



بررسی تجربی استوانه‌های مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای به عنوان جاذب انرژی

محمد دامغانی نوری^{1*}، حسین حاتمی²، علی قدس بین جهرمی³

- 1- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
 2- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
 * سمنان، صندوق پستی 35131-19111، mnoori@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 09 شهریور 1393
 پذیرش: 20 آبان 1393
 ارائه در سایت: 26 آذر 1393
 کلید واژگان:
 جاذب‌های انرژی مشبک
 ظرفیت جذب انرژی
 بارگذاری دینامیکی محوری
 تاثیر نیروی ضربه‌ای

چکیده

امروزه به منظور کاهش خسارات ناشی از برخورد از جاذب‌های انرژی استفاده می‌کنند. سازه‌های جدارنازک محبوب‌ترین سازه‌هایی هستند که به عنوان جاذب انرژی در اشکال مختلف استفاده می‌شوند. در این تحقیق به بررسی جاذب‌های استوانه‌ای ساخته شده از ورق‌های مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداخته شده است. ورق‌های مشبک به دلیل دارا بودن وزن کم و مکانیزم فروریزش کارآمد دارای ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند. دو نوع جاذب با زاویه سلول‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند. ابتدا به جاذب با زاویه سلول $\alpha=0$ و سپس به جاذب با زاویه سلول $\alpha=90$ پرداخته شده است. آزمایش‌ها به وسیله دستگاه سقوط وزنه صورت گرفته است. خروجی دستگاه به صورت نمودار شتاب - زمان می‌باشد که به وسیله شتاب سنجی که روی وزنه ضربه زننده قرار گرفته نمایش داده می‌شود. در این پژوهش به بررسی نوع فروریزش، نمودارهای نیرو - جابه‌جایی و پارامترهای مؤثر پرداخته شده است. از نتایج به دست آمده مشاهده شد که جاذب‌های با زاویه سلول $\alpha=0$ دارای فروریزش متقارن بوده و ظرفیت جذب انرژی بالایی داشتند و جاذب‌های با زاویه سلول $\alpha=90$ دچار کماتش کلی شده و مقدار جذب انرژی مناسبی نداشتند.

Experimental Investigation of Expanded Metal Tube Absorber under Axial Impact Loading

Mohammad Damghani Nouri*, Hossein Hatami, Ali Ghodsbini Jahromi

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
 *P.O.B. 35131-19111 Semnan, Iran, mnoori@semnan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 31 August 2014
 Accepted 11 November 2014
 Available Online 17 December 2014

Keywords:
 expanded metal tube absorber
 energy absorption capacity
 dynamic axial loading
 impact force

ABSTRACT

Today, energy absorbers are used to reduce the damage caused by collision. Thin-walled structures are the most popular energy absorber and is used in various forms. In this research the cylindrical absorber made of expanded metal sheets (expanded metal tube) under impact loading has been examined. Expanded metal sheets due to their low weight and effective collapse mechanism has a high energy absorption capacity. Two types of absorbers with different cell angles were examined. First, the absorber with cell angle $\alpha=0$ and then the absorber with cell angle $\alpha=90$. Tests were done by drop hammer device. The output of device is Acceleration-time Diagram which is shown by Accelerometer and located on the picky mass. In this study the type of collapse, force - displacement diagram and effective parameters have been investigated. From the obtained results it was observed that the absorber with cell angle $\alpha=0$ had symmetric collapse and high energy absorption capacity but the absorber with cell angle $\alpha=90$, had global buckling and the energy absorption value was not suitable.

ضربه گیرها، پوسته‌های جدارنازک استوانه‌ای هستند که با فروریزش در اثر بار محوری نیرو را هدر می‌دهند. این نوع ضربه‌گیرها برگشت ناپذیر هستند و بعد از تغییر شکل دیگر قابل استفاده نمی‌باشند.

اکثر جاذب‌های انرژی یک بار مصرف هستند. یک بار که تغییر شکل پلاستیک می‌دهند دور انداخته می‌شوند. بنابراین الزام طراحی برای چنین جاذب‌هایی معمولاً دستیابی به جذب انرژی بالا با جرم کمتر و با تکیه بر جذب انرژی مخصوص بالا می‌باشند. در میان طراحی‌های مختلف فرآیند لهیدگی محوری معمولاً شامل سه مرحله می‌باشد. اول، نیروی لهیدگی به بیشینه اولیه می‌رسد تا بر مقاومت اولیه جاذب غلبه کند. دوم، نیرو کاهش و نوسان پیدا می‌کند. چون که لهیدگی پیشرفت می‌کند، سوم، نیرو به سرعت

1- مقدمه

در بسیاری از سیستم‌های مهندسی، به خصوص در دستگاه‌های متحرک برای جلوگیری از خسارت یا کاهش آن از سیستم‌های جذب انرژی استفاده می‌کنند. سازه‌های جدار نازک سازه‌هایی دارای استحکام به وزن بالایی هستند و قابلیت جذب انرژی بالایی دارند؛ به همین دلیل مورد توجه صنایع مختلف به خصوص خودروسازی قرار دارد. ضربه گیرها و جاذب‌های انرژی از جمله اجزایی هستند که در برخی سامانه‌ها برای جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به صورت دیگر انرژی استفاده می‌شوند. ضربه گیرهای مکانیکی انرژی جنبشی را توسط انجام کار پلاستیک جذب می‌کنند. مرسوم ترین نوع

افزایش می‌یابد و قسمت‌های له شده را افزایش می‌دهد تا به پایان لهیدگی برسد. [1-2]

به طور کلی ورق‌های مشبک¹ در صنعت تزئینی و اهداف حفاظتی استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر ورق‌های مشبک در صنعت خودروسازی جایگاه مهمی پیدا کرده است. به طور خاص این ورق‌ها در سازه‌های حساس مانند سازه‌های جدارنازک استفاده می‌شوند. علاوه بر اینکه سازه‌های جدار نازک دارای جذب انرژی بالایی هستند (شکل 1)؛ نسبتاً ارزان بوده و دارای وزن کمی می‌باشند. مکانیزم فروریزش در استوانه‌های مشبک بدین صورت است که در ابتدا سلول‌ها با افزایش بار بسته می‌شوند و یک گشتاور پلاستیک نسبت به تقاطع مقطع‌ها در گره‌ها اعمال می‌شود (شکل 2) و این تغییرات پلاستیک به تدریج گسترش می‌یابد. مکانیزم شکست به طور مشخص به صورت لولای پلاستیک در اتصال سلول‌ها می‌باشند. پاسخ نمودارهای نیرو- جابه‌جایی نشان می‌دهد که نیرو به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. این رفتار برای یک سیستم جذب انرژی مطلوب است که در آن باید نیرو به صورت کنترل شده از بین برود. از شکست مدل مکانیکی استوانه‌های مشبک و مشاهده پیکربندی تغییر شکل آن می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم تغییر شکل به صورت لایه‌ای است. گارسیا و همکارانش، فروریزش محوری استوانه‌های ساخته شده از ورق‌های مشبک را مورد بررسی قرار داده‌اند [3-4].

در سال 2001 القمدی [5]، تحقیقاتی که در چهار دهه اخیر بر روی جاذب‌های انرژی که تحت بارگذاری ضربه‌ای صورت گرفته را معرفی کرد. اولایی و همکارانش [6]، دومین مرور کلی بر روی استوانه‌های فلزی که به عنوان جاذب‌های انرژی در اثر فروریزش محوری استفاده می‌شوند را معرفی کرده است. جونز [7]، به مقایسه سیستم‌های جذب انرژی با توجه به فاکتورهای تأثیر گذار در جذب انرژی پرداخته است. نیا و همدانی [8]، پس از مطالعه ظرفیت جذب انرژی جاذب‌های با سطح مقطع‌های مختلف (دایره- ای، مستطیلی، شش ضلعی، مثلثی، هرمی و مخروطی) به این نتیجه رسیدند که جاذب‌های با سطح مقطع دایره‌ای دارای بیشترین ظرفیت جذب انرژی هستند.

با هدف بهینه‌سازی عوامل مؤثر در جذب انرژی، شکل ساختاری سازه به عنوان یک عامل مهم در نظر گرفته می‌شود. وظیفه مهم در توسعه سازه‌های جذب انرژی کاهش نیروی بیشینه اولیه در پاسخ نیرو - جابه‌جایی است. در برنامه‌های کاربردی جاذب‌های انرژی برای پایدار بودن پاسخ سازه تحت بارگذاری شبه استاتیکی، می‌بایست نیروی بیشینه اولیه را کاهش داد. نیروی

مطالعاتی به صورت تجربی و عددی بر روی تغییر شکل لوله‌های جدارنازک با هندسه‌های دایره‌ای تحت بار ضربه‌ای عرضی انجام شده است. مطالعات به منظور بررسی اثر تغییر شکل هندسی برای لوله‌های آلومینیومی بر میزان جذب انرژی و بررسی اثر وجود فوم درون آن جهت جذب انرژی بیشتر ناشی از بارگذاری ضربه‌ای عرضی انجام شده است [13].

با توجه به کاربردهای وسیع جاذب‌های انرژی در صنایع مختلف مانند خودرو، این اجزا را دارای اهمیت بسزایی کرده است. مطالعاتی به صورت تحلیلی و تجربی بر روی مقاطع جدارنازک با سطح مقطع‌های مختلف تحت بار دینامیکی و استاتیکی انجام گرفته است و به مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج تجربی به منظور به کارگیری قابلیت‌های تحلیلی در پیش‌بینی رفتار لوله‌های مختلف پرداخته شده است [14].

سازه‌های ساندویچی با هسته‌ی لانه‌زنبوری می‌تواند به عنوان جاذب انرژی استفاده شود. بررسی‌هایی به صورت تحلیلی و تجربی بمنظور بررسی مقدار جذب انرژی ناشی از نفوذ جسم پرتابه در سازه انجام شده است [15].

در مطالعات صورت گرفته توسط محققان بر روی جاذب‌های مشبک به بررسی رفتار جاذب تحت بارگذاری استاتیکی پرداخته شده است. هدف از این پژوهش بررسی رفتار و نوع فروریزش جاذب با افزایش تعداد سلول‌های طولی تحت بارگذاری ضربه‌ای می‌باشد. تعداد نه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. جاذب‌ها از نظر تعداد سلول‌های طولی و زاویه سلول‌ها دارای تفاوت هستند. جرم و سرعت وزنه ضربه زننده برای تمامی نمونه‌ها ثابت می‌باشد.

2- روش تحقیق

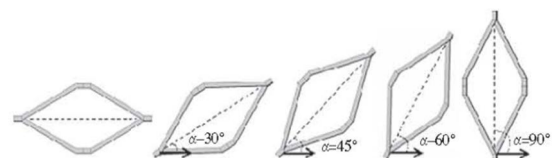
در این پژوهش به بررسی تجربی جاذب‌های مشبک پرداخته شده است. آزمایش‌ها برای دو حالت مختلف سلول‌ها و تأثیر افزایش تعداد سلول‌های طولی صورت گرفته است. در ابتدا نتایج مربوط به جاذب‌های مشبک با زاویه سلول $\alpha = 0$ آورده شده و سپس به زاویه سلول $\alpha = 90$ پرداخته شده است. شرایط بارگذاری برای هر دو حالت یکسان می‌باشد و نوع بارگذاری به صورت ضربه‌ای است. به منظور انجام آزمایش‌ها از دستگاه سقوط وزنه استفاده شده است.

افزایش می‌یابد و قسمت‌های له شده را افزایش می‌دهد تا به پایان لهیدگی برسد. [1-2]

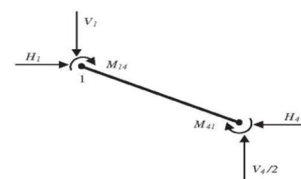
به طور کلی ورق‌های مشبک¹ در صنعت تزئینی و اهداف حفاظتی استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر ورق‌های مشبک در صنعت خودروسازی جایگاه مهمی پیدا کرده است. به طور خاص این ورق‌ها در سازه‌های حساس مانند سازه‌های جدارنازک استفاده می‌شوند. علاوه بر اینکه سازه‌های جدار نازک دارای جذب انرژی بالایی هستند (شکل 1)؛ نسبتاً ارزان بوده و دارای وزن کمی می‌باشند. مکانیزم فروریزش در استوانه‌های مشبک بدین صورت است که در ابتدا سلول‌ها با افزایش بار بسته می‌شوند و یک گشتاور پلاستیک نسبت به تقاطع مقطع‌ها در گره‌ها اعمال می‌شود (شکل 2) و این تغییرات پلاستیک به تدریج گسترش می‌یابد. مکانیزم شکست به طور مشخص به صورت لولای پلاستیک در اتصال سلول‌ها می‌باشند. پاسخ نمودارهای نیرو- جابه‌جایی نشان می‌دهد که نیرو به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. این رفتار برای یک سیستم جذب انرژی مطلوب است که در آن باید نیرو به صورت کنترل شده از بین برود. از شکست مدل مکانیکی استوانه‌های مشبک و مشاهده پیکربندی تغییر شکل آن می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم تغییر شکل به صورت لایه‌ای است. گارسیا و همکارانش، فروریزش محوری استوانه‌های ساخته شده از ورق‌های مشبک را مورد بررسی قرار داده‌اند [3-4].

در سال 2001 القمدی [5]، تحقیقاتی که در چهار دهه اخیر بر روی جاذب‌های انرژی که تحت بارگذاری ضربه‌ای صورت گرفته را معرفی کرد. اولایی و همکارانش [6]، دومین مرور کلی بر روی استوانه‌های فلزی که به عنوان جاذب‌های انرژی در اثر فروریزش محوری استفاده می‌شوند را معرفی کرده است. جونز [7]، به مقایسه سیستم‌های جذب انرژی با توجه به فاکتورهای تأثیر گذار در جذب انرژی پرداخته است. نیا و همدانی [8]، پس از مطالعه ظرفیت جذب انرژی جاذب‌های با سطح مقطع‌های مختلف (دایره- ای، مستطیلی، شش ضلعی، مثلثی، هرمی و مخروطی) به این نتیجه رسیدند که جاذب‌های با سطح مقطع دایره‌ای دارای بیشترین ظرفیت جذب انرژی هستند.

با هدف بهینه‌سازی عوامل مؤثر در جذب انرژی، شکل ساختاری سازه به عنوان یک عامل مهم در نظر گرفته می‌شود. وظیفه مهم در توسعه سازه‌های جذب انرژی کاهش نیروی بیشینه اولیه در پاسخ نیرو - جابه‌جایی است. در برنامه‌های کاربردی جاذب‌های انرژی برای پایدار بودن پاسخ سازه تحت بارگذاری شبه استاتیکی، می‌بایست نیروی بیشینه اولیه را کاهش داد. نیروی



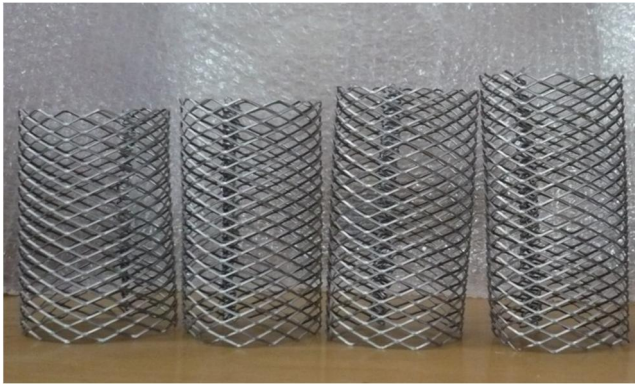
شکل 1 زاویه سلول‌ها [3]



شکل 2 نیرو و گشتاور اعمال شده [3]

بیشینه اولیه در تست‌های فشاری محوری را می‌توان به وسیله‌ی ایجاد نقص

1- Expanded Metal Tube



شکل 5 نمونه‌ها با زاویه سلول $\alpha=0$



شکل 6 نمونه‌ها با زاویه سلول $\alpha=90$

نمونه‌ها در دو حالت $\alpha=90$ و $\alpha=0$ و تعداد سلول طولی متغیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شرایط مرزی و نوع بارگذاری برای تمام نمونه‌ها یکسان می‌باشد. مشخصات نمونه‌ها در جدول 2 و جدول 3 آورده شده است. در جدول 2 و جدول 3، α زاویه سلول، N_C 3 تعداد سلول‌های محیطی، N_L 4 تعداد سلول‌های طولی، D قطر نمونه، L طول، جرم ضربه زننده w_m 5 کیلوگرم، 25 جرم نمونه‌ها و سرعت ضربه زننده $2/6$ متر بر ثانیه می‌باشد. سلول مورد نظر دارای قطرهای $l_1 = 15$ و $l_2 = 10$ میلی‌متر، ضخامت $t=1$ میلی‌متر و پهنای $w=2$ میلی‌متر می‌باشد.

جدول 2 مشخصات نمونه‌ها با زاویه سلول $\alpha=0$

نمونه‌ها	α	N_C	N_L	D (mm)	L (mm)	w_m (gr)
نمونه مشبک 1	0	15	15	100	165	110
نمونه مشبک 2	0	15	16	100	175	120
نمونه مشبک 3	0	15	17	100	185	130
نمونه مشبک 4	0	15	18	100	195	140

1-2- دستگاه تست تجربی

در دستگاه سقوط وزنه¹ یک وزنه با جرم مشخص از ارتفاع مورد نظر سقوط کرده و باعث لهیدگی جاذب می‌شود. به وسیله سنسورهایی که بر روی دستگاه قرار دارد مقادیر نیرو و طول لهیدگی جاذب تعیین می‌شود. بر روی وزنه ضربه زننده یک شتاب سنج قرار دارد. این شتاب سنج به صورتی که در شکل 3 نشان داده شده است به کامپیوتر وصل شده و نمودار تغییرات شتاب - زمان را نمایش می‌دهد. در اثر سقوط وزنه با سرعت مشخص انرژی جنبشی² ایجاد می‌شود. این انرژی به وسیله رابطه (1) محاسبه می‌شود.

$$E_{ie} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

2-2- مشخصات نمونه‌ها

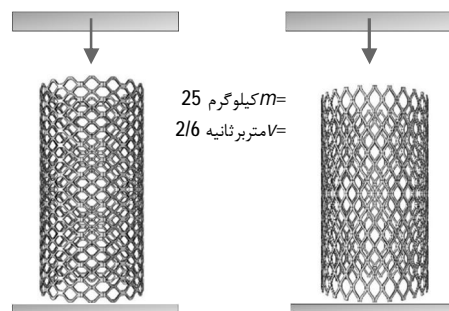
بمنظور انجام تست‌های تجربی نه نمونه تهیه شد. در شکل 4 نوع بارگذاری نشان داده شده است. همچنین در شکل 5 و شکل 6 نمونه‌های با زاویه سلولی $\alpha=90$ و $\alpha=0$ نشان داده شده است که از نظر تعداد سلول‌های طولی با یکدیگر تفاوت دارند. جنس ورق‌های استفاده شده فولاد با استحکام بالا می‌باشد که در جدول 1 مشخصات ماده آورده شده است. بمنظور ایجاد جاذب‌های مشبک، ورق‌های مشبک در ابعاد مورد نظر برش خورده و به صورت استوانه‌ای خم می‌شود. لبه‌های دو طرف ورق کمی خم شده و در یکدیگر قرار می‌گیرد و در نهایت لبه‌های در هم تنیده شده بر روی هم پرس شده تا جاذب استوانه‌ای ایجاد شود.



شکل 3 شماتیک دستگاه سقوط وزنه و سنسور شتاب سنج

جدول 1 خواص ماده

ρ (مترمکعب / کیلوگرم)	ν	E (گیگا پاسکال)
7800	0/3	211



شکل 4 نمونه‌ها و نوع بارگذاری

3- Number Of Circular Cells
4- Number Of Longitudinal Cells
5- Impact mass
6- Impact velocity

1- Drop Hammer
2- impact energy

جدول 3 مشخصات نمونه‌ها با زاویه سلول $\alpha=90$

نمونه‌ها	α	N_C	N_L	D(mm)	L(mm)	w_m (gr)
نمونه مشبک 1-1	90	26	8/5	100	175	120
نمونه مشبک 2-2	90	26	9	100	185	130
نمونه مشبک 3-3	90	26	9/5	100	195	140
نمونه مشبک 4-4	90	26	10	100	205	150
نمونه مشبک 5-5	90	26	10/5	100	215	160



شکل 8 فروریزش نمونه مشبک 2 با زاویه سلول $\alpha=0$



شکل 9 فروریزش نمونه مشبک 3 با زاویه سلول $\alpha=0$



شکل 10 فروریزش نمونه مشبک 4 با زاویه سلول $\alpha=0$

3-3- پارامترهای مؤثر

نیروی بیشینه اولیه (P_{peak})، نیروی میانگین (P_m)، ظرفیت جذب انرژی (E_a) و ضریب شکل (η) پارامترهایی هستند که برای سنجیدن جاذب استفاده می‌شوند (روابط (2) تا (4)). به علاوه پارامترهای دیگری هم وجود دارد، انرژی جذب شده بر واحد وزن (SEA) (رابطه (5))، این پارامترها در سیستم طراحی بسیار مهم هستند و وزن به عنوان فاکتور محدود کننده می‌باشد. مقدار انرژی جذب شده همان سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی می‌باشد. ضریب شکل، از نسبت نیروی میانگین بر نیروی بیشینه اولیه بدست می‌آید. نیروی بیشینه اولیه مربوط به تغییر شکل الاستیک ماده می‌باشد که هرچه مقدار این نیرو کمتر باشد جذب انرژی مطلوب‌تر است. [3].

$$E_a = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad (2)$$

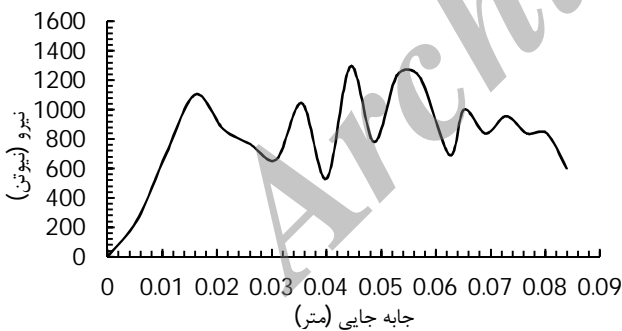
$$P_m = \frac{E_a}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{peak}} \quad (4)$$

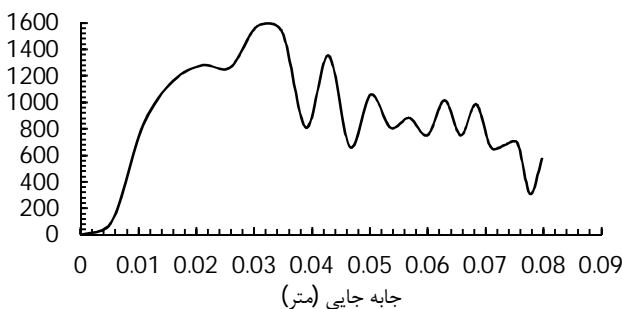
$$SEA_a = \frac{E_a}{w_m} \quad (5)$$

3- نتایج و بحث

ورق‌های مشبک که برای ایجاد جاذب‌های انرژی استفاده می‌شود براحتی قابل دسترس بوده و از نظر قیمت مناسب می‌باشد. به منظور بررسی تجربی این نوع جاذب‌ها و کارآمدی آنها در تست‌های عملی به انجام آزمایش عملی بر روی این نوع جاذب‌ها پرداخته شده‌است. در شکل‌های 7-10 نوع فروریزش و شکل‌های 11-14 نمودارهای نیرو - جابجایی نمونه‌های بازاویه سلول 0 درجه و در شکل‌های 15-19 نوع فروریزش و شکل‌های 20-24 نمودارهای نیرو - جابجایی نمونه‌های با زاویه سلول 90 درجه آورده شده است.



شکل 11 نمودار نیرو - جابجایی نمونه مشبک 1



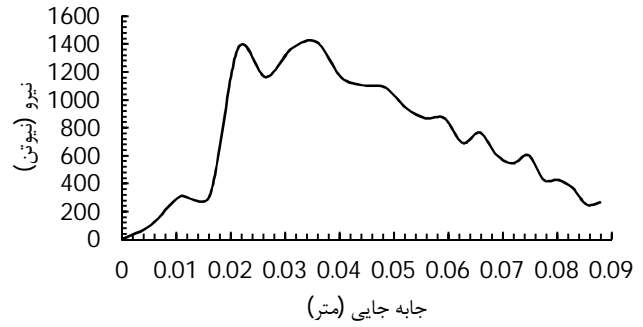
شکل 12 نمودار نیرو - جابجایی نمونه مشبک 2



شکل 7 فروریزش نمونه مشبک 1 با زاویه سلول $\alpha=0$



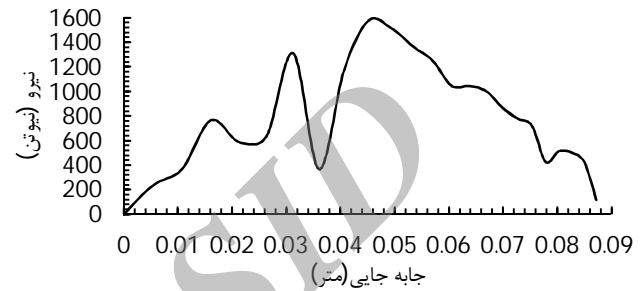
شکل 18 فروریزش نمونه مشبک 4-4 با زاویه سلول $\alpha=90$



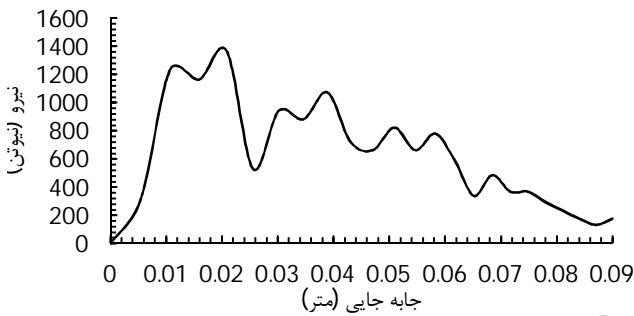
شکل 13 نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه مشبک 3



شکل 19 فروریزش نمونه مشبک 5-5 با زاویه سلول $\alpha=90$



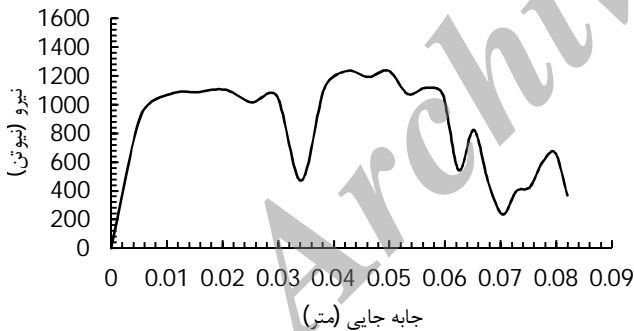
شکل 14 نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه مشبک 4



شکل 20 نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه مشبک 1-1



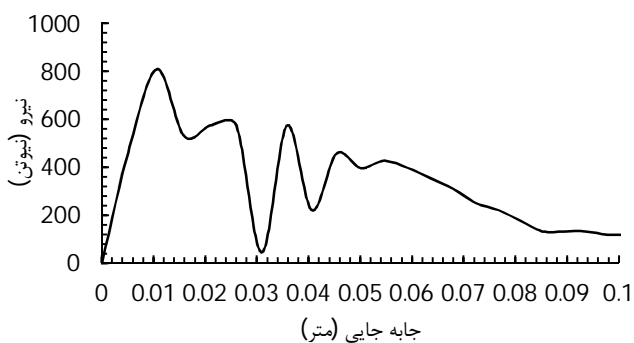
شکل 15 فروریزش نمونه مشبک 1-1 با زاویه سلول $\alpha=90$



شکل 21 نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه مشبک 2-2



شکل 16 فروریزش نمونه مشبک 2-2 با زاویه سلول $\alpha=90$



شکل 22 نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه مشبک 3-3



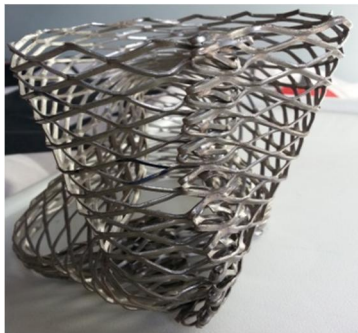
شکل 17 فروریزش نمونه مشبک 3-3 با زاویه سلول $\alpha=90$

افزایش بیش از حد طول نمونه‌ها باعث ایجاد کماتش می‌شود. طبق آزمایش‌های انجام شده این نتیجه حاصل شد که در جاذب‌های با زاویه سلول $\alpha=0$ اگر نسبت طول به قطر جاذب کمتر $2/15$ باشد پدیده کماتش رخ نمی‌دهد و فروریزش به صورت کاملاً متقارن انجام می‌شود. تمامی نتایج مربوط به این نوع جاذب‌ها در جدول 4 و نمودارها در شکل 27 نشان داده شده است.

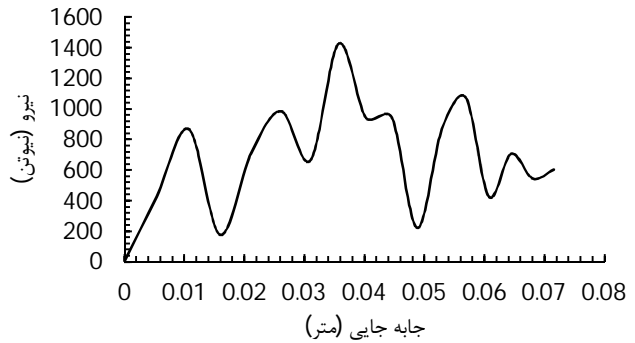
تمامی سطح مقطع جاذب دارای ضخامت یکسانی می‌باشد. قسمتی از جاذب که در آن لبه‌ها روی یکدیگر قرار گرفته‌اند دارای ضخامت بیشتری نسبت به قسمت‌های دیگر نیست چون که لبه‌ها بر روی یکدیگر بعد از تنیده شدن پرس شده‌اند. فرآیند لهیدگی تحت بارگذاری ضربه‌ای در زمان بسیار کمی رخ می‌دهد. در واقع سرعت فروریزش و نیروی ضربه‌ای زیاد بوده و فرصتی برای به وجود آوردن عدم تقارن در هنگام فروریزش ایجاد نمی‌شود. جاذب‌های با زاویه سلول $\alpha=90$ به دلیل مقاومت طولی که دارند دچار کماتش می‌شوند. از آزمایش‌های انجام شده مشاهده شد که تمامی نمونه‌ها در اثر کماتش کلی فروریزش کردند. کماتش ایجاد شده در جاذب باعث می‌شود که مقدار جذب انرژی خوبی نداشته باشند و مقدار نیروی بیشینه اولیه و نیروی میانگین مناسبی به عنوان یک جاذب کارآمد نداشته باشند. کماتش ایجاد شده برای تمام نمونه‌ها به صورت یکسان نبود به همین دلیل مقادیر نیروها دارای اختلاف است. کماتش ایجاد شده باعث می‌شود که نمونه‌ها جذب انرژی خوبی نداشته باشند و بخشی از نیروی ضربه را انتقال می‌دهد. تمامی نتایج مربوط به این نوع جاذب‌ها در جدول 5 و نمودارها در شکل 28 نشان داده شده است. همانطور که گفته مکانیزم فروریزش در بارگذاری ضربه مورد توجه قرار می‌گیرد. جاذب‌های مشبک با زاویه سلول 90 درجه دارای مکانیزم فروریزش متقارنی تحت بار ضربه‌ای محوری نیستند و در اثر اعمال نیرو دچار کماتش کلی می‌شوند بنابراین نمی‌توانند به عنوان یک جاذب کارآمد جذب انرژی خوبی داشته باشند.



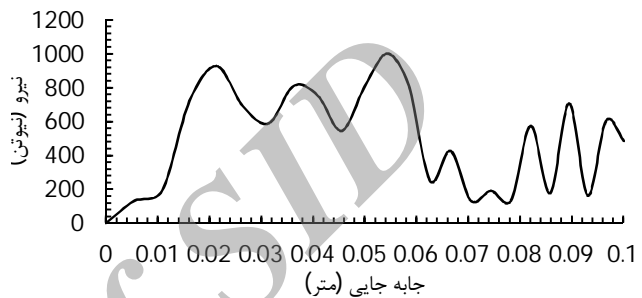
شکل 25 نحوه بسته شدن سلول‌ها روی یکدیگر بعد از فروریزش ($\alpha=0$)



شکل 26 اتصال لبه‌ها بعد از فروریزش ($\alpha=0$)



شکل 23 نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه مشبک 4-4



شکل 24 نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه مشبک 5-5

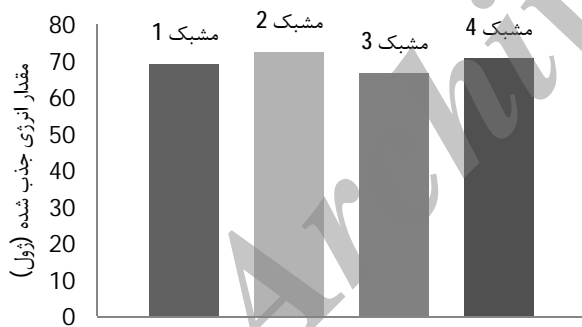
دو نوع جاذب مورد آزمایش قرار گرفت. ابتدا جاذب‌های با زاویه سلول $\alpha=0$ و سپس جاذب‌های با زاویه سلول $\alpha=90$ با شرایط یکسان مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به نتایج آزمایش و مشاهدات صورت گرفته می‌توان بیان کرد که جاذب‌های مشبک با زاویه سلول $\alpha=0$ که در شکل‌های 25 و 26 مشاهده می‌شود دارای فروریزش متقارن بودند و در اثر فروریزش سلول‌ها بروی یکدیگر بسته می‌شدند و دارای یک مکانیزم فروریزش کارآمدی هستند. در برخی از نمونه‌ها به دلیل ایجاد نقص در استوانه‌ها کماتش نقطه‌ای ایجاد شد و وجود خطاهای آزمایش سبب به وجود آمدن اختلاف‌هایی در نمودارها و مقادیر نیرو شد. همچنین نمودارهای نیرو - جابه‌جایی آن‌ها با توجه به نوع فروریزش دارای نوسانات نسبتاً منظمی هستند. داده‌هایی که از نمودارها بدست آمد نشان می‌دهد که نیروی بیشینه اولیه مناسب بوده و به نیروی میانگین نزدیک می‌باشد که محاسبه‌ی ضریب شکل بیانگر این مطلب است. نیروی بیشینه اولیه مربوط به تغییر شکل الاستیک ماده می‌باشد. در جاذب‌های مشبک مقدار این نیرو کم است و در اثر اعمال نیروی محوری به صورت کاملاً پلاستیک فروریزش می‌کند و مقاومتی در برابر نیروی ضربه‌ای ندارد و با فروریزش خود مقدار زیادی از نیروی ضربه را جذب می‌کند. ظرفیت جذب انرژی برای تمام نمونه‌ها محاسبه شد. تمامی نمونه‌ها تقریباً دارای میزان جذب انرژی یکسانی می‌باشند و تنها در میزان لهیدگی نسبت به طول اولیه دارای تفاوت می‌باشند که نشان دهنده این است که با افزایش تعداد سلول‌های طولی می‌توان بازده لهیدگی را افزایش داد و با افزایش بازده لهیدگی و وجود سلول‌های بیشتر ظرفیت جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل‌های 7-10 مشاهده می‌کنید، سلول‌هایی وجود دارند که دچار لهیدگی نشده‌اند. به این معنی است که جاذب همچنان دارای ظرفیت جذب انرژی است و تنها در اثر لهیدگی بخشی از آن انرژی جذب شده است. این مطلب بیانگر بازده لهیدگی می‌باشد. در بارگذاری ضربه‌ای مکانیزم فروریزش دارای اهمیت است. بنابراین می‌بایست به این نکته توجه کرد که

جدول 4 نتایج تجربی مربوط به نمونه های با زاویه $\alpha=0$

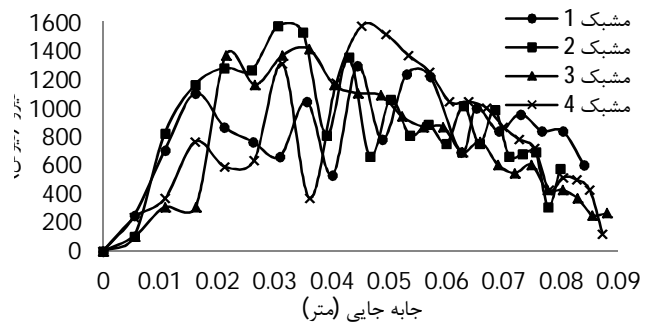
نمونه ها	نیروی بیشینه اولیه	نیروی میانگین	طول لهیدگی δ (mm)	جذب انرژی E (J)	انرژی ضربه E_{ie} (J)	درصد لهیدگی δ/L	ضریب شکل η	SEA (J/gr)
نمونه مشبک 1	1103/438	826/2	83/884	69/3	84/5	51%	0/75	0/63
نمونه مشبک 2	1280	909	79/749	72/5	84/5	45/6%	0/71	0/6
نمونه مشبک 3	1368	760	87/919	66/8	84/5	47/5%	0/6	0/52
نمونه مشبک 4	1309/413	809/8	87/183	70/6	84/5	44/8%	0/62	0/5

جدول 5 نتایج تجربی مربوط به نمونه های با زاویه $\alpha=90$

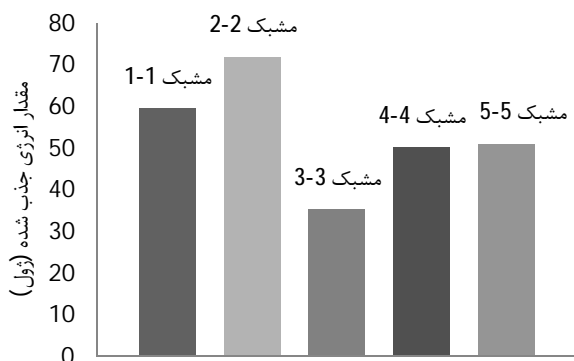
نمونه ها	نیروی بیشینه اولیه	نیروی میانگین	طول لهیدگی δ (mm)	جذب انرژی E (J)	انرژی ضربه E_{ie} (J)	درصد لهیدگی δ/L	ضریب شکل η	SEA (J/gr)
نمونه مشبک 1-1	1235/85	661/3	89/978	59/5	84/5	48/7%	0/54	0/49
نمونه مشبک 2-2	1074/013	865	81/971	71/9	84/5	42%	0/8	0/55
نمونه مشبک 3-3	809/1879	330	97/784	32/2	84/5	47/7%	0/4	0/23
نمونه مشبک 4-4	868/0375	700/3	71/541	50/1	84/5	33/3%	0/8	0/334
نمونه مشبک 5-5	926/8875	527/7	96/654	51	84/5	43%	0/57	0/32



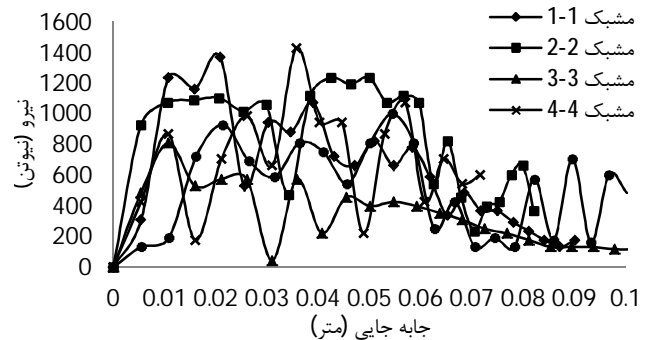
شکل 29 مقدار انرژی جذب شده مربوط به نمونه های با زاویه $\alpha=0$



شکل 27 نمودار نیرو - جابه جایی نمونه های $\alpha=0$



شکل 30 مقدار انرژی جذب شده مربوط به نمونه های با زاویه $\alpha=90$



شکل 28 نمودار نیرو - جابه جایی نمونه های $\alpha=90$

مقادیر انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها در شکل 29 و شکل 30 آورده شده است.

4- نتیجه گیری

از بررسی های انجام گرفته نتایج زیر حاصل شد.

1- جاذب های انرژی مشبک به دلیل شکل سازه ای که دارند دارای مکانیزم فروریزش متقارن می باشند. همین امر سبب منظم بودن نمودار نیرو - جابه جایی شده است. همچنین در این نوع جاذب ها نیروی بیشینه اولیه مقدار کمی دارد و به نیروی میانگین نزدیک است. محاسبه ی ضریب شکل یا بازده نیروی لهیدگی بیانگر همین موضوع است. از ضریب شکل های محاسبه شده این نتیجه حاصل می شود که جاذب های انرژی مشبک دارای بازده بالایی در میزان جذب انرژی هستند.

2- افزایش تعداد سلول های طولی در جاذب های با زاویه سلول 0 درجه تأثیر قابل توجهی بر روی نیروی بیشینه اولیه و نیروی میانگین ندارد. لهیدگی سلول ها باعث اتلاف انرژی می شود. بنابراین با افزایش تعداد سلول - های طولی می توان ظرفیت جذب انرژی را افزایش داد. همانطور که در جدول 4 مشاهده می شود، طول لهیدگی تمامی نمونه ها یکسان می باشد و در همه ی نمونه ها به یک مقدار تغییر شکل داده اند و مشاهده می شود که دارای جذب انرژی یکسانی هستند.

3- زاویه سلول ها تأثیر زیادی در رفتار جاذب دارد. همانطور که مشاهده شد، جاذب های با زاویه سلول 0 دارای مکانیزم فروریزش متقارن بودند و نمودار نیرو-جابه جایی یکنواختی داشتند. همچنین این نوع جاذب ها از نظر نیروی بیشینه اولیه و ظرفیت جذب انرژی بسیار مناسب هستند. از طرفی جاذب های با زاویه سلول 90 همگی دچار کماتش شدند و نمودارهای نیرو-جابه جایی آن ها پیوستگی خوبی نداشتند. همچنین به دلیل کماتش ایجاد شده از نظر جذب انرژی هم مناسب نبودند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که استفاده از جاذب های مشبک با زاویه سلول 0 بسیار کارآمد تر بوده و بازده انرژی بالایی دارند.

4- یکی از پارامترهای مهم در جاذب های انرژی که به آن توجه می شود انرژی ویژه یا بازده انرژی (SEA) می باشد. این پارامتر از نسبت انرژی جذب شده توسط جاذب بر جرم جاذب بدست می آید. جاذب های مشبک دارای وزن کمی هستند و انرژی زیادی را جذب می کنند و هدف از محاسبه این پارامتر بیان جرم کم ورق های مشبک بوده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که این نوع جاذب ها دارای بازده انرژی بالایی هستند. همچنین مشاهده شد که با افزایش ضریب شکل یا بازده نیروی لهیدگی مقدار انرژی ویژه هم افزایش می یابد.

5- مراجع

- [1] Ghamarian, A., H.R. Zarei, and M.T Abadi, Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-filled End-capped Conical Tubes, *Thin-walled Structural*, Vol. 49, No. 10, pp. 1312-1319, 2011.
- [2] Jie Song, Yan Chen, Guoxing Lu. Light-Weight thin-walled structures whit patterned windows under axial crushing, *International Journal of Mechanical Sciences* 66, pp. 239-248, 2013.
- [3] C.Garciano, G.Martinez, D.Smith. Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes, *Thin-Walled Structures* 47, pp. 953-961, 2009.
- [4] C.Garciano, G.Martinez, A.Gutierrez. Failure mechanism of expanded metal tubes under axial crushing, *Thin-Walled Structures* 51, pp. 20-24, 2012.
- [5] AAA. Alghamdi. Collapsible impact energy absorbers an overview, *Thin-Walled Structures* 39, pp. 189-213, 2001
- [6] AG. Olabi, Morris E. Hashmi, Metallic tube type energy absorbers a synopsis, *Thin-Walled Structures* 45(7-8), pp. 706-26, 2007.
- [7] N. Jones, Energy-absorbing effectiveness factor, *International Journal of Impact Engineering* 37, pp. 754-65, 2010.
- [8] AA. Nia, JH. Hamedani, Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries, *Thin-Walled Structures* 48, pp.946-54, 2010
- [9] X. Zhang, G. Cheng, Z. You, H. Zhang, Energy absorption of axially compressed thin-walled square tubes with patterns, *Thin-Walled Structures* 45(9), pp. 737-46, 2007.
- [10] C. Graciano, G. Martínez, A. Gutierrez, Energy absorption of axially crushed expanded metal tubes, *Thin-Walled Structures* 71, pp. 134-146, 2013.
- [11] Qu. Hui, Huo. Jingsi, Xu. Chao, Fu. Feng, Numerical studies on dynamic behavior of tubular T-joint subjected to impact loading, *International Journal of Impact Engineering* 67, pp. 12-26, 2014.
- [12] Y.S. Tai, M.Y. Huang, H.T. Hu, Axial compression and energy absorption characteristics of high-strength thin-walled cylinders under impact load, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 53, pp. 1-8, 2010.
- [13] M. Chobini, Gh.H. Liaghat, Experimental and Numerical investigation of energy absorption and deformation of thin-walled tube with various geometry cross-section under lateral Impact loading, *Tarbiat Modares University*, 2013. (In Persian)
- [14] A. Meshkin zar, M. Darvizeh, A. Darvizeh, Analytical and experimental study of thin-walled sections for energy absorption under static and dynamic loading, *Gilan University*, 2012. (In Persian)
- [15] N. Pirmohammadi, Gh. H. Liaghat, M. H. Pol, H. Sabouri, Analytical, experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 153-164, 2014. (In Persian)