

بررسی تجربی و عددی اثر نوع و جایگاه ضربه زننده در جذب انرژی سازه‌های جدار نازک در بارگذاری جانبی

سجاد دهقان پور^۱، حامد خلیلی^۲، کیوان حسینی صفری^۳، یونس محمدی^۴

* نویسنده مسئول: sajjaddehghanpour@tuyiau.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

لوله جدار نازک، انرژی جذب شده، بار
جانبی، ABAQUS

ضربه یکی از موارد بسیار مهمی است که همواره در علم مکانیک مطرح بوده است. ماهیت ضربه به نحوی است که کنترل آن را مشکل می‌سازد، در نتیجه لازم است که بتوان در مواقع نیاز از انتقال ضربه به قسمت‌های آسیب‌پذیر یک سازه جلوگیری کرد. یکی از بهترین روش‌های جذب انرژی ضربه، استفاده از لوله‌های جدار نازک فلزی با چگالی کم است. این لوله‌ها تحت ضربه دچار فرو ریزش شده و با جذب انرژی، مانع از آسیب رسیدن به قسمت‌های دیگر سازه می‌شوند.

هدف از این تحقیق بررسی تغییر شکل و جذب انرژی لوله‌های جدار نازک با شکل مقاطع دایره، شش ضلعی، پنج ضلعی، مربع و مستطیل و با حجم، ارتفاع، سطح مقطع متوسط، ضخامت و جنس یکسان، زیر سه حالت بارگذاری است. بارگذاری‌ها به صورت شبه استاتیکی بوده و از نتایج آزمایشگاهی به منظور بررسی دقت و صحت نتایج عددی استفاده شده است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهند که در حالت اول بارگذاری، بیشترین جذب انرژی توسط مقطع مربع و در حالت دوم و سوم بارگذاری مقطع مستطیل به صورت ایستاده بیشترین جذب انرژی را داشته‌اند.

۱- گروه مکانیک، واحد تویسرکان، دانشگاه آزاد اسلامی، تویسرکان، ایران

۲- گروه مکانیک، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

۳- دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین، ایران

۴- دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین، ایران

۱- مقدمه

ستونی، مانند لوله‌های آلومینیومی تعیین شود، لذا مطالعه لوله‌های آلومینیومی از اهمیت کاربردی برخوردار است.

لوله‌های آلومینیومی جدار نازک که اعضایی با بیشترین میزان جذب انرژی هستند، با ابعاد و اشکال مختلف به طور گسترده در ساختمان خودروها استفاده می‌شوند. هنگام طراحی چنین سازه‌هایی مطالعه رفتار فروپاشی یا خصوصیات جذب انرژی آن‌ها ضروری است و لوله‌های تحت بارگذاری محوری و جانبی عنوان اصلی مطالعات وسیعی در دهه‌های اخیر هستند.

در طول خطوط لهدگی مفاصل پلاستیکی شکل می‌گیرند و تسلیم ماده و تغییر شکل پلاستیک موجب جذب انرژی می‌شوند. تغییر شکل و ابعاد مقطع جدار نازک و همچنین نحوه بارگذاری بر روی آن، موجب تغییرات زیادی در میزان جذب انرژی و دیگر پارامترهای مهم در این خصوص می‌شود.

موچلر^۱ [۱] رفتار لوله‌های آلومینیومی را در میان دو صفحه صلب که به صورت جانبی به سازه بار وارد می‌نمودند مورد بررسی قرار داد. وی ظرفیت جذب انرژی این لوله‌ها را با استفاده از روش‌های عددی مختلف مطالعه نمود. وی با فرض اینکه در ابتدا لوله با یک خط مستقیم با دو صفحه صلب در تماس بوده با پیشرفت تغییر شکل، این خط به یک سطح مستطیلی تبدیل می‌شود و قسمت‌هایی که در معرض تماس نیستند به صورت دایره‌ای باقی می‌مانند تجزیه و تحلیل خود را به صورت عددی ادامه داد.

رانتزو هادج^۲ [۲] با استفاده از مدل اجزا محدود رفتار لوله‌ها را با فرض اینکه لوله‌های پلاستیک در چهار نقطه تقاطع محور افقی و عمودی در سطح مقطع لوله ایجاد می‌شوند بررسی کردند. در تحقیق آن‌ها لهدگی لوله بین دو صفحه

جاذب‌های انرژی در صنعت به دلیل کاربردهای فراوان دارای اهمیت بالایی هستند. جاذب انرژی وسیله‌ای است که انرژی جنبشی را به شکل دیگری از انرژی تبدیل می‌کند و هدف اصلی آن کاهش نیروی آسیب‌رسان منتقل شده به سازه است. بررسی بار جانبی بر روی لوله‌ها به عنوان دسته مهمی از جاذب‌های انرژی از گذشته مورد توجه محققین بوده است. توسعه و تحلیل سازه‌های جاذب انرژی یکی از مباحث مهم مطرح شده در مکانیک ضربه است و یک مثال رایج مطرح شده در این زمینه، بررسی یک جاذب انرژی است که در اثر برخورد یک جسم ضربه زنده تحت بار ضربه‌ای قرار می‌گیرد. امروزه سازه‌های آلومینیومی به طور گسترده‌ای در صنایع خودروسازی به کار برده می‌شوند که دلایل زیادی برای این انتخاب می‌توان ذکر کرد. اما مهم‌ترین دلیل وزن کم آلومینیوم است، زیرا که چگالی آلومینیوم فقط یک سوم چگالی فولاد است. علاوه بر وزن کمتر، آلومینیوم مقاومت خوردگی بالاتری نیز نسبت به بسیاری از فلزات دیگر دارد و این خصوصیات دلالت بر این دارد که آلومینیوم یک ماده ایده‌آل برای صنعت خودروسازی است.

در ساختمان خودرو، پروفیل‌های آلومینیومی به طور گسترده در بخش‌های جلویی و عقبی خودرو به کار برده می‌شوند. در طی برخورد، سرنشینان می‌توانند امنیت بیشتری داشته باشند زیرا بخش‌های جلویی خودرو، بیشتر انرژی را جذب کرده و بدین ترتیب امنیت مناسب‌تری برای سرنشینان خودرو حاصل خواهد شد.

بنابراین، ارزش ضربه پذیری خودرو تا حد زیادی به وسیله خصوصیات نیروی محوری و نیروهای جانبی در قاب‌های

¹ Mutchler

² Deruntz and Hodge

گوپتا^۵ و همکاران [۸] تاثیر بار جانبی بر روی مقطع مستطیلی و مربعی را همراه با آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار دادند. فرآیند تغییر شکل به صورت عددی با استفاده از اجزاء محدود شبیه‌سازی شد و سپس نمونه‌ها آزمایش شده و نتایج با هم مقایسه شدند که تطابق خوبی میان این دو برقرار شد. این محققان اثر پارامترهایی چون ضخامت، شکل هندسی سازه‌ها و اصطکاک را مورد بررسی قرار دادند. همچنین آن‌ها [۹] در تحقیقات بعدی خود به بررسی تاثیر بار جانبی بر روی سازه‌های جدار نازک با مقطع دایره پرداختند. این محققان با ارائه یک مدل تئوری برای تغییر شکل لوله‌ها و تقسیم‌بندی نواحی مختلف مقطع لوله از نظر نحوه تغییر شکل به شبیه‌سازی آن پرداخته و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. آن‌ها تاثیر قطر و ضخامت را بر روی میزان جذب انرژی بررسی کرده و به نتایج مثبتی دست یافتند.

موریس^۶ و همکارانش [۱۰] به مطالعه و بررسی بارگذاری جانبی بر روی لوله‌های مرکب پرداختند و نشان دادند که میزان جذب انرژی با افزایش تعداد لوله‌ها افزایش یافته، همچنین با ایجاد قيود عمودی و مایل میزان جذب انرژی دچار تغییراتی خواهد شد.

نیک نژاد و همکاران [۱۱ تا ۱۴] به صورت عددی و تجربی به مطالعه رفتار لوله‌های جدار نازک بدون شیار و شیار دار به صورت خالی و پر شده از فوم پرداختند.

یان و چو^۷ [۱۵] در خصوص مشخصات رشته‌های کتان برای تقویت لوله‌های دایره‌ای کامپوزیتی از نظر جذب انرژی مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که رشته‌های الیاف طبیعی پتانسیل خوبی برای جذب انرژی دارند.

صلب با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ و با فرض اینکه جنس لوله صلب-کامل پلاستیک است انجام پذیرفته است.

ردی و رید^۱ [۳] فشردگی لوله با قیده‌های کناری را مورد مطالعه قرار دادند. آنها اثر قیده‌های کناری بر روی لوله‌های فلزی را بررسی کرده و یک مبنای تئوری مناسب برای آن ارائه نمودند. همچنین این محققان در سال ۱۹۸۰ آزمایش‌های خود را بر روی سازه‌های جدار نازک با مقطع دایره با طول‌های مختلف انجام دادند و تأثیرات طول را بر روی میزان جذب انرژی بررسی کردند. همچنین فشردگی لوله با دوبر متمرکز در امتداد قطر را مورد تحقیق قرار دادند [۴].

سینها و چیت کارا^۲ [۵] آزمایش‌های تجربی و تحقیقات نظری خود را در مورد سازه‌هایی با مقطع مربع که تحت بارگذاری جانبی قرار گرفتند انجام دادند. آن‌ها مطالعات خود را بر روی بازوهای عمودی متمرکز کرده و با فرض تشکیل لولاهای پلاستیک در نقاط میانی هر بازو مبنای تحلیل تئوری خود قرار دادند و بار فروریزش برای سازه‌ها را محاسبه کردند.

ککمن^۳ [۶] رفتار سازه‌ها با مقطع مستطیل را در مقابل بار جانبی با روش اجزاء محدود بررسی کرد و نتایج تحقیقات خود را با مدل‌های تجربی سنجید.

گوپتا و خولار^۴ [۷] مطالعات خود را بر روی مدل‌های ککمن^۳ ادامه دادند. آن‌ها تحلیل خود را بر روی شکل-گیری لولاهای پلاستیک پایه قرار داده و نشان دادند که لولاهای ابتدا در وسط بازوهای عمودی و سپس در چهار گوشه لوله شکل می‌گیرند.

¹ Reid and Reddy

² Sinha and Chitara

³ Kecman

⁴ Gupta and Khullar

⁵ Gupta

⁶ Morris

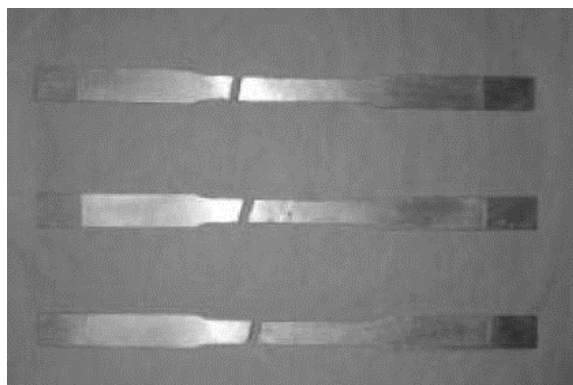
⁷ Yan and Chow

شکل پلاستیکی را تغییر می‌دهد و در میزان جذب انرژی نقش مهمی ایفا می‌کند.

انتخاب بهترین شکل جاذب انرژی به منظور افزایش میزان جذب انرژی و کاهش نیروهای آسیب‌رسان به سازه، ارزش زیادی دارد. با توجه به این که دستگاه جاذب انرژی در سازه‌های مختلفی به کار گرفته می‌شود، همچنین ضربه به حالت‌های گوناگونی داشته باشد، در این مقاله به بررسی جذب انرژی انواع مختلف مقاطع جدار نازک در سه حالت بارگذاری شبه استاتیکی به روش عددی با استفاده از نرم‌افزار قدرتمند آباکوس انجام گرفته است که به منظور دقت و صحت نتایج عددی از نمونه‌های آزمایشگاهی نیز استفاده شده است.

۲- انجام آزمایش کشش جهت به دست آوردن منحنی تنش- کرنش

آزمایش کشش با استفاده از دستگاه اینسترون مدل ۸۵۰۳ ساخت کشور انگلیس و مطابق استاندارد ASME بر روی نمونه‌های به دست آمده از ورق آلومینیومی انجام گرفت که در نهایت به تنش تسلیم برابر ۱۳۰ مگاپاسکال رسید. نمونه‌های تست شده در این آزمایش در شکل (۱) و نمودار تنش-کرنش حاصل از تست کشش در شکل (۲) مشاهده می‌شود.



شکل (۱) نمونه‌ها پس از تست کشش

همچنین یان^۱ [۱۶] و همکارانش فوم‌های پلی‌اورتان را با رشته‌های کتان در لوله‌های کامپوزیتی تحت فشار شبه استاتیکی که در معرض بار محوری بودند مقایسه نمودند آن‌ها دریافتند لوله‌هایی که از فوم پر می‌شوند جذب انرژی بالاتری نسبت به لوله‌های تو خالی دارند.

مهدی و همکاران [۱۷] به بررسی چهار فاز مختلف برای بهبود بخشیدن به انرژی ویژه جذب شده برای لوله‌های تحت بارگذاری محوری پرداختند.

ژانگ^۲ و همکاران [۱۸] برای طراحی لوله‌ها و ستون‌های دو تایی و پر شده از فوم از جنس آلومینیوم که تحت بارگذاری محوری قرار داشتند به صورت عددی و تجربی اقدام کردند. همچنین بسیاری از محققین در مورد تاثیر شکل مقطع بر روی جذب انرژی در بارگذاری محوری مطالعاتی انجام دادند.

آرنولد و آلتن‌هوف^۳ [۱۹] به بررسی اثر عیوب هندسی بر میزان جذب انرژی و تغییر در نیروی بیشینه ابتدایی برخورد پرداختند، آزمایش‌ها نشان می‌داد که ناپیوستگی اشکال و شیارها بر روی جذب انرژی و نیروی برخورد تاثیرات قابل توجهی دارند.

چنگ^۴ و همکاران [۲۰] به بررسی ناپیوستگی‌های لوله‌ها با اشکال مقطع مربع، بیضی و دایره از جنس آلومینیوم پرداختند و به نتایج مهمی دست یافتند.

علوی نیا و همکاران [۲۱] به بررسی اثر ترک در میزان جذب انرژی لوله‌های دایره‌ای، مربعی تحت بارگذاری محوری پرداختند و نشان دادند که زاویه ترک فرایند تغییر

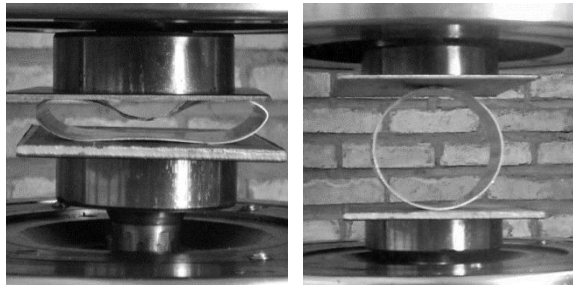
¹ Yan

² Zhang

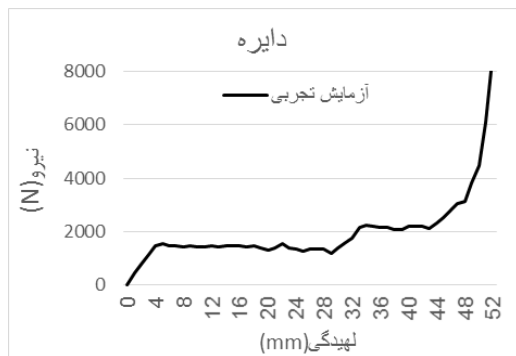
³ Arnold and Altenhof

⁴ Cheng

پس از بارگذاری همچین نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از مقاطع را مشاهده کنید.

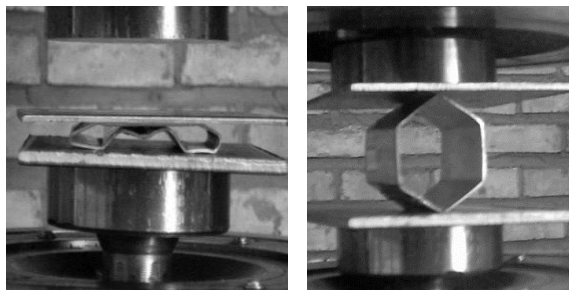


(الف) (ب)

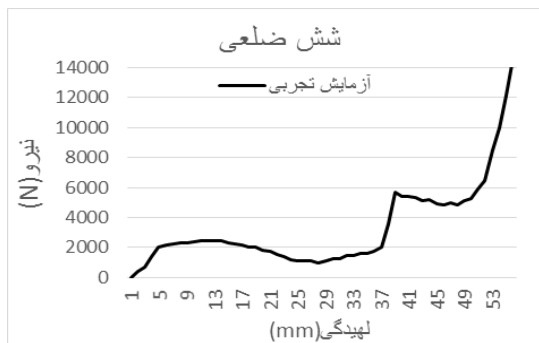


(ج)

شکل (۴) (الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری (ج) نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش تجربی برای مقطع دایره

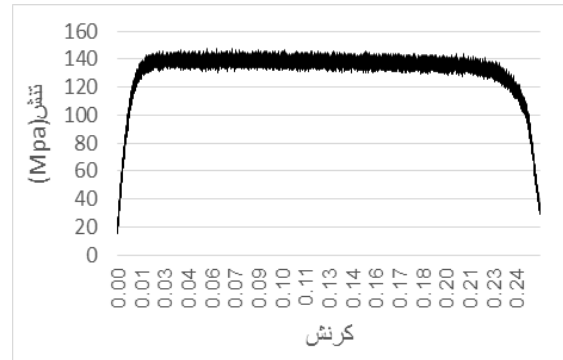


(الف) (ب)



(ج)

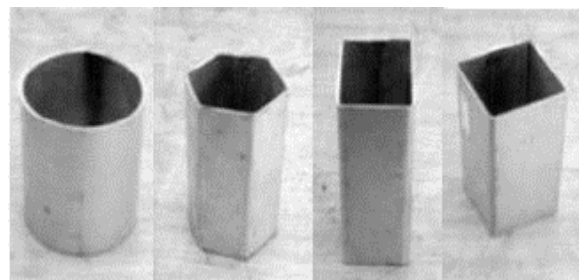
شکل (۵) (الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری (ج) نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش تجربی برای مقطع شش ضلعی



شکل (۲) نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها حاصل از تست کشش

۳- آزمایش تجربی

نمونه‌ها از جنس آلومینیوم با تنش تسلیم ۱۳۰ مگاپاسکال و شکل‌های هندسی سطح مقطع دایره ای، شش ضلعی، مربعی، مستطیلی با نسبت ابعاد ۱:۱/۵ و به طول ۱۰۰ میلی-متر و محیط متوسط مقطع ۱۹۰ میلی‌متر و با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. نمونه‌های ساخته شده در شکل (۳) نشان داده شده اند.



شکل (۳) نمونه‌های ساخته شده با مقاطع مختلف جهت آزمایش تجربی

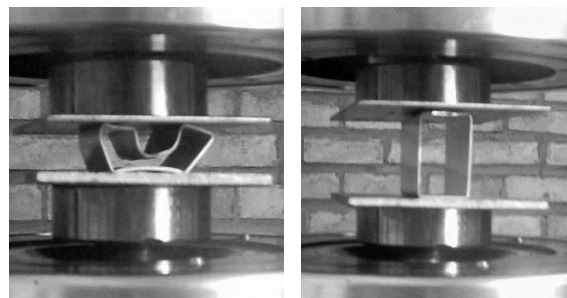
جهت افزایش دقت نتایج آزمایش تجربی، از هر کدام از مقاطع سه نمونه ساخته و عمل بارگذاری بر روی آن‌ها انجام شد که نتایج حاصل از آن را در جدول (۱) مشاهده می‌نمایید. آزمایش بارگذاری جانبی بر روی نمونه‌ها به صورت شبه استاتیکی با سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه و با استفاده از دستگاه اینسترون مدل ۸۵۰۳ انجام شد و منحنی نیرو-جابجایی به دست آمد که مقدار انرژی جذب شده هر یک از نمونه‌ها با توجه به سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی محاسبه شد. در شکل‌های (۴ تا ۷) می‌توانید شکل پیش و

جدول (۱) تعداد آزمایش، میزان لهیدگی، نیروی بیشینه، نیروی میانگین و مقدار انرژی جذب شده حاصل از آزمایش تجربی

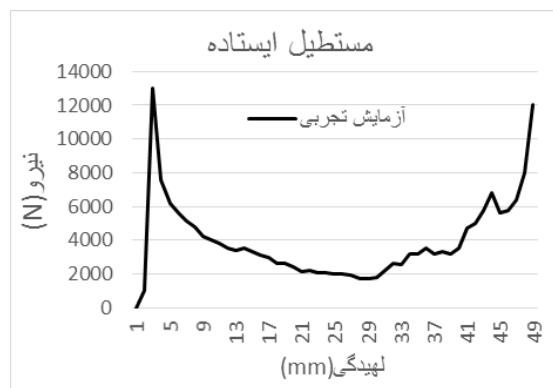
شکل مقطع	شماره آزمایش تجربی	میزان لهیدگی (mm)	نیروی بیشینه (N)	نیروی متوسط (N)	انرژی جذب شده (j)
دایره	۱	۵۰	۱۵۳۵	۱۶۴۳	۸۲
	۲	۴۷	۱۵۴۰	۱۷۰۸	۸۰
	۳	۴۶	۱۵۲۸	۱۷۶۳	۸۱
مربع	۱	۴۲	۱۴۹۵۷	۴۴۷۶	۱۸۸
	۲	۴۰	۱۵۲۱۷	۴۶۷۵	۱۸۷
	۳	۴۱	۱۵۰۲۶	۴۶۱۰	۱۸۹
مستطیل ایستاده	۱	۳۹	۱۳۱۱۰	۳۲۰۵	۱۲۵
	۲	۳۸	۱۲۹۹۶	۳۲۳۷	۱۲۳
	۳	۴۲	۱۳۰۰۰	۲۸۳۳	۱۱۹
مستطیل خوابیده	۱	۲۹	۱۷۹۲۰	۶۲۰۷	۱۸۰
	۲	۳۲	۱۷۷۵۴	۵۶۸۷	۱۸۲
	۳	۳۱	۱۷۸۱۰	۵۹۶۸	۱۸۵
شش ضلعی	۱	۵۰	۵۶۷۱	۲۲۴۰	۱۱۲
	۲	۴۹	۵۵۹۸	۲۳۲۹	۱۱۴
	۳	۵۱	۵۶۸۲	۲۲۴۲	۱۱۴

۴- شبیه سازی عددی

نمونه‌ها به وسیله نرم‌افزار آباکوس در سه حالت بارگذاری به صورت سه بعدی مدل سازی و تحلیل شده‌اند که دارای شکل‌های هندسی سطح مقطع دایره‌ای، مربعی، مستطیلی با نسبت ابعاد ۱:۱/۵، پنج ضلعی، شش ضلعی با محیط متوسط مقطع ۱۹۰ میلی‌متر و به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر و نوع المان مدل‌ها C3D20R می‌باشد. بارگذاری بر روی مقاطع به صورت جانبی و در حالت شبه استاتیکی است. همچنین صفحات فشرده کننده نمونه‌ها، صلب و ضریب اصطکاک بین آن‌ها و نمونه‌ها ۰/۲ در نظر گرفته شده است. نوع ماده انتخاب شده کامل پلاستیک فرض شده است. مقادیر چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و تنش تسلیم را در جدول (۲) مشاهده می‌کنید.

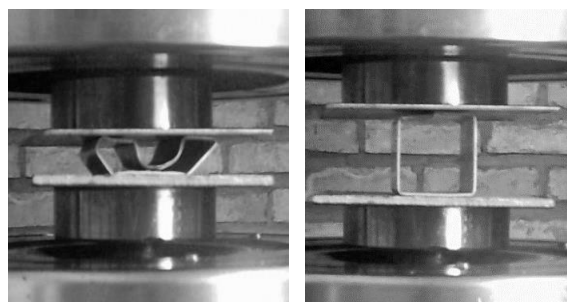


(الف) (ب)

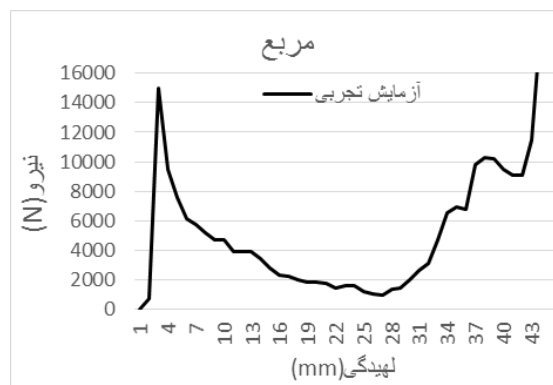


(ج)

شکل (۶) (الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری (ج) نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش تجربی برای مقطع مستطیل به صورت ایستاده



(الف) (ب)

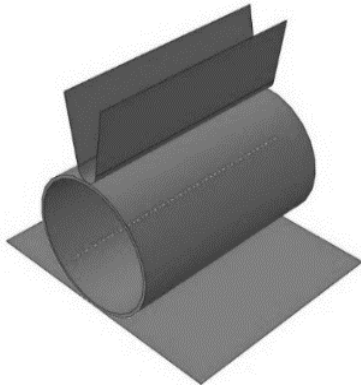


(ج)

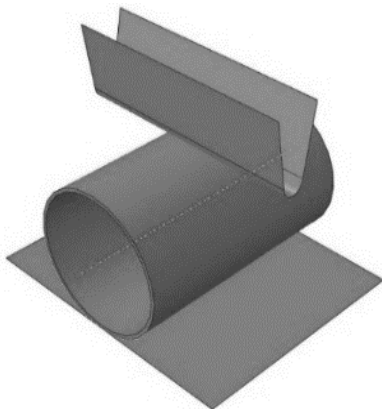
شکل (۷) (الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری (ج) نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش تجربی برای مقطع مربع

جدول (۲) جنس، چگالی، مدول یانگ، ضریب پواسون و تنش تسلیم

نمونه‌ها				
چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	آلومینیوم
۲۷۰۵	۷۰	۰/۳۳	۱۳۰	



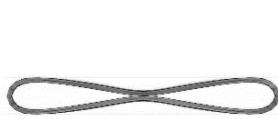
شکل (۹) حالت دوم بارگذاری



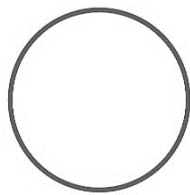
شکل (۱۰) حالت سوم بارگذاری

۲-۴- نتایج به دست آمده از تحلیل عددی

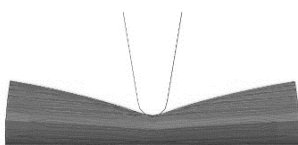
در شکل‌های (۱۱ تا ۱۷) می‌توانید شکل پیش و پس از بارگذاری و نمودار نیرو-جابجایی هر مقطع، همچنین در جدول (۳) انرژی جذب شده توسط نمونه‌های مورد تحلیل را مشاهده کنید.



(ب)



(الف)



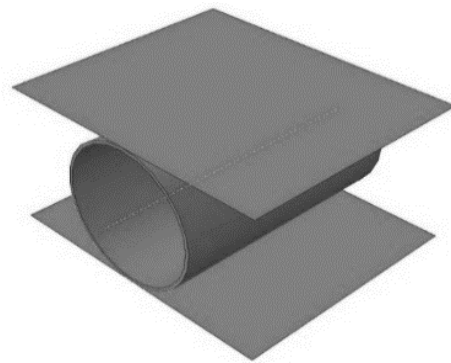
(د)



(ج)

۴-۱- انواع حالت بارگذاری

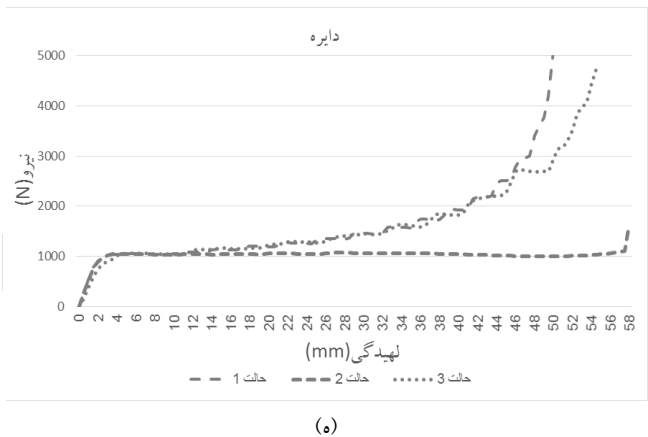
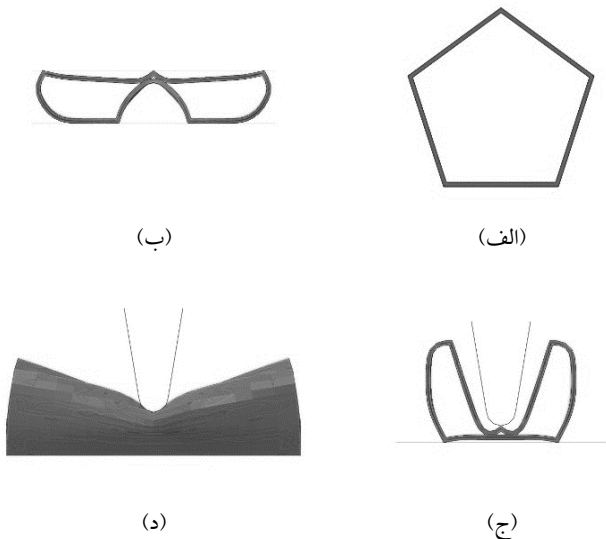
در حالت یک مقاطع جدار نازک بین دو صفحه صلب تخت به صورت عرضی قرار گرفته‌اند که صفحه صلب پایینی ثابت و صفحه صلب بالایی با سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه روی لوله، بارگذاری جانبی شده است (شکل ۸).



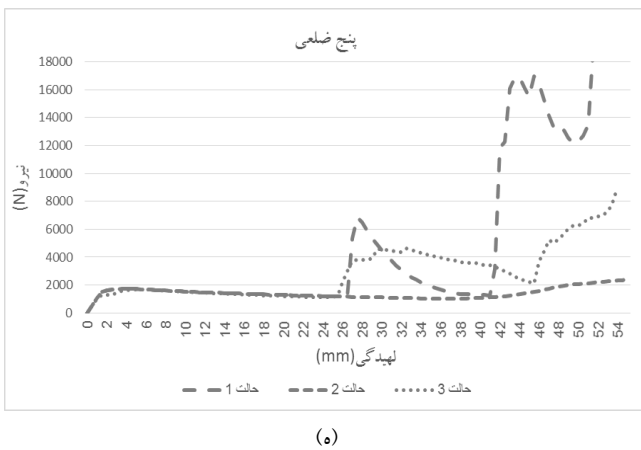
شکل (۸) حالت اول بارگذاری

حالت دوم مشابه حالت یک است، با این تفاوت که جسم صلب متحرک بالایی یک سنبه است که از نیم دایره به قطر ۱۰ میلی‌متر به عنوان نوک و ارتفاع ۳۵ میلی‌متر و فاصله لبه‌های بالایی سنبه از هم ۳۰ میلی‌متر است که به صورت موازی و هم راستا با محور لوله عمل بارگذاری را انجام می‌دهد (شکل ۹).

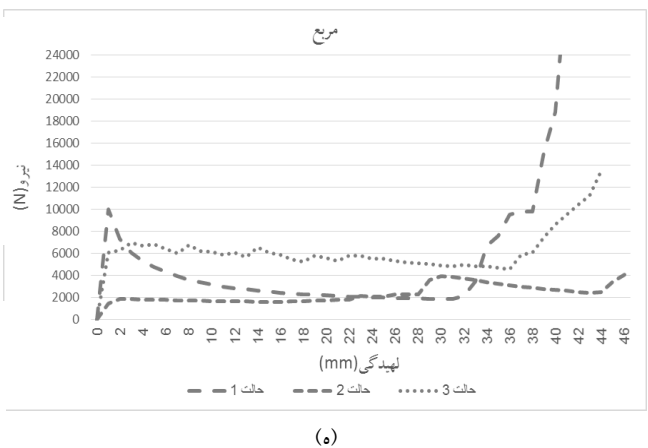
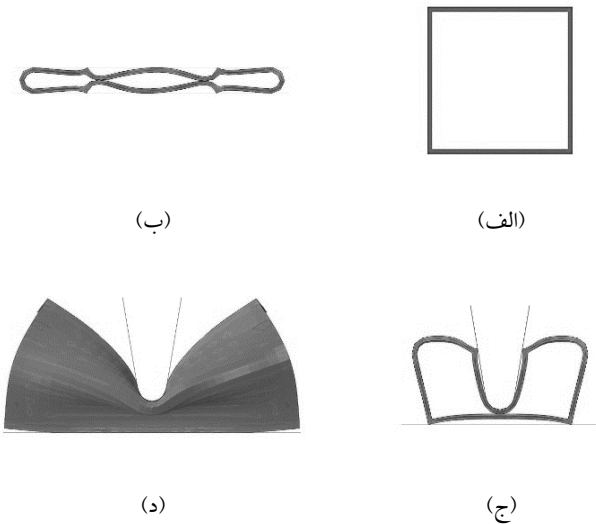
حالت سوم مشابه حالت دو است با این تفاوت که سنبه از فاصله ۵۰ میلی‌متری لبه‌ی نمونه مورد آزمایش ۹۰ درجه چرخش داشته و عمل بارگذاری را به صورت عرضی و در وسط طول مقطع لوله انجام می‌دهد (شکل ۱۰).



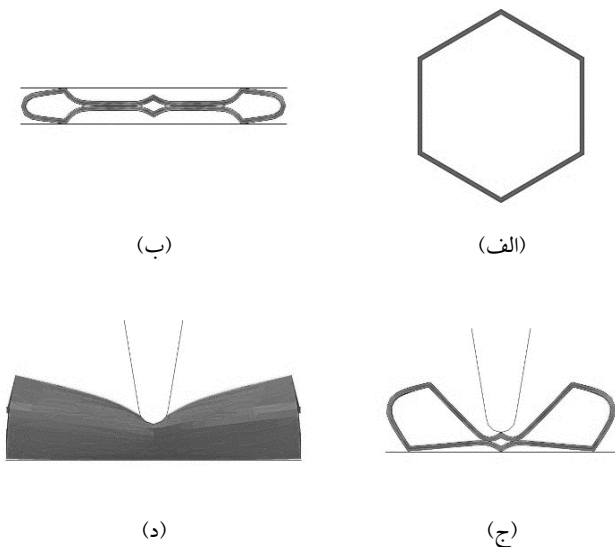
شکل (۱۱) (الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری در حالت یک مقطع دایره (ج) پس از بارگذاری در حالت دو مقطع دایره (د) پس از بارگذاری در حالت سه مقطع دایره (ه) نمودار نیرو-جابجایی مقطع دایره برای هر سه حالت بارگذاری

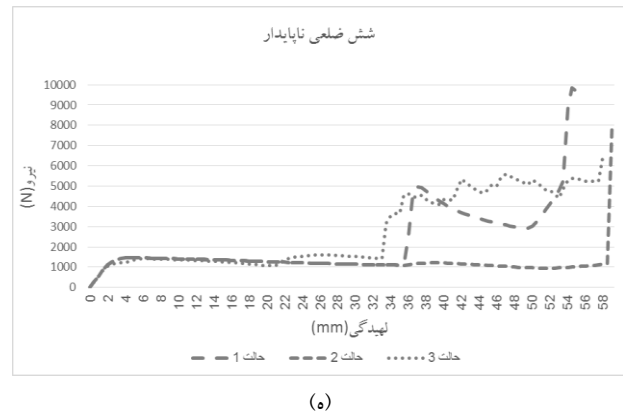
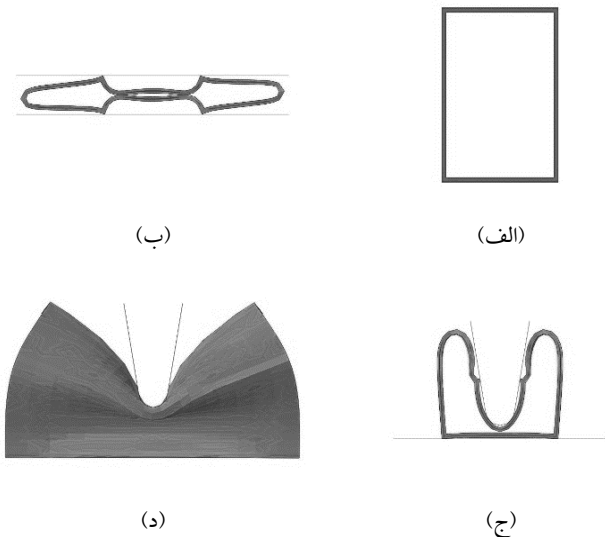


شکل (۱۳) (الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری در حالت یک مقطع پنج ضلعی (ج) پس از بارگذاری در حالت دو مقطع پنج ضلعی (د) پس از بارگذاری در حالت سه مقطع پنج ضلعی (ه) نمودار نیرو-جابجایی مقطع پنج ضلعی برای هر سه حالت بارگذاری

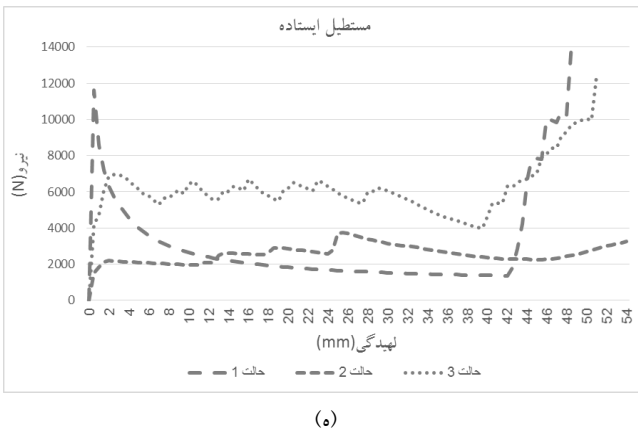


شکل (۱۲) (الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری در حالت یک مقطع مربع (ج) پس از بارگذاری در حالت دو مقطع مربع (د) پس از بارگذاری در حالت سه مقطع مربع (ه) نمودار نیرو-جابجایی مقطع مربع برای هر سه حالت بارگذاری

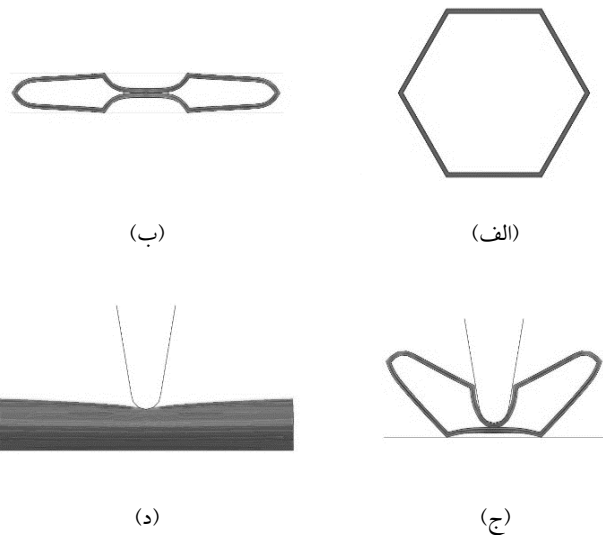
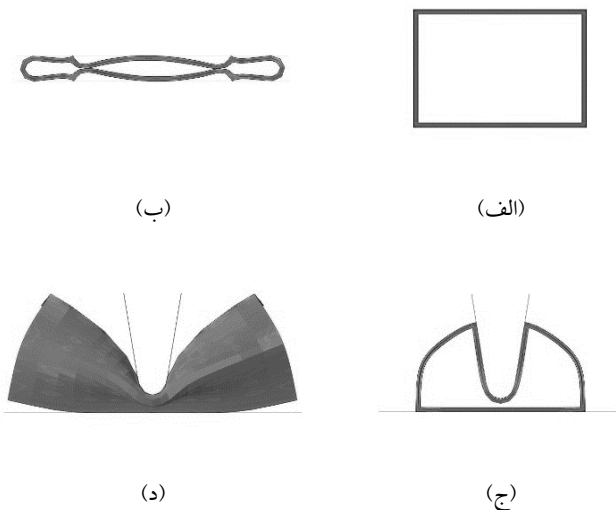




شکل (۱۴) (الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری در حالت یک مقطع شش ضلعی ناپایدار (ج) پس از بارگذاری در حالت دو مقطع شش ضلعی ناپایدار (د) پس از بارگذاری در حالت سه مقطع شش ضلعی ناپایدار (ه) نمودار نیرو-جابجایی مقطع شش ضلعی ناپایدار برای هر سه حالت بارگذاری



شکل (۱۶) (الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری در حالت یک مقطع مستطیل ایستاده (ج) پس از بارگذاری در حالت دو مقطع مستطیل ایستاده (د) پس از بارگذاری در حالت سه مقطع مستطیل ایستاده (ه) نمودار نیرو-جابجایی مقطع مستطیل ایستاده برای هر سه حالت بارگذاری



شکل (۱۵) (الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری در حالت یک مقطع شش ضلعی پایدار (ج) پس از بارگذاری در حالت دو مقطع شش ضلعی پایدار (د) پس از بارگذاری در حالت سه مقطع شش ضلعی پایدار (ه) نمودار نیرو-جابجایی مقطع شش ضلعی پایدار برای هر سه حالت بارگذاری

۵- اعتبار سنجی نتایج

برای پی بردن به صحت و دقت نتایج تحلیل عددی، آزمایش تجربی صورت گرفته، که مقادیر انرژی جذب شده و درصد اختلاف آن‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به این که درصد اختلاف انرژی جذب شده در آزمایش تجربی و عددی نمونه‌ها، کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد به همین دلیل مقادیر انرژی جذب شده به دست آمده از روش تحلیل عددی را برای سایر مدل‌ها می‌توان پذیرفت.

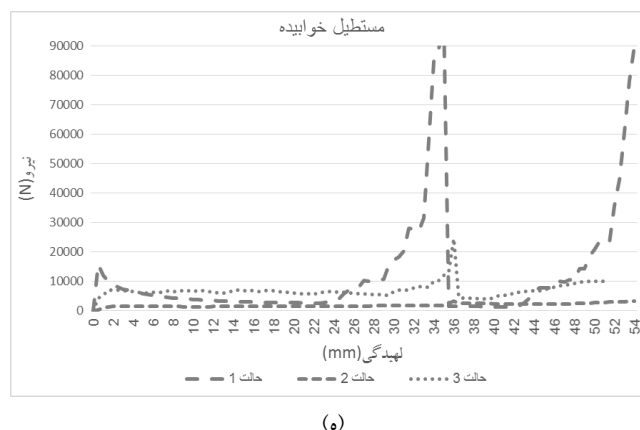
جدول (۴) مقایسه درصد اختلاف بین آزمایش تجربی و تحلیل عددی

مقدار اختلاف (%)	انرژی جذب شده به وسیله تحلیل عددی (J)	انرژی جذب شده به وسیله آزمایش تجربی (J)	شکل مقطع
۱/۲۵	۷۹	۸۰	دایره
۱/۰۶	۱۸۹	۱۸۷	مربع
۱/۶۴	۱۲۰	۱۲۲	مستطیل ایستاده
۰/۵۵	۱۸۳	۱۸۲	مستطیل خوابیده
۶/۱۴	۱۰۷	۱۱۴	شش ضلعی ناپایدار

۶- جمع بندی

در خصوص مقایسه بین کمترین و بیشترین جذب انرژی مقاطع در هر یک از حالت‌های بارگذاری، با توجه به یکسان بودن محیط متوسط مقطع، ضخامت، طول، جنس و سرعت بارگذاری، اختلاف قابل توجهی مشاهده شود که دلیل آن تغییر شکل هندسی مقطع است.

در حالت یک مطابق با شکل (۱۸) به ترتیب شکل مقطع مربع، مستطیل به صورت خوابیده، مستطیل به صورت ایستاده، شش ضلعی به صورتیکه روی نوک ایستاده، پنج ضلعی، دایره و شش ضلعی که روی ضلع خوابیده از بیشترین به کمترین جذب انرژی ذکر شده است و در حالت دو به ترتیب شکل مقطع مستطیل به صورت ایستاده، مربع،



(ه)

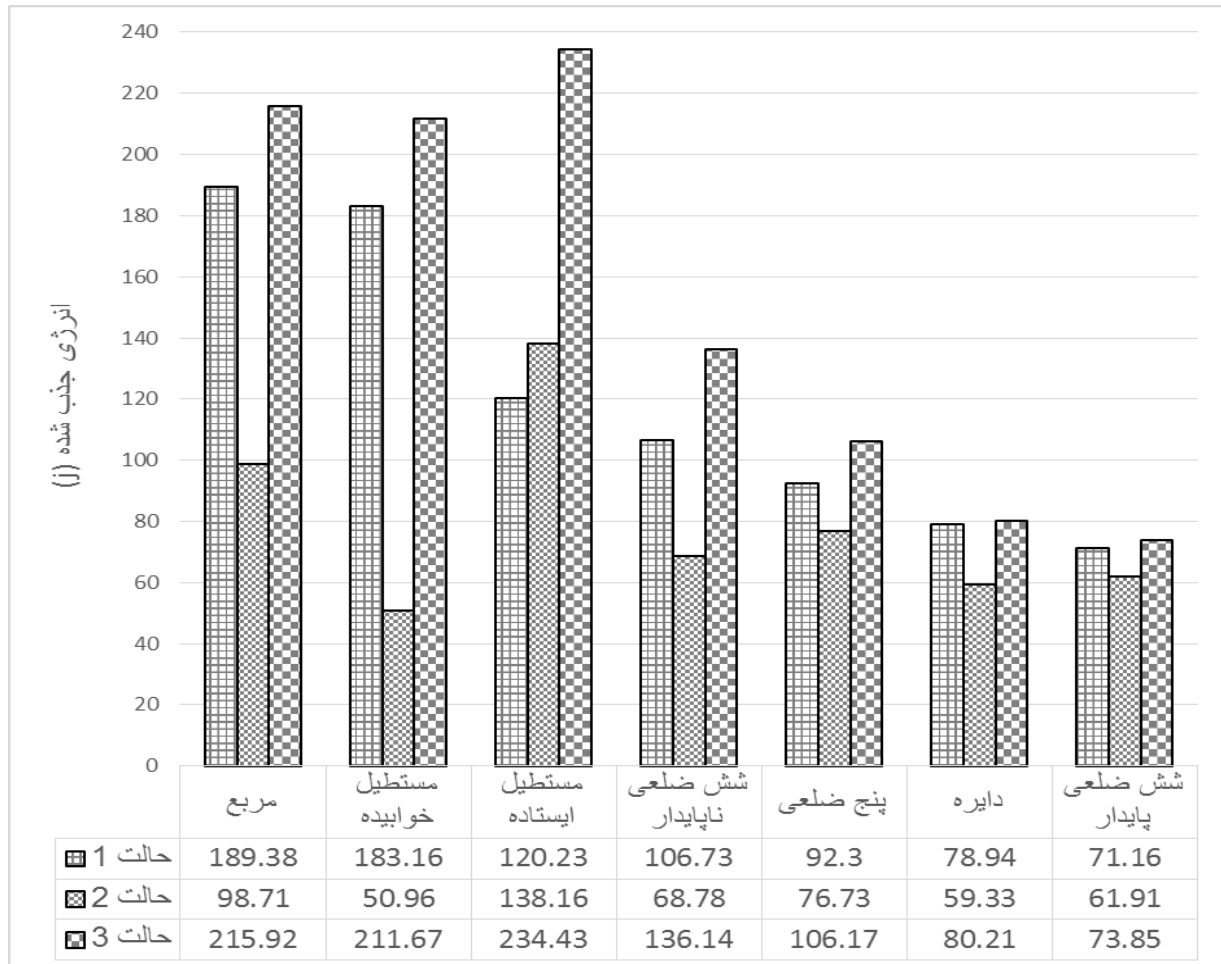
شکل (۱۷) الف) پیش از بارگذاری (ب) پس از بارگذاری در حالت یک مقطع مستطیل خوابیده (ج) پس از بارگذاری در حالت دو مقطع مستطیل خوابیده (د) پس از بارگذاری در حالت سه مقطع مستطیل خوابیده (ه) نمودار نیرو-جابجایی مقطع مستطیل خوابیده برای هر سه حالت بارگذاری

جدول (۳) نتایج حاصل از تحلیل عددی

شکل مقطع	حالت	میزان لهیدگی (mm)	نیروی بیشینه (N)	نیروی متوسط (N)	انرژی جذب شده (J)
دایره	۱	۵۰	۱۳۳۰/۴۷	۱۵۷۸/۷۶	۷۸/۹۴
	۲	۵۸	۱۰۷۰/۶۵	۱۰۲۲/۸۷	۵۹/۳۳
	۳	۵۲	۲۷۳۲/۹۲	۱۵۴۲/۵۵	۸۰/۲۱
شش ضلعی ناپایدار	۱	۵۳	۴۹۷۰/۰۴	۲۰۱۳/۸۲	۱۰۶/۷۳
	۲	۵۸/۵	۱۴۷۰/۸	۱۱۷۵/۷۳	۶۸/۷۸
	۳	۵۳	۵۵۷۶/۱۷	۲۵۶۸/۷۳	۱۳۶/۱۴
شش ضلعی پایدار	۱	۴۳	۲۴۹۱/۰۲	۱۶۵۴/۹۷	۷۱/۱۶
	۲	۴۱/۵	۱۶۴۳/۲۵	۱۲۰۲/۱۵	۶۱/۹۱
	۳	۴۲/۵	۲۳۸۹	۱۷۳۷/۷۵	۷۳/۸۵
پنج ضلعی	۱	۴۲/۵	۶۸۳۷/۱۹	۲۱۷۱/۷۶	۹۲/۳
	۲	۵۴/۵	۲۳۳۸/۱۶	۱۴۰۷/۹۲	۷۶/۷۳
	۳	۴۵/۵	۴۶۲۷/۳۸	۲۳۳۳/۴۹	۱۰۶/۱۷
مربع ایستاده	۱	۴۰/۵	۱۳۴۶۱/۸	۴۶۷۶/۱۸	۱۸۹/۳۸
	۲	۴۴	۳۹۳۴/۹۳	۲۲۴۳/۴۴	۹۸/۷۱
	۳	۳۸/۵	۶۹۶۴/۲۹	۵۶۰۸/۳۴	۲۱۵/۹۲
مستطیل خوابیده	۱	۴۵/۵	۱۱۶۳۰/۳	۲۶۴۲/۴۸	۱۲۰/۲۳
	۲	۵۴	۳۷۴۸/۵۸	۲۵۵۸/۵۸	۱۳۸/۱۶
	۳	۴۱/۵	۶۹۶۵/۹۱	۵۶۴۸/۹۸	۲۳۴/۴۳
مستطیل خوابیده	۱	۳۱	۲۰۱۳۱/۳	۵۹۰۸/۵۴	۱۸۳/۱۶
	۲	۳۵	۱۷۴۰/۹۷	۱۴۵۶	۵۰/۹۶
	۳	۳۳/۵	۸۲۱۰/۴۱	۶۳۱۸/۶۲	۲۱۱/۶۷

خوابیده، شش ضلعی به صورتیکه روی نوک ایستاده، پنج ضلعی، دایره و شش ضلعی که روی ضلع خوابیده از بیشترین به کمترین جذب انرژی ذکر شده است.

پنج ضلعی، شش ضلعی به صورتیکه روی نوک ایستاده، شش ضلعی که روی ضلع خوابیده، دایره و مستطیل به صورت خوابیده از بیشترین به کمترین جذب انرژی ذکر شده است همچنین در حالت سه به ترتیب شکل مقطع مستطیل به صورت ایستاده، مربع، مستطیل به صورت



شکل (۱۸) نمودار مقایسه انرژی جذب شده در حالت‌های مختلف

- [4] Reddy T.Y., Reid S.R., Lateral Compression of tubes and tube-system with side constrains, *International Journal of Mechanic Sciences*, vol. 21, 1980, pp. 99-187.
- [5] Sinha D., Chitara N.R., Plastic colladse of squre rings, *International Journal of Solid Structures*, vol. 18, 1982, pp. 798-819.
- [6] Kecman D., Bending collapse of rectangular and square section tubes, *International Journal of Mechanic Sciences*, vol. 25, 1983, pp. 598-601.

مراجع:

- [1] Mutcheler L.D., Energy absorption of aluminium tubing, *Journal of Applied Mechanics*, vol. 27, 1960, pp. 3-74.
- [2] Deruntz V.A., Hodge P.G., Crushing of a tube between rigid plates, *Journal of Applied Mechanics*, vol. 30, 1963, pp. 95-391.
- [3] Reid, S.R and Reddy, T.Y., Effects of strain hardening on the lateral compression of tube between rigid plates, *International Jorunal of Solids and Structures*, vol. 14, 1978, pp. 25-213.

- [16] Yan L, Chouw N, Jayaraman K. Effect of triggering and polyurethane foam-filler on axial crushing of natural flax/epoxy composite tubes. *Material and Design*, vol. 56, 2014, pp. 528–41.
- [17] Mahdi E., Sultan H., Hamouda A.M.S., Omer A.A., Mokhtar A.S., Experimental optimization of composite collapsible tubular energy absorber device, *Thin-Walled Structure*, vol. 44, 2006, pp. 1201–1211.
- [18] Zhang Y., Sun G., Li G., Luo Z., Li Q., Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria, *Material and Design*, vol. 38, 2012, pp. 99–109.
- [19] Arnold B., Altenhof W., Experimental observations on the crush characteristics of AA6061 T4 and T6 structural square tubes with and without circular discontinuities, *International Journal of Crash worthiness*, vol. 9, 2004, pp. 73–87.
- [20] Cheng Q., Altenhof W., Li L., Experimental investigations on the crush behavior of AA6061-T6 aluminum square tubes with different types of through-hole discontinuities, *Thin-Walled Structure*, vol. 44, 2006, pp. 441–454.
- [21] Alavi-Nia A., Badnava H., Fallah-Nejad Kh., An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes, *Material and Design*, vol. 32, 2011; pp. 3594–3607.
- [7] Gupta N.K., Khullar A., Collapse of square and rectangular tubes in tranverse loading, *Thin Walled Structure*, vol. 27, 1999, pp. 342-356.
- [8] Gupta N.K., Sekhon, G.S., Gupta P.K., A study of lateral collapse of square and rectangular, *Thin Walled Structure*, vol. 39, 2001, pp. 745-772.
- [9] Gupta N.K., Sekhon, G.S., Gupta P.K., Study of lateral compression of round methallic tubes, *Thin Walled Structures*, vol. 43, 2005, pp. 895-922.
- [10] Morris E., Olabi A.G., Hashmi M.J., Analysis of nested tubes type energy absorbers with different indenters and exterior constraints, *Thin Walled Structures*, vol. 44, 2005, pp. 872-885.
- [11] Niknejad A., Liaghat G.H., Moslemi-Naeini H., Behravesht A.H., Experimental and theoretical investigation of the first fold creation in thin walled columns, *Acta Mechanical Solida Sin*, vol. 23, 2010, pp. 353–360.
- [12] Niknejad A., Liaghat G.H., Moslemi-Naeini H., Behravesht A.H., Theoretical and experimental studies of the instantaneous folding force of the polyurethane foam-filled square honeycombs, *Material and Design*, vol. 32, 2011, pp. 69–75.
- [13] Niknejad A., Abedi M.M., Liaghat G.H., Zamani Nejad M., Prediction of the meanfolding force during the axial compression in foam-filled grooved tubes by theoretical analysis, *Material and Design*, vol. 37, 2012, pp. 144–151.
- [14] Abedi M.M., Niknejad A., Liaghat G.H., Zamani Nejad M., Theoretical and experimental study on empty and foam-filled columns with square and rectangular cross section under axial compression, *International Journal of Mechanic Sciences*, vol. 65, 2012, pp. 134–146.
- [15] Yan L., Chouw N., Crashworthiness characteristics of flax fibre reinforced epoxy tubes for energy absorption application. *Material and Design*, vol. 51, 2013, pp. 629–40.

