده از یک معیار مشخص در این روش مطابق با تئوری اصطکاک بتوان از یک ضریب اصطکاک برای تبدیل نیروی عمل‌کننده عمودی بر سطوح به نیروی بازدارنده بین دو سطح، که اصطلاحاً همان نیروی اصطکاک است، استفاده کرد. در این مطالعه از روش تابع جریمه و ضریب ۰/۳ برای نشان دادن میزان لغزش لایه‌های میراگر بر یکدیگر استفاده شده است.

نهایتاً بعد از ساخت مدل اولیه مطابق با مشخصات آزمون آزمایشگاهی تحلیل و ارزیابی روی مدل اولیه صورت گرفته و با توجه به نوع آنالیزگر و ذات تقریبی بودن حل توسط روش اجزاء محدود، پس از حصول نتیجه از حل اول به بررسی منحنی هیستریزس حاصل آن پرداخته شده است. سپس به جهت حصول نتیجه‌ی واقع‌گرایانه و نزدیک به نتیجه‌ی آزمون آزمایشگاهی با تغییر در چند متغیر تأثیرگذار در تحلیل مدل مانند: نوع و اندازه‌ی المان مش، مشخصات فنی مصرفی، جزئیات بارگذاری، گام‌های زمانی حل رفتار نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. این تغییرات با در نظر گرفتن ماهیت اصلی فولاد و مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی و به جهت بهبود و نزدیک‌تر کردن مشخصات منحنی هیستریزس حاصل به منحنی هیستریزس نشان داده‌شده در شکل ۱۰ و مربوط به آزمون آزمایشگاهی مربوط انجام شده است. حلقه‌های هیستریزس نمونه‌ی نهایی تحلیلی هم‌پوشانی دو نتیجه‌ی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. از شکل ۱۱ مشخص است که هم‌پوشانی مطلوبی بین منحنی‌های هیستریزس مدل آزمایشگاهی و تحلیلی برقرار است. فقط ۱۱٪ افزایش جذب انرژی در نمونه‌ی تحلیلی نسبت به نمونه‌ی آزمایشگاهی وجود دارد.^[۱۱]

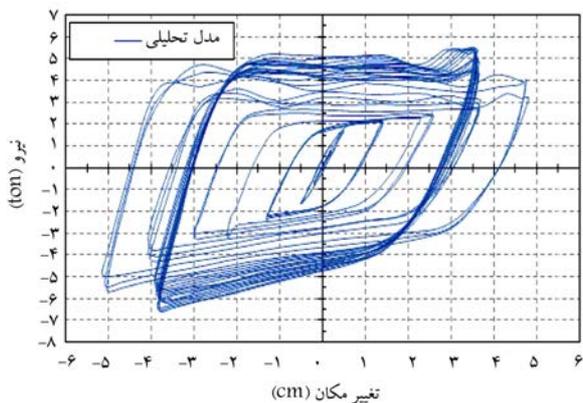
جذب انرژی در میراگر به واسطه‌ی داشتن تغییرشکل‌های خمیری و ورود به ناحیه‌ی خمیری یا استهلاك انرژی در نقاط قعر و اوج پلایه‌های موج آکاردتونی جداره است که خود بیانگر تمرکز در چند نقطه و ناحیه از جداره است. نواحی تسلیم‌شده به‌عنوان فیوزهای جذب انرژی، رکن اصلی در استهلاك انرژی میراگر را دارند و با اعمال نیروی بیشتر به میراگر به نواحی نزدیک خود گسترش می‌یابند. شکل ۱۲، نحوه‌ی توزیع تنش وان میز و بخش یکنواخت تنش در جداره‌ی میراگر و بحرانی بودن تنش نوک پلایه‌های موج‌های آکاردتونی را نشان می‌دهد.

۲.۳. مدل‌سازی و صحت نسبی مدل‌های دو لایه و سه لایه‌ی میراگر فلزی آکاردتونی

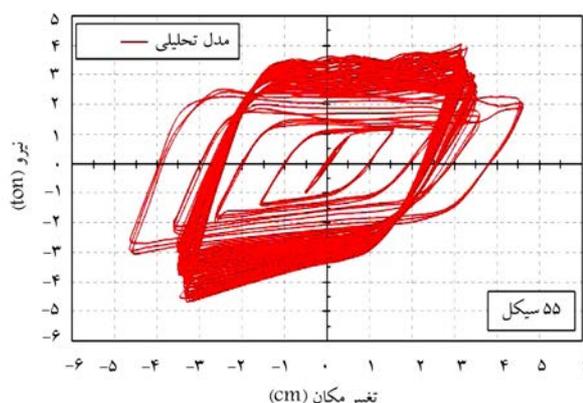
با توجه به مدل‌سازی نمونه‌ی تک لایه و صحت نسبی آن، مدل دو لایه دقیقاً مطابق نمونه‌ی تک لایه و فقط با دو جداره‌ی کاملاً مماس برهم مدل‌سازی شده است. بارگذاری نمونه‌ی دو لایه نیز با توجه به نتیجه‌ی آزمون آزمایشگاهی در ۵۵ سیکل به نمونه اعمال شده است. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، به ترتیب منحنی‌های هیستریزس حاصل از مدل تحلیلی بعد از سپری کردن این تعداد سیکل بارگذاری ذکر شده و هم‌پوشانی این منحنی با نتیجه‌ی حاصل از آزمون آزمایشگاهی AD.۲ نشان داده شده است.



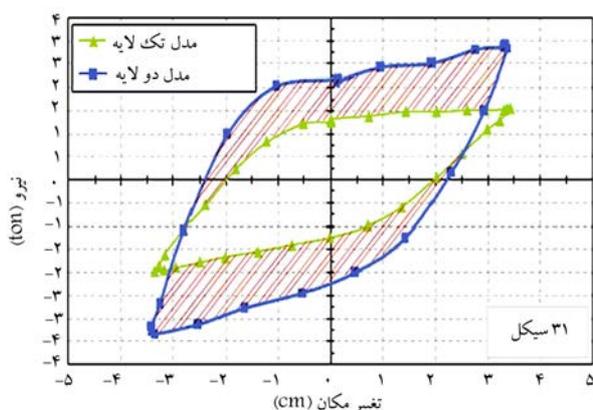
شکل ۱۲. توزیع تنش وان میز در سطح جداره‌ی میراگر فلزی آکاردتونی.^[۱۱]



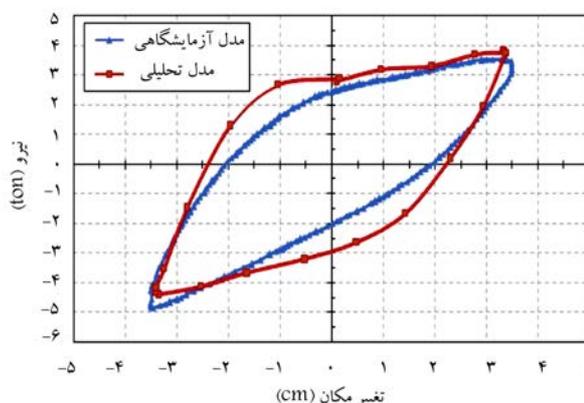
شکل ۱۵. منحنی هیستریزیس نمونه‌ی دو لایه‌ی تحلیلی بعد از سپری شدن ۵۵ سیکل بارگذاری.



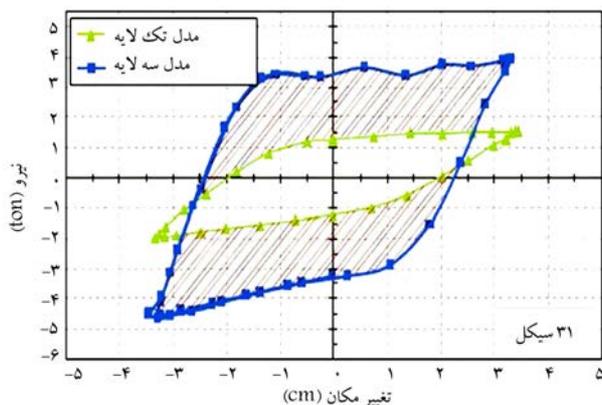
شکل ۱۳. منحنی هیستریزیس نمونه‌ی دو لایه‌ی تحلیلی بعد از سپری شدن ۵۵ سیکل بارگذاری.



شکل ۱۶. مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزیس مدل‌های تک لایه و دو لایه.



شکل ۱۴. تطابق منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های دو لایه‌ی تحلیلی و آزمایشگاهی در ۵۵ سیکل بارگذاری.



شکل ۱۷. مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزیس مدل‌های تک لایه و سه لایه.

تکمیل‌کننده‌ی هر لایه بر لایه‌ی دیگر و جلوگیری از رشد سریع تمرکز تنش در نقاط قعر و اوج پلیسه‌های موج آکاردتونی که خود باعث به تأخیر افتادن تسلیم شدن یک پلیسه و گسیختگی آن می‌شود، می‌تواند از عوامل تأثیرگذار باشد.

اما با توجه به نتایج حاصل از مدل تحلیلی این‌طور انتظار می‌رود که جذب انرژی در مدل‌های دو و سه لایه به دلیل ۲ و ۳ برابر شدن حجم مصالح شرکت‌کننده در عملیات استهلاك انرژی به ۲ و ۳ برابر نمونه‌ی تک لایه برسد. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، مقایسه‌ی

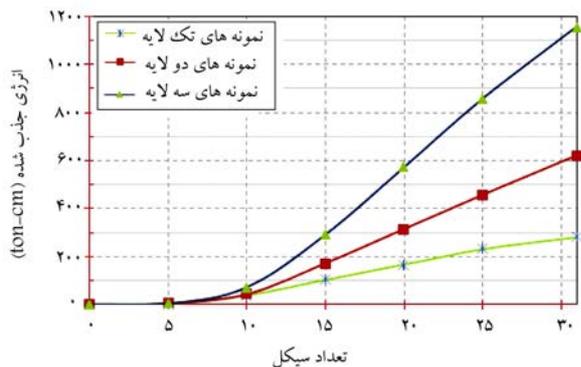
میزان نیروهای قابل تحمل کششی و فشاری بین نتیجه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی با مدل تحلیلی وجود دارد و فقط ۸٪ اختلاف بین میزان نیروی جذب‌شده‌ی نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد.

نمونه‌ی سه لایه نیز با افزایش یک لایه‌ی کاملاً چسبیده به دو لایه‌ی دیگر نمونه‌ی دو لایه ساخته می‌شود و پس از گذراندن ۵۵ سیکل بارگذاری دارای منحنی‌های هیستریزیس نشان داده‌شده در شکل ۱۵ است.

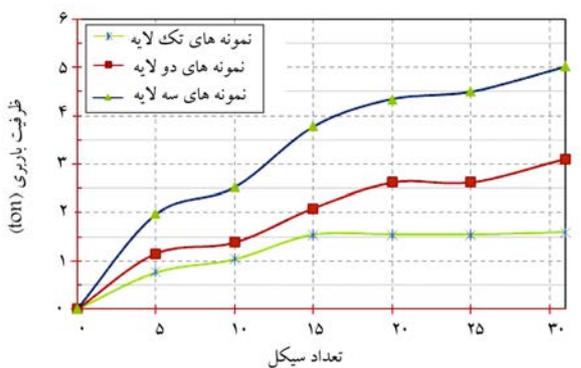
عدم وجود آزمون آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی و شناسایی میزان سیکل بارگذاری قاب تحمل میراگر و داشتن شرایط مشابه با نمونه‌ی دو لایه برای مقایسه و ارزیابی نتایج، دلیل بر اعمال این تعداد سیکل بارگذاری به نمونه‌ی سه لایه بوده است.^[۱۱]

۳.۳. ارزیابی میزان تأثیر افزایش لایه‌ها در بهبود رفتار میراگر فلزی آکاردتونی

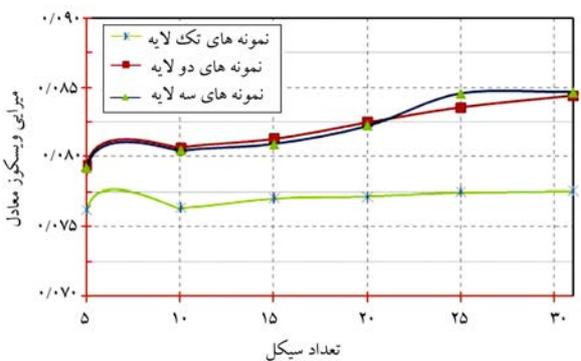
در این قسمت به بررسی تأثیر افزایش لایه‌ها در قابلیت تحمل تعداد سیکل‌های بارگذاری میراگر و مشخصات رفتاری مهم آن مانند: میزان جذب انرژی، ظرفیت باربری، و میرایی ویسکوز معادل پرداخته شده است. همان‌طور که در بخش مطالعات آزمایشگاهی بیان شده است، دو لایه کردن میراگر، تعداد سیکل‌های قابل تحمل آن را از ۳۱ سیکل به ۵۵ سیکل افزایش می‌دهد. این افزایش ۲۴ سیکلی می‌تواند ناشی از دو برابر شدن مفاصل خمیری باشد. همچنین اندرکنش بین لایه‌ها و تأثیر



شکل ۱۸. تغییر میزان جذب انرژی میراگر تک لایه، دو لایه و سه لایه در سیکل‌های مختلف بارگذاری.



شکل ۱۹. تغییر ظرفیت باریری میراگر تک لایه، دو لایه و سه لایه در سیکل‌های مختلف بارگذاری.



شکل ۲۰. تغییر میرایی ویسکوز معادل میراگر تک لایه، دو لایه و سه لایه در سیکل‌های مختلف بارگذاری.

۴. مطالعات پارامتریک میراگر فلزی آکاردتونی چند لایه

بعد از صحت‌سنجی و حصول نتایج منطقی مدل‌های تک لایه و دو لایه و تحلیلی با نمونه آزمون‌های انجام‌شده‌ی آزمایشگاهی با مشخصات هندسی ثابت به جهت داشتن مدلی بهینه از میراگر فلزی آکاردتونی چند لایه، شناسایی میزان تأثیر پارامترهای مختلف هندسی یک نیاز به نظر می‌رسد. با توجه به هندسه مدل پارامترهای ضخامت لایه، شعاع لوله، طول لوله و شعاع موج آکاردتونی جداره از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در هندسه و به دنبال آن عملکرد میراگر است.

بین منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های دو لایه و سه لایه با منحنی هیستریزس مدل تک لایه انجام شده است.

نواحی هاشورخورده، میزان افزایش جذب انرژی به دلیل افزایش تعداد لایه‌های میراگر را نشان می‌دهد. این مطلب نشان از اثر مطلوب اندرکنش بین لایه‌ها و چند برابر شدن مفاصل خمیری جداره‌ی میراگر است.

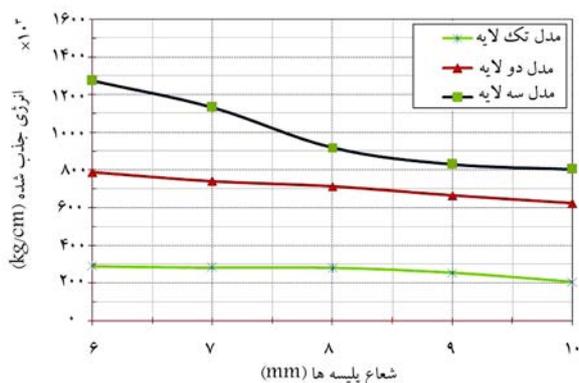
همچنین از شکل‌های ارائه‌شده می‌توان به تأثیر مطلوب افزایش لایه‌ها در ظرفیت باریری میراگر پی برد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد در اثر دو لایه و سه لایه شدن میراگر، ظرفیت باریری آن‌ها به ۱۲۱٪ و ۲۲۲٪ درجه افزایش یافته است. در حقیقت افزایش فراتر از انتظار ۲۱ و ۲۲ درصدی در میزان بیشینه نیروی قابل تحمل با افزایش لایه‌ها به وجود آمده است.

مطالب عنوان‌شده نشان می‌دهد افزایش تعداد لایه‌ها راهکاری مؤثر در تقویت رفتار استهلاکی میراگر فلزی آکاردتونی است. به منظور شناسایی مطلوب‌تر عملکرد میراگر فلزی آکاردتونی تک لایه، دو لایه و سه لایه به بررسی میزان جذب انرژی، ظرفیت باریری و میرایی ویسکوز معادل در طول اعمال سیکل‌های مختلف بارگذاری پرداخته شده است. منحنی‌های مربوط به هر سه مدل حاصل از مطالعات تحلیل در شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ ارائه شده است. آنچه از منحنی ارائه‌شده در شکل ۱۸ مشخص است، نمونه‌های دو لایه و سه لایه نسبت به نمونه‌ی تک لایه در سیکل‌های بالاتر جذب انرژی بیشتری از خود نشان می‌دهند. این امر می‌تواند به دلیل افزایش دامنه‌ی بارگذاری در سیکل‌های بالاتر باشد و چون میراگر با لایه‌های بیشتر در سیکل‌های با دامنه‌ی بالاتر جذب انرژی بیشتری از خود نشان می‌دهد، لذا افزایش رو به رشد بیشتر در مجموع جذب انرژی طی تحمل سیکل‌های مختلف بارگذاری را شاهد هستیم. افزایش سریع‌تر در میزان ظرفیت باریری در میراگرهای با لایه‌های بیشتر نیز می‌تواند به دلیل افزایش دامنه‌ی بارگذاری در سیکل‌های بالاتر و به دنبال آن افزایش بیشتر نیروی قابل تحمل باشد و در شکل ۲۰ به خوبی قابل استنتاج است.

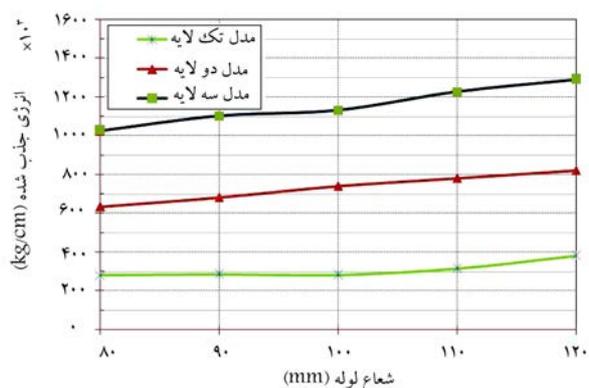
مشخصه‌ی میرایی ویسکوز معادل نسبت به مشخصه‌های دیگر در تعداد سیکل‌های بارگذاری روند یک‌نواخت‌تری دارد، اما افزایش در نمونه‌ی دو لایه نسبت به نمونه‌ی تک لایه مشاهده می‌شود.

اما نمونه‌های سه لایه و دو لایه تقریباً میرایی ویسکوز معادل مشابهی در طی روند بارگذاری دارند. در حقیقت پارامترهای انرژی تلف‌شده و کار انجام‌شده تأثیرهای مستقیم و معکوس دارند، اما به یک اندازه در مشخصه‌ی میرایی ویسکوز معادل هستند. به علت افزایش یکسان انرژی تلف‌شده و کار انجام‌شده طی یک بارگذاری رفت و برگشتی تغییر محسوسی در این پارامتر رخ نمی‌دهد. اما در نمونه‌ی دو لایه یک تعداد سیکل مشخص بارگذاری با توجه به وجود نیروی اصطکاک بین لایه‌ها و کاهش کار انجام‌شده در مقابل آن، افزایش میزان جذب انرژی تغییر محسوسی در این پارامتر مشاهده می‌شود. اما در نمونه‌ی سه لایه این روند کاهش کار و افزایش جذب انرژی مشابه نمونه‌ی دو لایه است و میرایی ویسکوز معادل نمونه‌های دو لایه و سه لایه نزدیک یکدیگرند. با توجه به نقش وجود یک میراگر در سازه، تأثیر مثبت افزایش لایه‌ها در قدرت جذب انرژی و میرایی آن قابل توجه است.

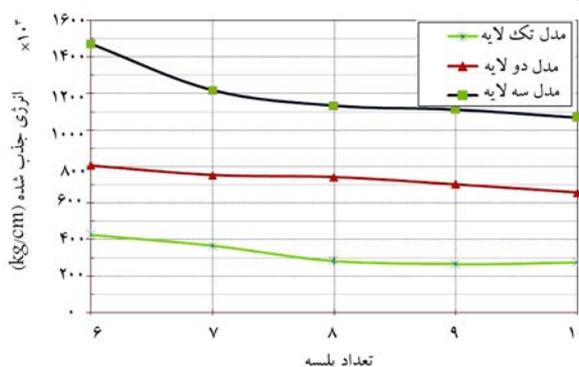
با توجه به ارزیابی انجام‌شده از تأثیر افزایش لایه‌های میراگر فلزی آکاردتونی در قدرت میرایی، جذب انرژی و تحمل تعداد سیکل بارگذاری لرزه‌ی می‌توان گفت اندرکنش بین لایه‌ها، افزایش مفاصل خمیری که رکن اصلی در میزان جذب انرژی دارند، افزایش حجم مصالح شرکت‌کننده در عملیات استهلاک انرژی باعث بهبود رفتار استهلاکی میراگر فلزی آکاردتونی خواهد شد.^[۱۷]



شکل ۲۲. تغییرات میزان جذب انرژی میراگر تک لایه، دو لایه و سه لایه با شعاع‌های مختلف پلیسه‌ی موج آکاردتونی.



شکل ۲۳. تغییرات میزان جذب انرژی میراگر تک لایه، دو لایه و سه لایه با شعاع‌های مختلف لوله‌ی آکاردتونی.



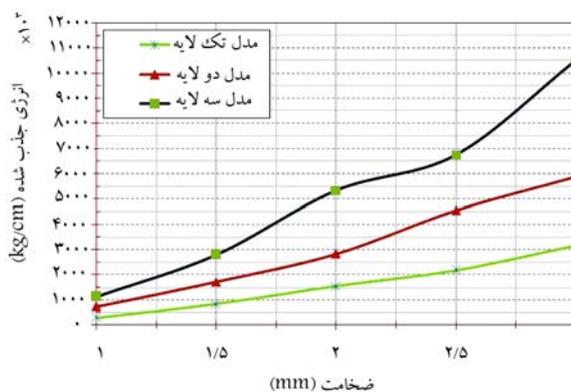
شکل ۲۴. تغییرات میزان جذب انرژی میراگر تک لایه، دو لایه و سه لایه با طول‌های مختلف لوله‌ی آکاردتونی.

با توجه به منحنی شکل ۲۴ (مربوط به پارامتر طول یا تعداد پلیمرهای موج آکاردتونی) مشخص است که با افزایش طول لوله مقدار کمی از میزان جذب انرژی میراگر کاسته شده است.

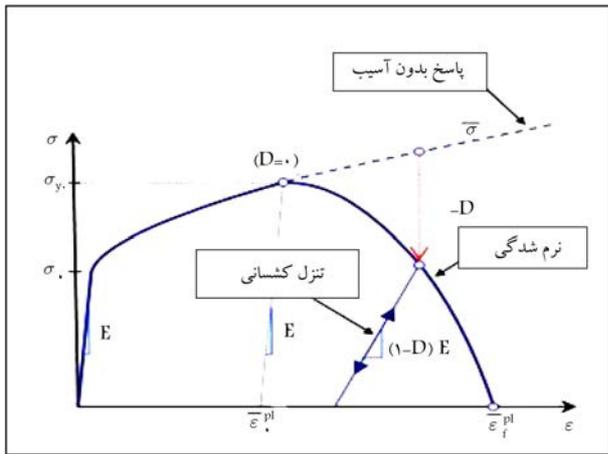
این تأثیر می‌تواند به علت کاسته‌شدن از سختی میراگر و افزایش شکل‌پذیری آن باشد. با کاسته‌شدن از سختی میراگر، ظرفیت باربری آن کاهش پیدا می‌کند و به همین دلیل از میزان جذب انرژی آن نیز کاسته می‌شود. از طرفی کاسته‌شدن از تعداد پلیسه‌ها و نیز کمتر شدن حجم مصالح شرکت‌کننده در عملیات، استهلاک انرژی را به دنبال دارد.

ارزیابی هم‌زمان عملکرد میراگر با در نظر گرفتن در پارامترهای هندسی و چند لایه‌کردن میراگر می‌تواند مدلی با نحوه‌ی استهلاک انرژی مطلوب و بهینه، پایدار در مقابل بارهای رفت و برگشتی، و قابل کاربرد در میزان ارتعاش‌های مختلف لرزه‌ی ارائه کند. به همین جهت با تغییر در یکی از پارامترهای ذکر شده و ثابت بودن تعبیر پارامترهای هندسی، رفتار استهلاکی میراگر در حالت‌های تک لایه، دو لایه و سه لایه بررسی شده است. به همین ترتیب در ابتدا با تغییر در پارامترهای ضخامت جداره، نحوه‌ی تغییر در میزان جذب انرژی به‌عنوان مهم‌ترین مشخصه‌ی استهلاکی ارزیابی شده است. با توجه به بارگذاری شبه استاتیکی با دامنه‌ی متغیر واضح است که افزایش ضخامت جداره از ۱ میلی‌متر تا ۳ میلی‌متر نیروی بیشتری جهت رسیدن به تغییر مکان ثابت ذکر شده نیاز دارد و افزایش میزان نیرو با یک تغییر مکان ثابت در دو حالت کشش و فشار افزایش در مساحت زیر منحنی نیرو - تغییر مکان و به همراه آن میزان انرژی مستهلاک‌شده‌ی میراگر را به دنبال دارد. بنابراین مطابق آنچه در شکل ۲۱ نشان داده شده است، با افزایش ضخامت به دو لایه، روند صعودی در میزان جذب انرژی در سه نمونه‌ی تک لایه، دو لایه و سه لایه مشاهده شده. هر چند با افزایش ضخامت لایه‌ها از تأثیر چند لایه‌شدن میراگر در جذب انرژی آن کاسته شد. دلیل این کاهش را می‌توان بدین صورت تعبیر کرد که با بالا رفتن ضخامت جداره، میزان تأثیر آن در نمونه‌های چند لایه از تأثیر اندر کششی بین لایه‌ها بیشتر است و تأثیر شگرف آن در ضخامت‌های بالا کاهش می‌یابد. افزایش شعاع پلیسه‌های موج آکاردتونی میراگر تحت بارگذاری محوری رفت و برگشتی از ۶ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر دور شدن میراگر از سوی کماتش آکاردتونی را به همراه دارد و مطابق شکل ۲۲، کاهش چشم‌گیری در میزان جذب انرژی به خصوص در نمونه‌های چند لایه مشاهده می‌شود. با افزایش در این پارامتر، مود کماتشی غالب به سمت مود اولری و سپس الماسی متمایل می‌شود و تأثیر موج‌دار کردن جداره که یکی از راهکارهای پیاده‌سازی کماتش آکاردتونی است، رفته رفته از بین می‌رود. اما تغییر در پارامتر شعاع لوله تأثیر افزایش‌دهنده‌ی کماتش در میزان جذب انرژی دارد.

شکل ۲۳، تأثیر افزایش‌دهنده‌ی یکسان در نمونه‌های مختلف تک لایه، دو لایه و سه لایه تحت افزایش شعاع لوله‌ی آکاردتونی را نشان می‌دهد. این طور می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شعاع لوله، حجم مصالح شرکت‌کننده در جذب انرژی به واسطه‌ی افزایش محیط لوله افزوده می‌شود و تمرکز به وجود آمده در نقاط قعر و اوج پلیسه، حجم بیشتری از مصالح را وارد مرحله‌ی خمیری و جذب انرژی می‌کند. به همین دلیل افزایش محسوس در میزان جذب انرژی کل مدل اتفاق می‌افتد.



شکل ۲۵. تغییرات میزان جذب انرژی میراگر تک لایه، دو لایه و سه لایه با ضخامت‌های مختلف جداره.



شکل ۲۶. منحنی رفتار کشسان - خمیری مواد و نحوه ی زوال شکست.

آسیب به عنوان معیار تحمل آسیب به جهت شناسایی بیشینه میزان آسیب و وقوع شکست به دوروش اصل تنش معادل و اصل کرنش معادل مطابق رابطه های ۱ و ۲ محاسبه می شود:

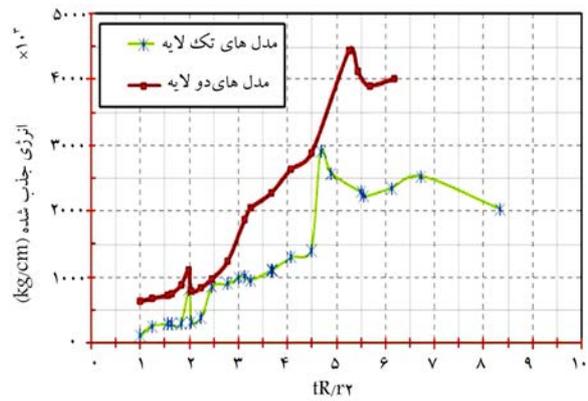
$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{1-D}} \quad \text{اصل تنش معادل} \quad (1)$$

$$\bar{E} = E(1-D) \quad \text{اصل کرنش معادل} \quad (2)$$

در شکل ۲۶، تصویری شماتیک از منحنی رفتار مواد کشسان - خمیری همراه با مفهوم مکانیک آسیب، پارامترها و ناحیه ی وقوع آن نشان داده شده است. اما مدل های مختلف آسیب بر پایه ی شکست نرم و به جهت شناسایی بیشینه کرنش قابل تحمل یا اصطلاحاً کرنش شکست و در نهایت محاسبه ی بیشینه میزان متغیر آسیب وجود دارد که در این بین مدل آسیب جانسون - کوک با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای مختلف به صورت تابع غیر وابسته در حوزه ی تنش سه محوری و نرخ کنش و دما فرمول بندی شده است. به دلیل روانی و سادگی فرمولاسیون، راحتی کالیبراسیون و بازه بزرگ دسترسی به ثابت های مقدار زیادی از فلزات و همچنین موجود بودن در نرم افزارهای اجزاء محدود در این مطالعه، از این روش برای شناسایی شکست استفاده شده است. در این مدل اثرات کرنش و حرارت با هم به طور مناسبی ترکیب شده اند. مدل جانسون - کوک به طور قابل ملاحظه یی در تغییر شکل با نرخ های بالا در ارتباط است و از این لحاظ برای مدل سازی پدیده های شکست به علت خستگی کم چرخه، مناسب است. پس از مدل سازی و اعمال ضرایب منطقی معیار آسیب جانسون - کوک در مدل تک لایه ی صحت سنجی شده ی میراگر فلزی آکاردئونی و تحلیل بر پایه ی روش اجزاء محدود، متغیر آسیب نمونه بعد از سپری کردن ۳۱ سیکل واگذاری به حدود عدد ۱ یا بیشینه ی آسیب رسیده است. در نمونه ی تک لایه در رأس پلیسه ی پنجم از بالاترین پلیسه شکست رخ داده است. این درست همان ناحیه یی است که تمرکز تنش از ابتدا در آن قرار داشت.

با دو لایه کردن میراگر متغیر آسیب از بیشینه ی مقدار خود در این المان در مدل تک لایه به ۲۰٪ مقدار اولیه در مدل دو لایه رسیده و کاهش ۸۰٪ در آسیب این المان مشاهده شده است. اما در نمونه ی دو لایه در لایه های اول و دوم در رأس پلیسه ی نهم از بالا بیشترین میزان آسیب رخ داده و عدد آسیب ۰/۸ برای لایه ی اول و ۰/۴۳۴ برای لایه ی دوم به دست آمده است.

منحنی تغییرات پارامتر آسیب در نمونه ی تک لایه و دو لایه در رأس پلیسه ی پنجم در شکل ۲۷ و تغییرات این پارامتر در نمونه ی دو لایه در لایه های اول و دوم



شکل ۲۷. جذب انرژی مدل های مختلف تک لایه و دو لایه تحت تأثیر پارامتر بی بعد tR/r^2 .

در اینجا نیاز به شناسایی تعداد پلیسه های بهینه، که مشخصات رفتاری مطلوب دارد، را پیش از پیش نشان می دهد. اما دانستن یک مدل ایده آل با مشخصات رفتاری مطلوب و جذب انرژی بهینه با ترکیبی از پارامترهای مختلف ضخامت جداره، شعاع پلیسه ی موج آکاردئونی حاصل خواهد شد. به همین جهت بعد از امتحان کردن نسبت ها به بعدهای مختلف، نسبت بی بعد tR/r^2 به عنوان یک پارامتر قابل تغییر و برداشت علمی در مقابل انرژی مستهلک شده ی شعاع لوله و طول لوله برای مدل های تک لایه و دو لایه مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت لایه و شعاع لوله تأثیر افزایشی و شعاع پلیسه ها تأثیر کاهنده دارد، لذا این سه پارامتر در صورت و مخرج کسر قرار داده شده اند. همان طور که از منحنی های شکل ۲۵ مشخص است، نمونه ی تک لایه با مقدار ۴/۷ و نمونه ی دو لایه با مقدار ۵/۶۵ به بیشینه ی میزان جذب انرژی رسیده اند. بنابراین می توان گفت برای پارامتر بی بعد ذکر شده، رسیدن به عددی نزدیک به ۵ برای نمونه ی تک لایه و دو لایه با جداره ی U شکل، که به بیشترین میزان جذب انرژی رسیده اند، مدلی ایده آل تلقی می شود.

۵. مطالعه ی تأثیر خستگی بر پایه ی مکانیک آسیب در رفتار میراگر فلزی آکاردئونی

با توجه به هدف بهبود رفتار استهلاکی میراگر فلزی آکاردئونی تحت تأثیر افزایش لایه ها، یکی از مهم ترین جنبه های بهبود رفتار می تواند افزایش مقاومت میراگر در مقابل شکست تحت تحمل سیکل های بارگذاری رفت و برگشتی باشد. شکست در مصالح به دلیل وجود ناپوستگی و پس از به وجود آمدن تمرکز تنش و بالا رفتن نرخ شکست رخ می دهد و به دو نوع شکست ترد و شکل پذیر تقسیم می شود، که به ترتیب مربوط به مصالح با شکل پذیری کم و مصالح با شکل پذیری زیاد است. مصالح شکل پذیر تحت بارگذاری رفت و برگشتی دچار گسیختگی می شوند. وجود تغییرات تنش بیش از تنش حد طراحی و زیاد بودن چرخه های تنش وارده و یا اصطلاحاً پدیده ی خستگی کم چرخه ی روش ها و معیارهای مختلفی برای طراحی خستگی یک عضو تحت بارگذاری رفت و برگشتی است. یکی از روش های نوین و منطقی در طراحی خستگی روش مدل آسیب تحت قوانین علمی مکانیک آسیب است و معیار طراحی این روش اصطلاحاً طراحی تحمل آسیب نام دارد. آسیب در مواد فرایندی است قابل رشد که با کاهش تدریجی مقاومت مکانیکی باعث وقوع زوال در مواد می شود و یکی از صورت های آن آسیب خستگی کم چرخه است. اما متغیر

مشابه را افزایش می‌دهد، بلکه در افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری محوری رفت و برگشتی قابل تحمل نیز تأثیر مستقیم خواهد داشت.

۶. نتیجه‌گیری

- از مقایسه‌ی میزان جذب انرژی نمونه‌ی دو لایه نسبت به نمونه‌ی تک لایه می‌توان دریافت که جذب انرژی در یک تعداد سیکل مشخص برای نمونه‌ی دو لایه بیش از دو برابر نمونه‌ی تک لایه بوده است.
- افزایش ۲۱ و ۲۲ درصدی در میزان بیشینه‌ی نیروی قابل تحمل فشاری و کششی با دو لایه‌کردن مدل اتفاق می‌افتد.

- با دو لایه‌شدن میراگر علاوه بر دو برابر شدن ضخامت و قابلیت استهلاک انرژی، تأثیرات مطلوب اندرکنش بین لایه‌ها و افزایش تعداد مفاصل خمیری عاملی برای افزایش جذب انرژی به بیش از دو برابر است. اندرکنش بین لایه‌ها باعث ایجاد نیرویی مکمل و بازدارنده‌ی ما بین دو جداره‌ی میراگر می‌شود و از تغییرشکل‌های مخرب جلوگیری می‌کند. افزایش تعداد مفاصل خمیری نیز به دلیل دو برابر شدن نقاط قعر و اوج پلیسه‌ها به عنوان نقاط اصلی جاذب انرژی به استهلاک بالاتر انرژی کمک می‌کند.

- مطالعات پارامتریک تأثیر مستقیم پارامترهای هندسی ضخامت جداره و شعاع لوله و تأثیر معکوس پارامترهای شعاع پلیسه و طول لوله را بر شاخصه‌های مهم میراگر نشان می‌دهد. با داشتن عدد ۵ برای پارامتر بی بعد tR/r^2 ، مدل ایده‌آل هندسی با جذب انرژی بهینه به دست خواهد آمد.

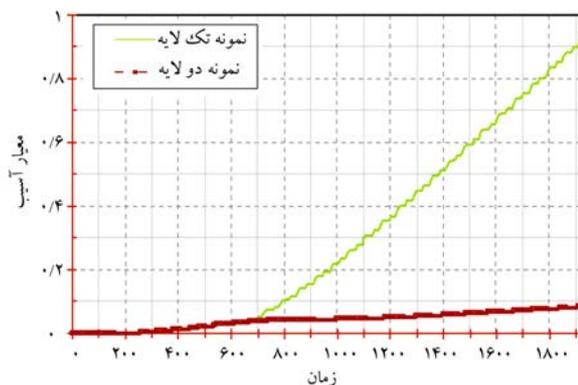
- نتایج حاصل از تحلیل آسیب نشان می‌دهد که نمونه‌ی دو لایه دو اثر مطلوب در رفتار خستگی میراگر خواهد داشت. اولین تأثیر مثبت را می‌توان خارج‌کردن المان بحرانی در نمونه‌ی تک لایه از آسیب بحرانی دانست. دومین اثر، کاهش پارامتر آسیب در تمامی المان‌های مدل دو لایه چه در لایه‌ی اول و چه در لایه‌ی دوم است. بنابراین دو لایه‌شدن میراگر علاوه بر اینکه در مشخصات هیسترتیک آن از جمله جذب انرژی و میرایی و اسکوز معادل تأثیر مثبت و مطلوبی دارد، در در شدن لایه‌ها از آسیب بحرانی نیز اثر مطلوبی خواهد داشت.

تقدیر و تشکر

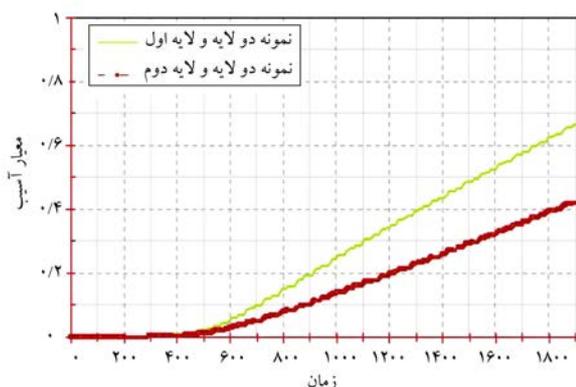
کلیه‌ی آزمایش‌ها روی نمونه‌های مختلف در آزمایشگاه پژوهشکده‌ی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله انجام شده است. لذا بدین وسیله از زحمات و همکاری‌های کلیه‌ی مسئولان و کارکنان این آزمایشگاه قدردانی شود.

پانویس

1. Von-Misses



شکل ۲۷. تغییرات پارامتر آسیب در مدل تک لایه و دو لایه در رأس پلیسه‌ی پنجم.



شکل ۲۸. تغییرات پارامتر آسیب در مدل دو لایه برای لایه‌ی اول و دوم در رأس پلیسه‌ی نهم.

در پلیسه‌ی نهم در شکل ۲۸ نشان داده شده است. بنابراین دو لایه‌کردن میراگر دو اثر مطلوب در رفتار خستگی میراگر خواهد داشت. اولین تأثیر مثبت را می‌توان خارج‌کردن المان بحرانی در نمونه‌ی تک لایه از آسیب بحرانی دانست. دومین اثر، کاهش پارامتر آسیب در تمامی المان‌های مدل دو لایه، چه در لایه‌ی اول و چه در لایه‌ی دوم است. دور شدن کلیه‌ی نواحی جداره‌ی میراگر از آسیب بحرانی خود گواه بر مقاومت و تحمل بیشتر میراگر در یک آسیب کم‌چرخه را نشان می‌دهد.

در حقیقت خستگی کم‌چرخه به‌عنوان یکی از انواع آسیب با محاسبه‌ی کرنش خمیری و شکست در مدل فاز نرم، که یک روش برای محاسبه‌ی پارامتر آسیب است، مورد تحلیل قرار گرفته است.

مطالعه‌ی آسیب در جداره‌ی تحت بارگذاری مشخص هارمونیک نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌ها نه فقط جذب انرژی و میرایی آن در یک سیکل و با شرایط

منابع (References)

1. Reid, S.R. "Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy ab-

- sorbers”, *International Journal of Mechanical Science*, **35**(12), pp. 1035-1052 (1993).
2. Yamazaki, K. and Han, J. “Maximization of the crushing energy absorption of cylindrical shells”, *Journal of Advances in Engineering Software*, **31**(6), pp. 425-434 (2000).
 3. Singace, A.A. and El-Sobky, H. “Behavior of axially crushed corrugated tube”, *International Journal of Mechanical Science*, **39**(3), pp. 249-268 (1997).
 4. Daneshi, G.H. and Hosseinipour, S.J. “Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression”, *Journal of Materials and Design*, **23**(7), pp.611-617 (2003).
 5. Motamedi, M. and Nateghi, A.F. “Using accordion thin-walled tube as a hysteretic metallic damper”, 13 Th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No.2264 (2004).
 6. Izadi-Z, E., Nateghi, A.F. and Motamedi, M. “Stabilization and modifying the buckling behavior of accordion metallic damper using polyurethane foam”, 14 th European Conference on Earthquake Engineering, Ohrid, Macedonia, Paper No.580 (2010).
 7. Motamedi, M. and Nateghi, A.F. “Study of seismic energy dissipation in accordion metallic dampers”, Report, IIEES, 239 Pages (2005).
 8. Motamedi, M. and Nateghi, A.F. “Experimental study of accordion metallic damper (AMD)”, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, Paper No.38 (2006).
 9. Nateghi, A.F., Motamedi, M. and Izadi-Z, E. “Experimental behavior of the seismic filled accordion metallic damper”, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Paper No.2264 (2008).
 10. Motamedi, M. “Experimental study of application of the accordion metallic damper In seismic retrofitting of steel building frames”, Ph.D. Thesis, Islamic Azad University, Science & Research Branch, Tehran, Iran (2005).
 11. Torbat-E, M., Izadi-Z, E., Nateghi, A.F. and Motamedi, M. “Experimental and analytical studies of multilayer accordion metallic damper”, 15 th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Paper No.1580 (2012).

Archive of SID