

## مدلسازی و مقایسه رفتار مکانیکی سازه‌های جدار نازک آلومینیومی با و بدون فوم پلی یورتان در نرم افزار LS-DYNA و ارائه یک مدل شبکه عصبی مصنوعی

میشم رستمی<sup>۱</sup>، مجتبی حسنلو<sup>۲\*</sup> و مصطفی سیاوشی<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول: m.hasanlou@aol.com

### واژه‌های کلیدی

سازه جدار نازک، فوم پلی یورتان، جذب انرژی، رفتار مکانیکی، شبکه عصبی، LS-DYNA

تاریخ ارسال: ۱۳۹۴/۰۷/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۲۹

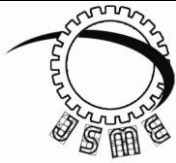
### چکیده

قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک با مقاطع مختلف همواره مورد توجه محققان بوده است. این سازه‌ها بعنوان جاذب‌های انرژی در صنایع مختلف از جمله اتومبیل‌سازی و هوافضا مورد استفاده وسیعی قرار می‌گیرند و سبب حفاظت از سرنشینان و محوله‌ها در حین برخورد می‌شوند. در این مقاله رفتار مکانیکی سازه‌های جدار نازک از جنس آلومینیوم با فوم پرکننده پلی یورتان و بدون فوم تحت بارگذاری محوری ضربه‌ای بررسی شده است. سازه‌ها از نوع خیلی نازک می‌باشند بطوریکه برای نمونه استوانه‌ای رابطه  $(D/t) \approx 550$  برقرار است. تحلیل اجزا محدود و شبیه‌سازی توسط نرم افزار LS-DYNA انجام شده است. سازه‌های جدار نازک دارای مقاطع دایروی، شش ضلعی و چهار ضلعی با طول، ضخامت و اندازه محیط مقطع یکسان می‌باشند. نتایج حاصل از پژوهش بیانگر آن است که سازه با مقطع دایروی از مقاطع چهار گوش و شش گوش انرژی بیشتری جذب می‌نماید در حالیکه تغییر طول کمتری را تجربه می‌کند. بعلاوه می‌توان اثرات تمرکز تنش را در کنج‌های مقاطع مربع و شش ضلعی بر روی جداره سازه‌ها مشاهده کرد. همچنین سازه با مقطع دایروی به صورت متقارن‌تر تحت بارگذاری دینامیکی فشرده می‌گردد در حالیکه سازه‌های جدار نازک با مقاطع شش و چهار ضلعی تمایل به کمانش دارند. در پایان نیز معماری از یک شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده است تا با کمک آن و بهره‌گیری از داده‌های LS-DYNA بتوان رفتار جذب انرژی و نیروی این سازه‌ها را در قالب مدلی در شبکه عصبی بیان نمود. نتایج مدل پیشنهادی در مقایسه با نتایج تحلیلی نرم‌افزار LS-DYNA دقت قابل قبولی داشتند.

۱- مربی، دانشکده فنی، دانشگاه پیام‌نور قزوین، قزوین.

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت.

۳- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت.



Journal of  
Solid Mechanics in  
Engineering

## Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://www.jsme.iaukhsh.ac.ir>



### Modeling & Comparison of Mechanical Behavior of Foam Filled & Hollow Aluminum Tubes by LS-DYNA & Introducing a Neural Network Model

M. Rostami<sup>1</sup>, M. Hasanlou<sup>2</sup> and M. Siavashi<sup>3</sup>

\* Corresponding Author: m.hasanlou@aol.com

#### Abstract:

Energy absorption capability of thin-walled structures with various cross sections has been considered by researchers up to now. These structures as energy absorbers are used widely in different industries such as automotive and aerospace and protect passengers and goods against impact. In this paper, mechanical behavior of thin-walled aluminum tubes with and without polyurethane foam filler subjected to axial impact has been investigated. The tubes are very thin so that  $(D/t) \approx 550$  governs for cylindrical specimen. Structure behavior was analyzed through finite element analysis by LS-DYNA. Circular, hexagonal, and square cross sections with the same length, thickness, and circumference of sections were studied. The results show that circular cross section has the highest energy absorption while experiences the lowest change in length compared to hexagonal and square cross sections. Besides, the effects of stress concentration in hexagonal and square sections can be observed on the corners of walls. Also under the dynamic loading circular structure was crushed more symmetric, while hexagonal and square structures tended to the buckling. Also an Artificial Neural Network is introduced to predict load & energy Absorption behavior. The Neural Network's data obtained from LS-DYNA. The introduced model could present acceptable results in comparison with analysis of LS-DYNA.

#### Key words:

Thin Walled Structures,  
Polyurethane Foam,  
Energy Absorption,  
Mechanical Behavior,  
Neural Network,  
LS-DYNA.

1- Lecturer, Mechanical Engineering, Payame Noor University of Qazvin, Qazvin, Iran.

2- M.Sc., Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

3- M.Sc., Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

## ۱- مقدمه

استفاده نمودند که پیش بینی رفتار سپر در حین برخورد توسط شبیه‌سازی نرم افزاری در مقایسه با نمونه‌های آزمایشگاهی با دقت قابل قبولی بدست آمد. در [۲] بررسی سازه لانه زنبوری آلومینیومی<sup>۴</sup> تحت برخورد محوری با سرعت زیاد صورت پذیرفته است. آزمایشات نشان دادند که قابلیت جذب انرژی سازه‌های لانه زنبوری با افزایش سرعت برخورد بهبود می‌یابد.

در بسیاری از سیستم‌های مهندسی جذب انرژی هنگام برخورد یکی از ضروریات می‌باشد. سازوکارهای متنوعی برای جذب و مستهلک کردن انرژی ضربه استفاده می‌شود که در میان آنها می‌توان به اصطکاک، شکست، خمش یا پیچش پلاستیک و له شدن اشاره کرد. سازه‌های جدار نازک پر شده با فوم دارای وزنی سبک هستند و قابلیت جذب انرژی بالایی دارند. همچنین خواص مکانیکی و توانایی جذب انرژی این سازه‌ها به خواص مواد بکار گرفته شده و شکل هندسی آنها بستگی دارد. سازه‌های جدار نازک از متداولترین سیستم‌های حفاظت از ضربه هستند که انرژی جنبشی را به انرژی بازگشت‌ناپذیر تغییر شکل پلاستیک تبدیل می‌کنند. نتایج آزمایشگاهی در [۳] نشان دادند که تغییر شکل در طول بارگذاری محوری سازه‌های جدار نازک استوانه‌ای ممکن است به سه طریق صورت پذیرد: متقارن شش ضلعی<sup>۵</sup>، نامتقارن الماسی<sup>۶</sup> و ترکیبی. که نوع تغییر شکل در سازه‌ها به نسبت قطر به ضخامت و قطر به طول سازه بستگی دارد. سیتزبرگر و همکاران [۴] آزمایشات خود را بر روی سازه‌های جدار نازک با مقاطع دایروی و مربع شکل انجام دادند. سازه‌های مورد بررسی از جنس

پلی یورتان یک پلیمر ترموست می‌باشد که از ترکیب متیلن دی ایزوسیانات<sup>۱</sup> با پلیول<sup>۲</sup> و برخی افزودنی‌های شیمیایی دیگر پدید می‌آید. با انتخاب این افزودنی‌ها و تغییر شرایط شیمیایی و فیزیکی فرایند واکنش، می‌توان خواص گوناگونی را برای کاربردهای متنوعی به وجود آورد. در صنایع اتومبیل‌سازی از نوع فوم نرم پلی یورتان در ساخت قطعات تریم داخلی خودرو نظیر صندلی‌ها، قریلیک فرمان، دستگیره‌ها و غیره استفاده می‌شود. همچنین پلی یورتان به صورت فوم ساختاری<sup>۳</sup> در ساخت قطعاتی نظیر سپر خودرو استفاده می‌گردد.

جاذب انرژی، جذب کننده نوعی از انرژی و مبدل آن به انرژی یا انرژی‌های دیگر است. جاذب‌های انرژی همیشه مورد توجه بشر قرار داشته‌اند، از جاذب‌های انرژی خورشید گرفته تا انواع جاذب‌های شوک مکانیکی از قبیل میراگرهای زلزله در ساختمان‌ها و جاذب‌های ضربه در اتومبیل‌ها. اولین نوع جاذب‌های بکار رفته در اتومبیل از قبیل تایر و تعبیه فنر در زیر شاسی بیشتر جنبه آسودگی و راحتی برای مسافری را در بر می‌گرفت. با افزایش آمار تصادفات و مرگ و میر ناشی از استهلاک ناگهان انرژی جنبشی و توقف خودرو از طریق یک برخورد شدید مهندسی به فکر طراحی سپرهایی با جذب انرژی بالا در خودروها افتادند. هنسن و همکاران [۱] یک سپر خودرو با پرکننده فوم آلومینیوم طراحی نمودند و آنرا بصورت آزمایشگاهی تحت بارگذاری دینامیکی قرار دادند. همچنین از نرم افزار LS-DYNA برای شبیه‌سازی فرآیند برخورد

<sup>4</sup> Aluminum Honeycomb<sup>5</sup> Axisymmetric Concertina<sup>6</sup> Non-axisymmetric Diamond<sup>1</sup> Methyl Di Isocyanate<sup>2</sup> Polyol<sup>3</sup> Structural Foam

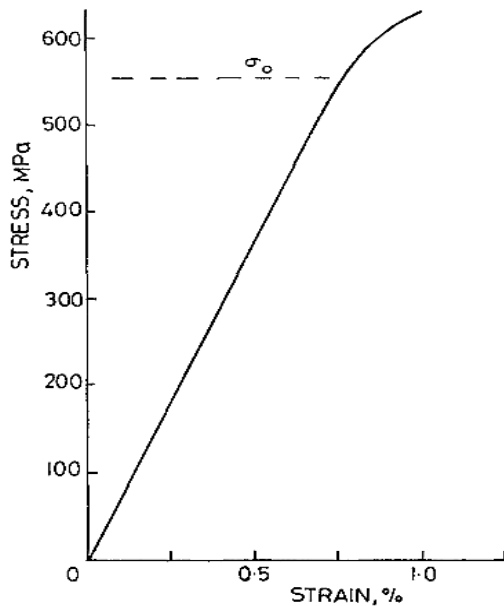
فولاد نرم پر شده با فوم آلومینیوم بودند. آنها نشان دادند که برهم کنش بین فوم و جداره سازه فاصله چین خوردگی‌ها را کاهش می‌دهد، بنابراین نیروی جذب شده توسط سازه افزایش پیدا می‌کند. در [۵] از الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای بدست آوردن شکل بهینه یک سازه آلومینیومی تو پر مقطع مربع استفاده شده است. همچنین زارعی و کراگر [۶] و [۷] از تکنیک طراحی بهینه چند هدفی برای به حداکثر رساندن جذب انرژی و به حداقل رساندن وزن سازه‌های جدار نازک آلومینیومی استفاده کرده‌اند.

جذب انرژی در برخورد شبه استاتیک سازه‌های جدار نازک استوانه‌ای و مخروطی با فوم پلی یورتان و بدون آن در [۹۰۸] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی و عددی اثرگذاری فوم پرکننده را در افزایش جذب انرژی در این سازه‌ها نشان دادند.

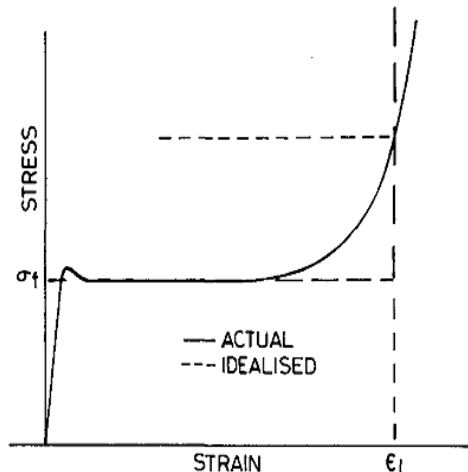
گوپتا و ولمورگان [۱۰] روی سازه‌های جدار نازک مخروطی کامپوزیتی مطالعه کردند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که جذب انرژی در سازه‌های مخروطی پر شده با فوم نسبت به سازه‌های توخالی به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. در [۱۱] سازه‌هایی با مقاطع شش گوش، هشت گوش و ستاره‌ای تحت بار شبه استاتیکی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که افزایش تعداد گوشه‌های داخلی در مقاطع ستاره‌ای، بهبود جذب انرژی سازه را در پی دارد. یاماشیتا و همکاران [۱۵] بررسی بارگذاری ضربه‌ای محوری روی سازه‌های جدار نازک توخالی با مقطع دایروی و مقاطع چند ضلعی ۴، ۵ و ۱۲ ضلع از جنس آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۳ اکستروژن شده انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان دادند که افزایش تعداد اضلاع سبب افزایش مقاومت در برابر لهیدگی و افزایش جذب انرژی می‌گردد. ردی و وال [۱۲] استوانه‌های جدار نازک با فوم پلی یورتان را در شرایط بارگذاری دینامیکی و

شبه استاتیکی مورد بررسی قرار دادند. رید و همکاران [۱۳] بارگذاری محوری دینامیکی و استاتیکی سازه‌های جدار نازک با مقاطع مستطیل و مربع را به صورت خالی و پر شده با فوم پلی یورتان مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایشات آنها نشان داد که جذب انرژی با افزایش چگالی فوم افزایش می‌یابد. همچنین در نمونه‌های پر شده با فوم تغییر شکل‌ها و چین خوردگی‌ها متقارن‌تر و منظم‌تر شده بودند. گامیرو و سیرن [۱۴] نیز رفتار استوانه‌های جدار نازک آلومینیومی با پرکننده چوب پنبه را تحت بارگذاری دینامیکی بررسی کردند.

در این مقاله شبیه‌سازی و تحلیل اجزا محدود برخورد محوری سازه‌های جدار نازک توسط نرم‌افزار LS-DYNA انجام شده است. سازه‌های جدار نازک از جنس آلومینیوم با مقاطع دایروی، شش گوش و چهار گوش هستند که در حالت خالی و پر شده با فوم پلی یورتان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سازه‌ها از نوع خیلی نازک هستند بطوریکه برای نمونه استوانه‌ای رابطه  $(D/t) \approx 550$  برقرار است که  $D$  قطر و  $t$  ضخامت جداره نمونه استوانه‌ای است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تاثیر مقاطع مختلف در رفتار مکانیکی پس از برخورد سازه‌ها می‌باشد. تغییر شکل دائمی، نحوه توزیع تنش در جداره و قابلیت جذب انرژی سازه‌ها در این پژوهش نشان داده شده است. همچنین در این مقاله با استفاده از شبکه عصبی و بکارگیری داده‌های استخراجی از LS-DYNA توانسته‌ایم مدلی نزدیک به داده‌های تحلیلی ارائه نماییم. در بخش بعدی مقاله مدل-سازی اجزا محدود مسئله توصیف شده است. بخش سوم نیز تغییر شکل دائم سازه‌ها پس از برخورد را نشان داده است. بخش چهارم مربوط به مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. بخش‌های پنجم و ششم نیز به بررسی نتایج بدست آمده از



شکل (۱) منحنی تنش-کرنش مهندسی سازه آلومینیومی [۱۲].



شکل (۲) نمونه منحنی تنش-کرنش فوم پلی یورتان [۱۲].

در مورد شبیه‌سازی سازه‌های جدار نازک توپر و توخالی با مقاطع شش ضلعی و چهار ضلعی، طول سازه‌ها و محیط مقاطع مورد نظر و دیگر خواص مکانیکی با طول، محیط و خواص مکانیکی مقطع دایروی مذکور یکسان است تا بتوان در شرایطی برابر جذب انرژی و تغییر شکل دائمی را بررسی نمود.

## ۲-۱- جنس و خواص

برای سازه جدار نازک آلومینیومی از جنس

\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY

استفاده شده است. همچنین برای جنس فوم پلی یورتان

شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار و نتیجه‌گیری و بحث پیرامون آنها اختصاص دارند.

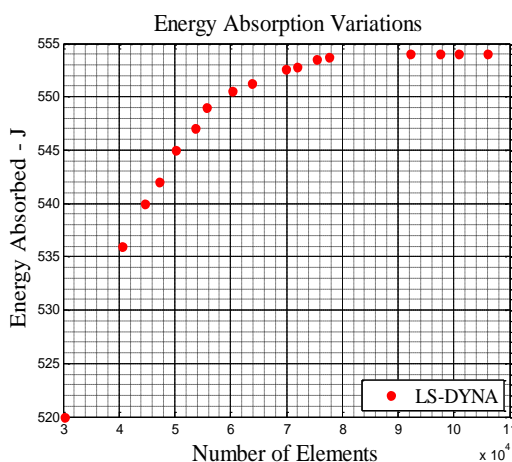
## ۲- مدل‌سازی

نحوه مدل‌سازی و خواص سازه‌ها در شبیه‌سازی عددی همانند خواص مواد بکار گرفته شده در آزمایش ردی و وال [۱۲] می‌باشند. در آزمایش مذکور رفتار یک استوانه جدار نازک با ضخامت ۰/۱۲ میلی‌متر، طول اولیه ۱۴۸ میلی‌متر و قطر ۶۵ میلی‌متر از جنس آلومینیوم آلیاژی با چگالی  $2900 \text{ Kg/m}^3$ ، تنش تسلیم  $550 \text{ MPa}$ ، مدول یانگ  $78/5 \text{ GPa}$  و ضریب پواسان ۰/۳۳ (رفتاری شبیه به آلومینیوم ۲۰۹۰-۸۶T) و همچنین فوم پلی یورتان با چگالی  $80 \text{ Kg/m}^3$ ، مدول یانگ  $25 \text{ MPa}$  و ضریب پواسان صفر که داخل استوانه جدار نازک قرار می‌گیرد، مورد بررسی می‌باشد. منحنی تنش-کرنش سازه آلومینیومی و فوم پرکننده به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. توسط یک وزنه ۵۲ کیلوگرمی از فاصله ۱/۷۵ متری بالای استوانه توپر و با سرعتی معادل ۵/۲ متر بر ثانیه به نمونه استوانه توپر ضربه زده می‌شود. بر اساس مرجع [۱۲] سرعت واقعی وزنه ۸۸ درصد سرعت به دست آمده از رابطه (۱) می‌باشد. در شبیه‌سازی عددی بدلیل دستیابی به تغییر طول یکسان در مقاطع توپر و توخالی یکسان، مدت زمان شبیه‌سازی از لحظه رهایی وزنه تا اتمام بارگذاری برای سازه‌های توپر ۰/۰۳ ثانیه و برای سازه‌های توخالی ۰/۰۲۴ ثانیه در نظر گرفته شده است.

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

که  $m$  جرم وزنه،  $g$  شتاب گرانش،  $h$  فاصله وزنه از استوانه و  $v$  سرعت وزنه می‌باشد.

طور کامل حل شدند. برای انتخاب تعداد المان بهینه، تعداد المان‌های سازه توپر مقطع مربع نسبت به انرژی جذب شده در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳) تغییرات جذب انرژی نسبت به تعداد المان‌ها (مقطع مربع توپر).

انتخاب المان بهینه علاوه بر افزایش دقت حل مسئله در کاهش زمان حل مسئله نیز موثر است.

### ۳- تغییر شکل سازه‌ها

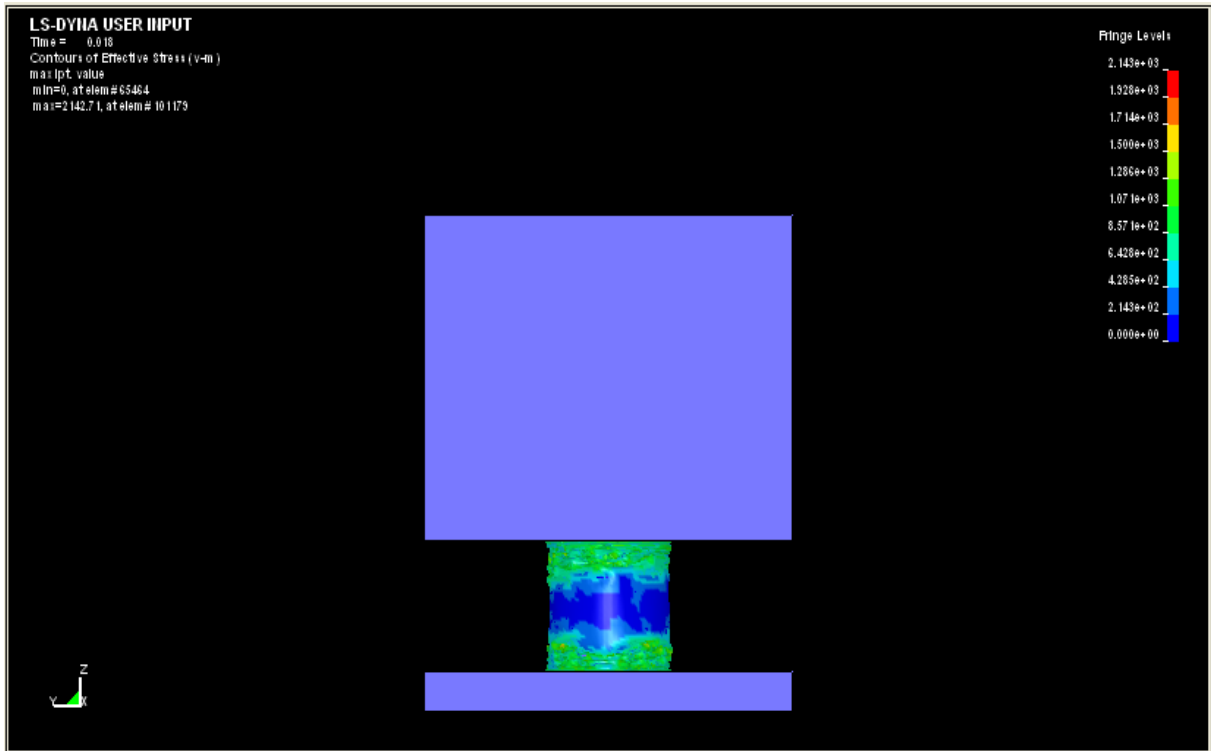
تغییر شکل و توزیع تنش در سازه‌ی توپر مقطع دایروی ۰/۰۱۸ ثانیه پس از بارگذاری در شکل ۴ نشان داده شده است. در تصویر ۵ نیز تغییر شکل و توزیع تنش مقطع توپر شش ضلعی ۰/۰۱۸ ثانیه پس از بارگذاری قابل مشاهده است. این مقطع در طول بارگذاری تمایلی کمی به کمانش دارد و می‌توان حداکثر تنش را روی کنج‌های جداره سازه مشاهده کرد که در مقطع دایروی بدلیل نداشتن کنج، این پدیده رویت نمی‌شود. مقطع مربع از بین سه مقطع توپر مورد بررسی کمترین جذب انرژی را داراست، همچنین این مقطع در حین بارگذاری دچار کمانش می‌گردد که در شکل ۶ می‌توان این موضوع را مشاهده کرد. در مقطع توپر مربع مانند مقطع شش ضلعی می‌توان حداکثر تنش را روی کنج-های مقطع مشاهده کرد. قابل ذکر است که منظور از کمانش در این متن همان تمایل فیزیکی و آشکار سازه‌ها در انحراف از محور اصلی‌شان است.

\*MAT\_CRUSHABLE\_FOAM مناسب می‌باشد [۱۶]. برای وزنه ضربه زننده، \*MAT\_RIGID با خواص شبیه به خواص فولاد در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) خواص مواد مورد استفاده درج شده است.

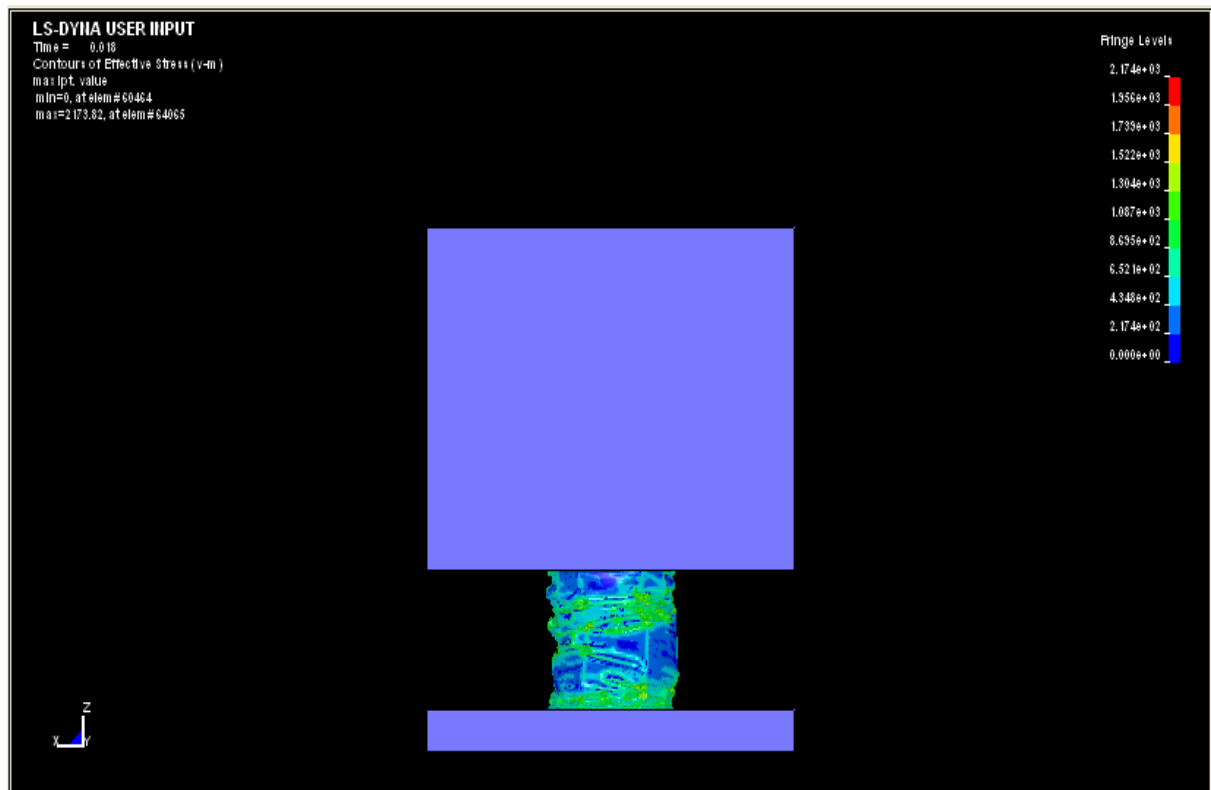
جدول (۱) خواص مواد استفاده شده در شبیه‌سازی.

ماده	چگالی (ton/mm <sup>3</sup> )	مدول یانگ (MPa)	ضریب پواسان
فوم پلی یورتان	$8 \times 10^{-11}$	۲۵	۰
آلومینیوم	$2/9 \times 10^{-9}$	$7/85 \times 10^4$	۰/۳۳
فولاد (بلوک ضربه زننده)	$8 \times 10^{-9}$	$200 \times 10^3$	۰/۳

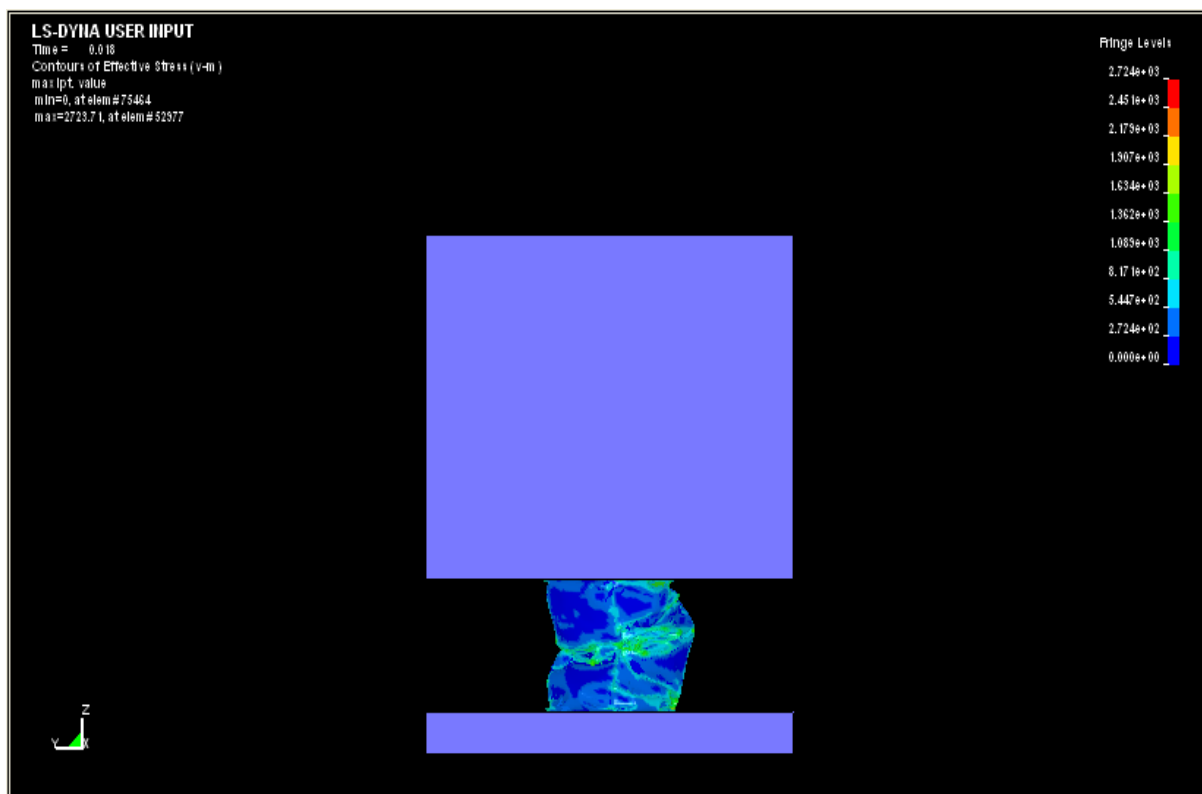
تعریف و تشخیص سطوح تماس اهمیت ویژه‌ای در حل مسئله دارند. برای سطح تماس سازه‌ی آلومینیومی با جرم ضربه زننده و همینطور برای سطح تماس سازه‌ی آلومینیومی با صفحه زیرین از CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE استفاده می‌شود. سطح تماس چین خوردگی‌های سازه آلومینیومی روی هم از CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE است. برای سطوح تماس فوم نیز CONTACT\_ERODING مناسب می‌باشد. سطح تماس فوم با سازه‌ی جدار نازک به همراه سطح تماس فوم با صفحه زیرین و جرم ضربه زننده از نوع CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE در نظر گرفته شده است. همچنین برای سطح تماس فوم روی خودش نیز CONTACT\_ERODING\_SINGLE\_SURFACE مناسب می‌باشد. هر کدام از سازه‌های توپر مورد نظر با میانگین حداکثر تعداد ۷۵۵۰۰ المان تحت سیستم ویندوز XP با Intel® Pentium® Dual CPU E2200 @ 2/20 GHz, 2GB of RAM پس از ده ساعت و چهل دقیقه به



شکل (۴) مقطع دایروی توپر ۰/۰۱۸ ثانیه پس از بارگذاری.



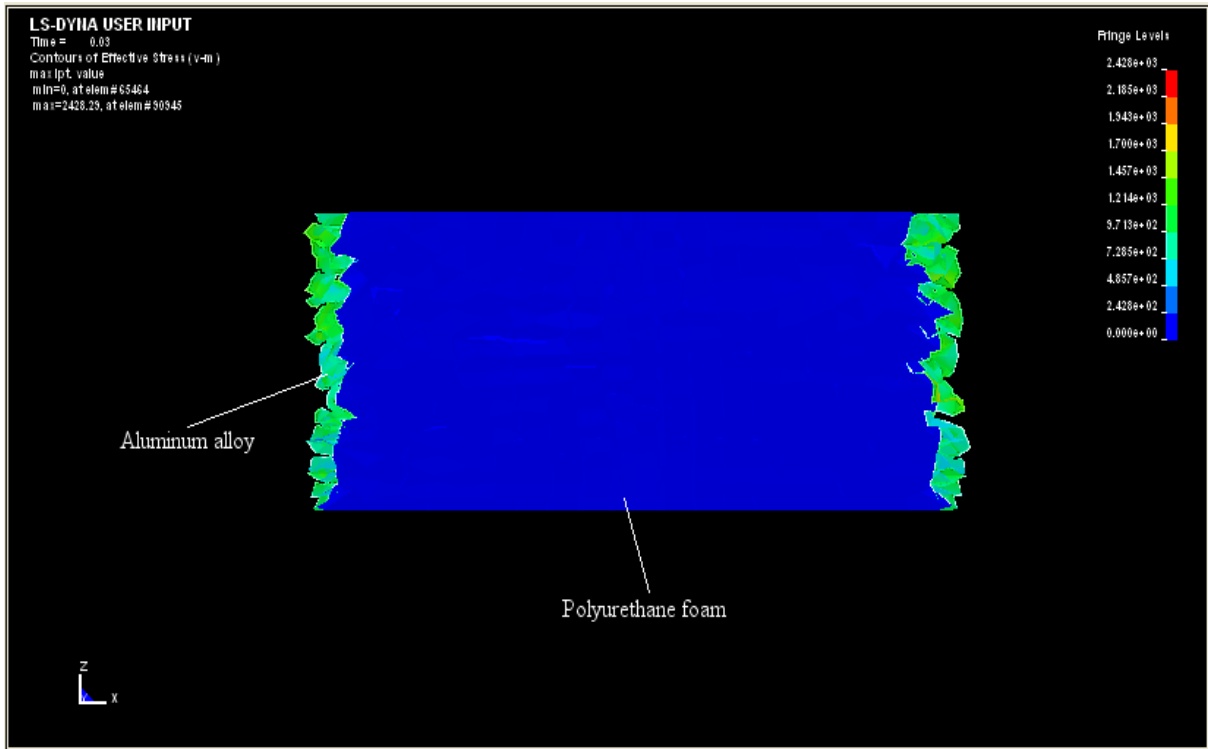
شکل (۵) مقطع شش ضلعی توپر ۰/۰۱۸ ثانیه پس از بارگذاری.



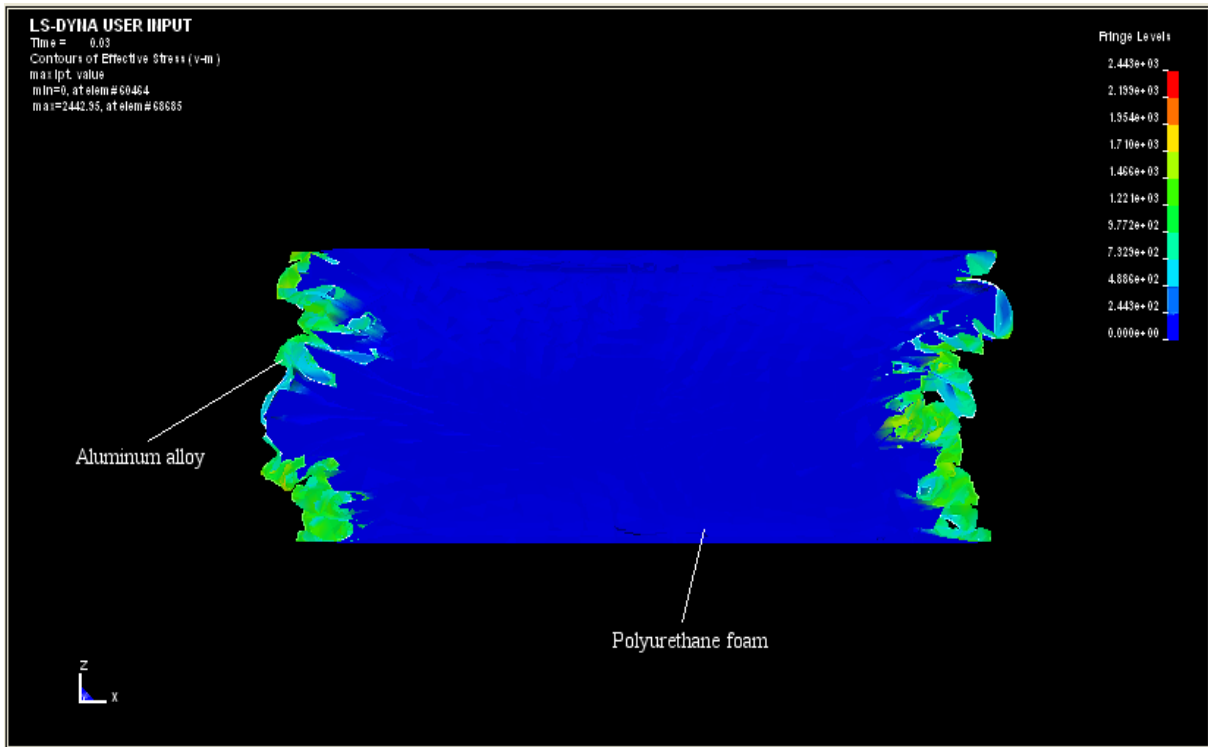
شکل (۶) مقطع مربعی توپر ۰/۰۱۸ ثانیه پس از بارگذاری.

در تغییر شکل دائم سازه‌های توپر با افزایش تعداد اضلاع برای مقطع مورد نظر تمایل به کمانش کمتر می‌شود. در شکل‌های (۷ تا ۹) نمای برش خورده پس از اتمام بارگذاری سه مقطع توپر را می‌توان مشاهده کرد. تغییر شکل و توزیع تنش سازه‌های توخالی ۰/۰۱۲ ثانیه پس از بارگذاری نیز در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند.

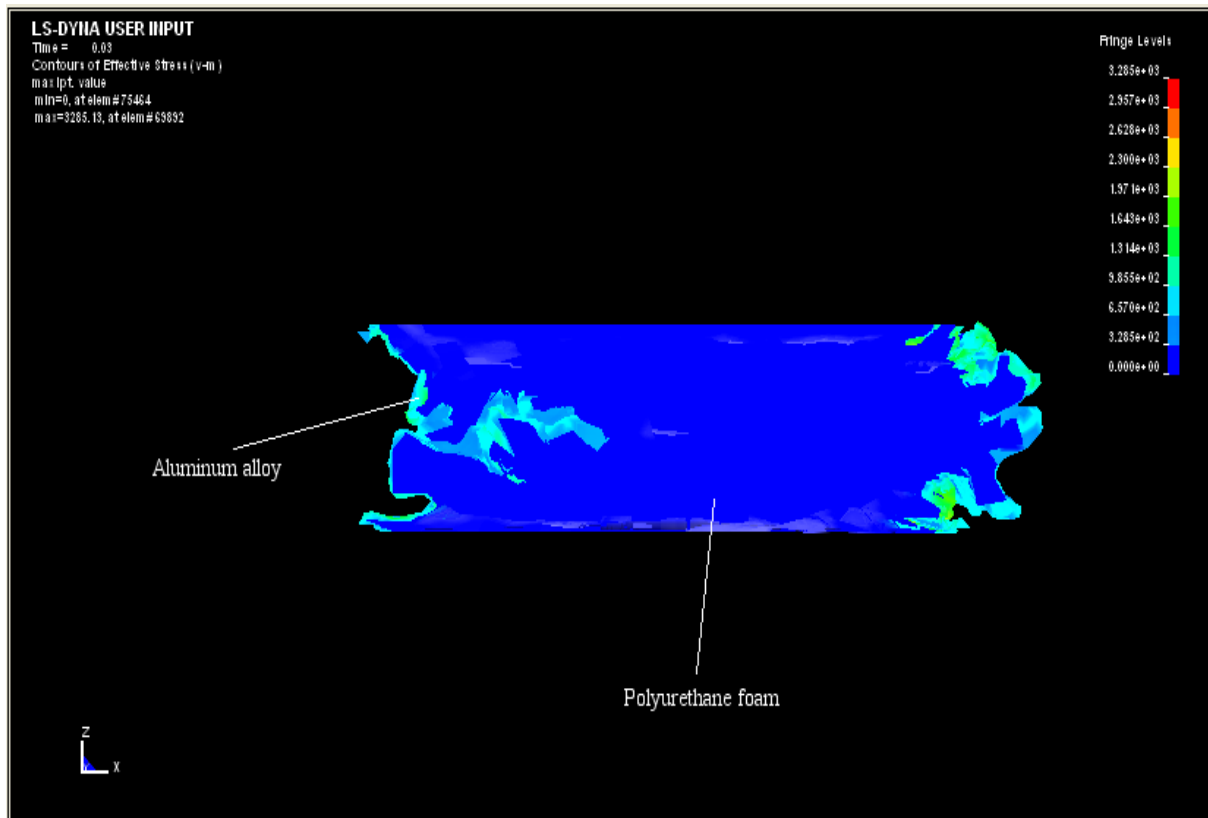




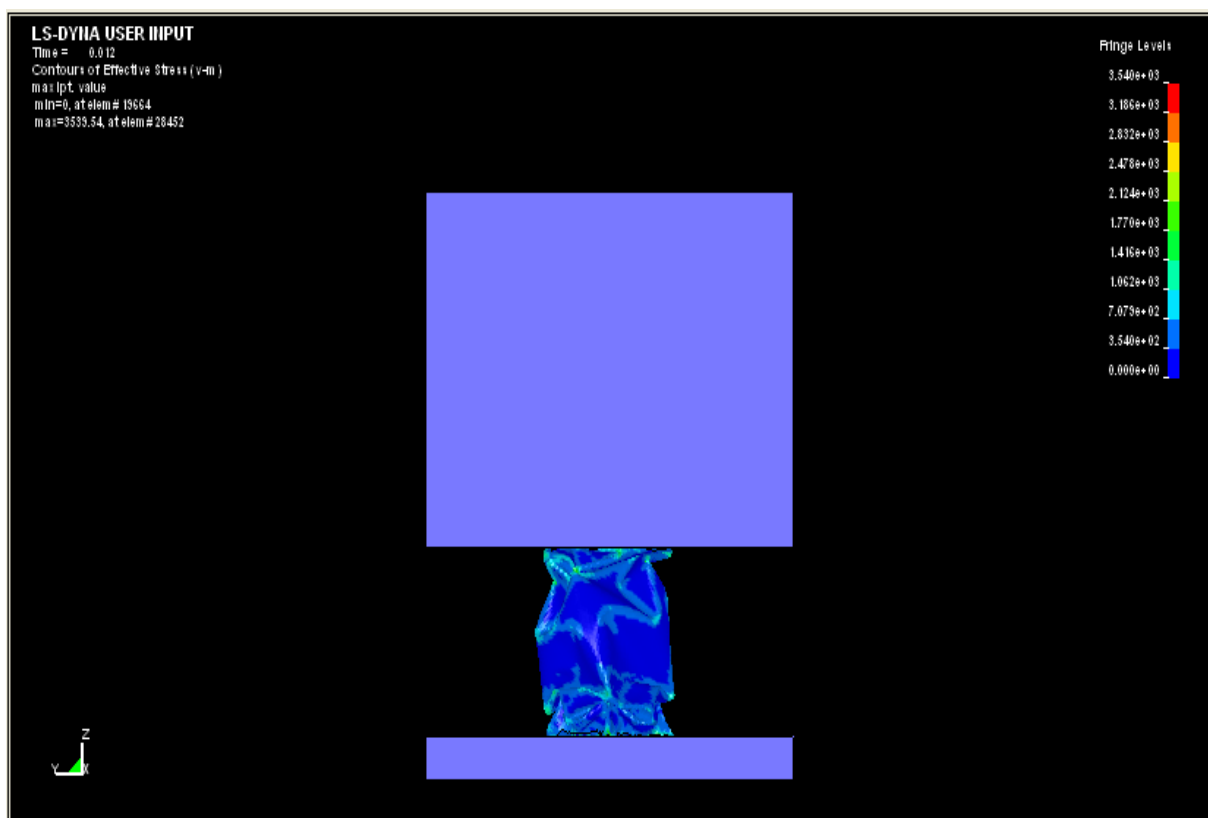
شکل (۷) نمای برش خورده مقطع دایروی توپر پس از بارگذاری.



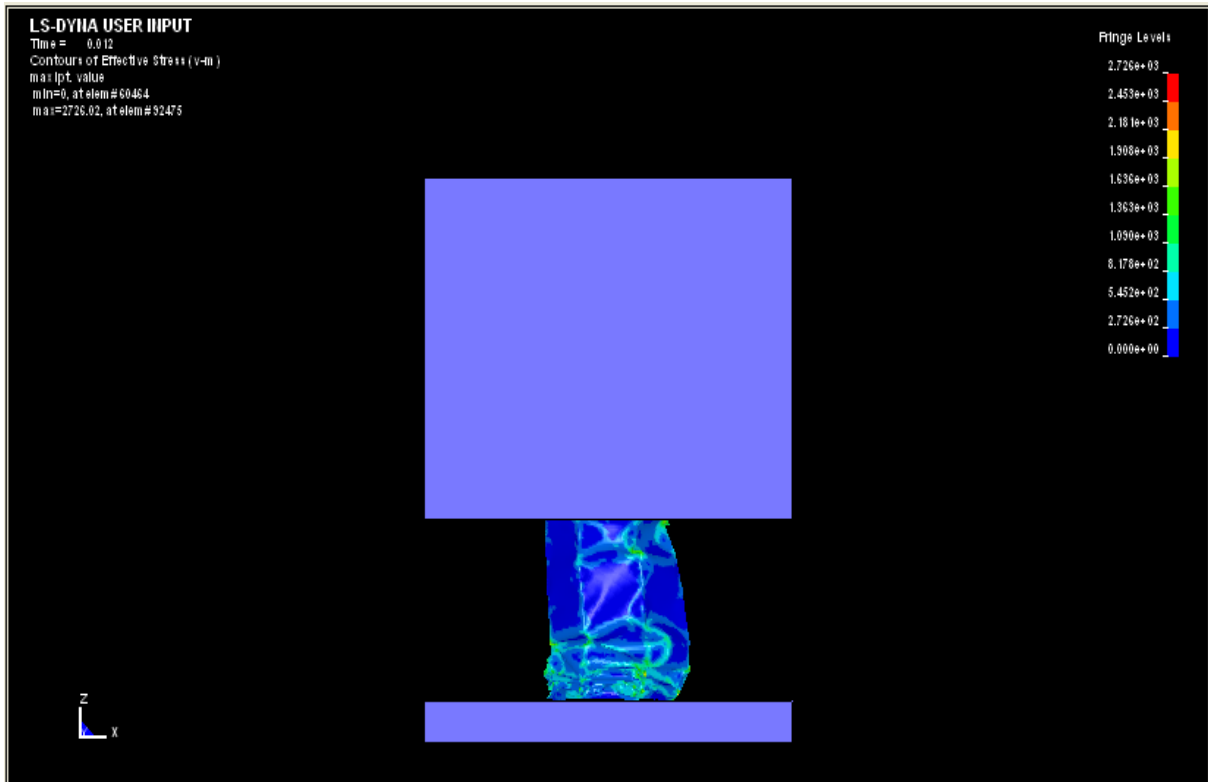
شکل (۸) نمای برش خورده مقطع شش ضلعی توپر پس از بارگذاری.



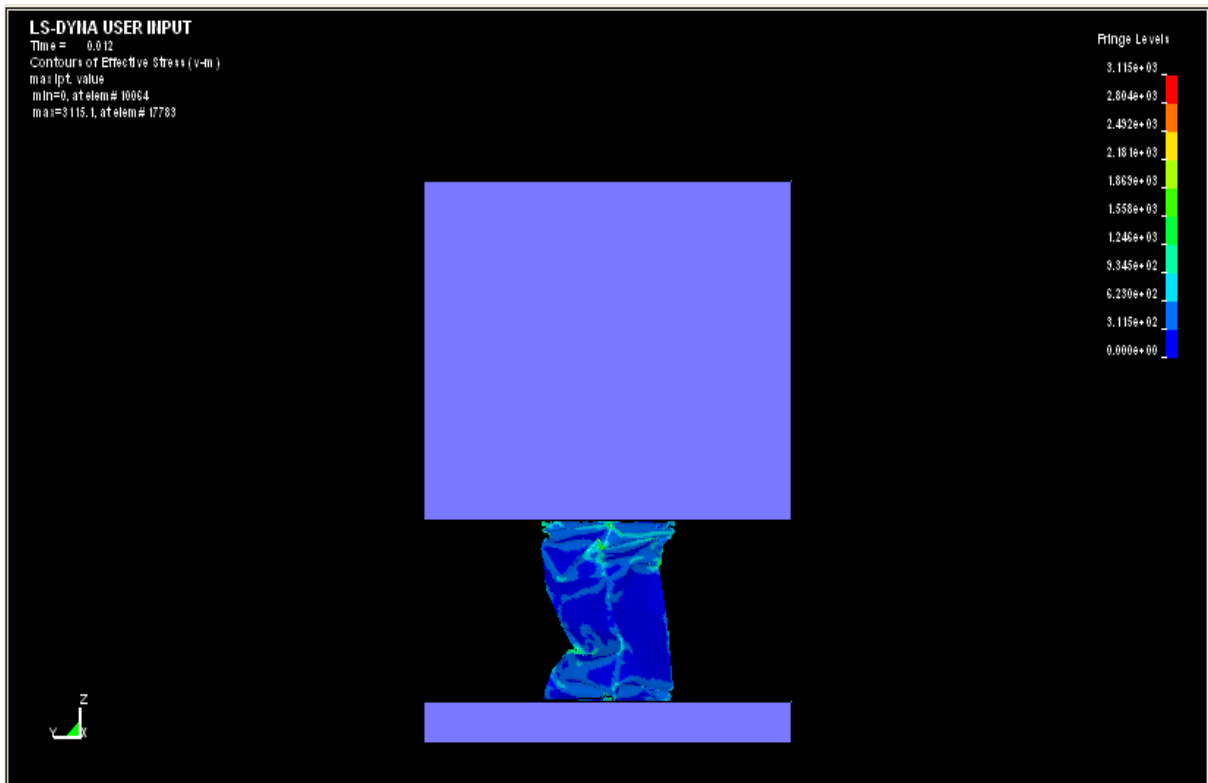
شکل (۹) نمای برش خورده مقطع مربعی توپر پس از بارگذاری.



شکل (۱۰) مقطع دایروی توخالی ۰/۰۱۲ ثانیه پس از بارگذاری.

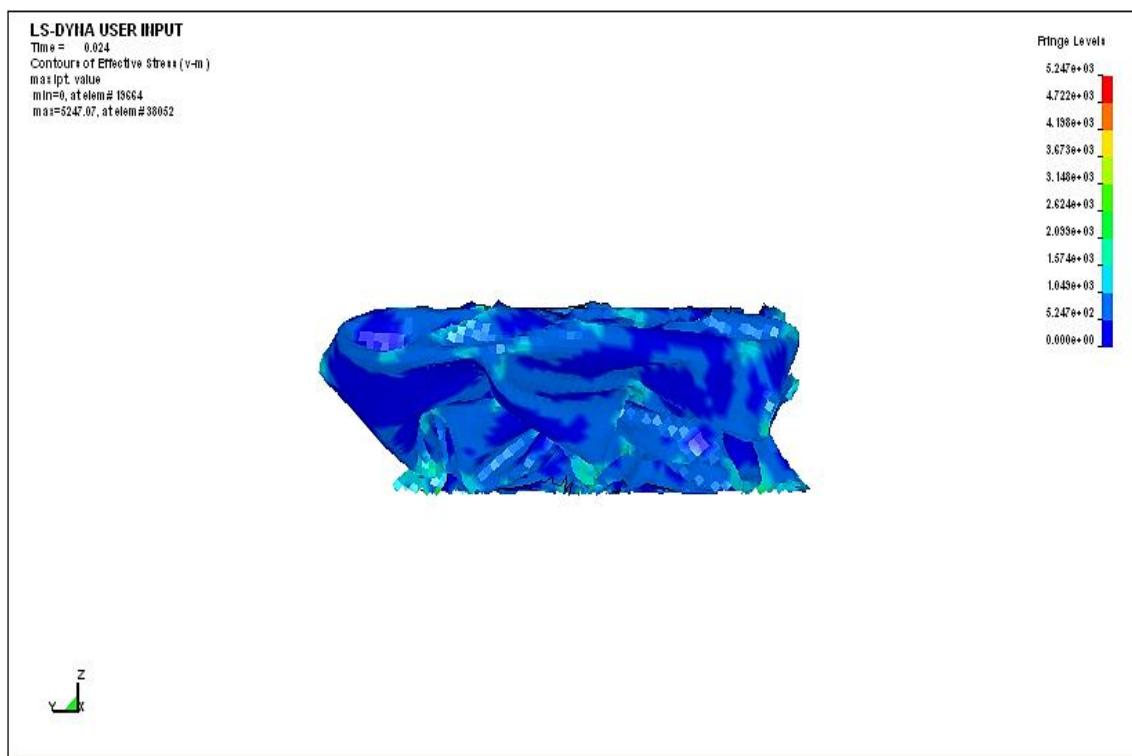


شکل (۱۱) مقطع شش ضلعی توخالی ۰/۰۱۲ ثانیه پس از بارگذاری.

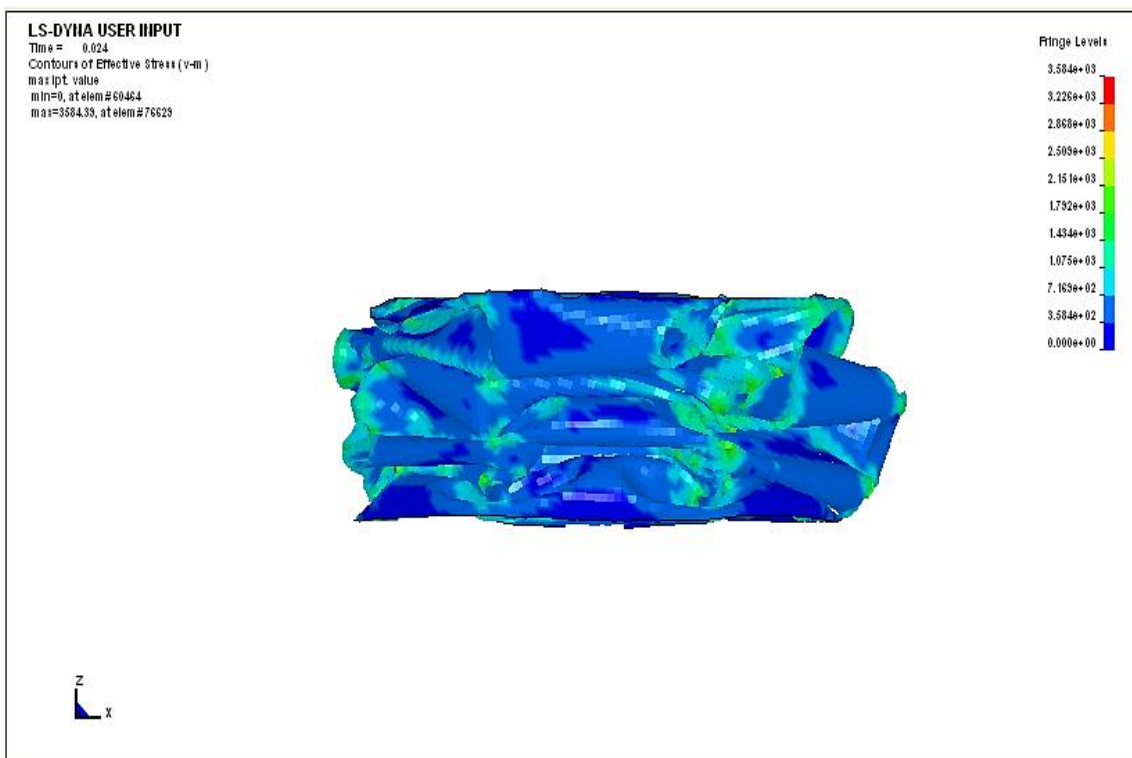


شکل (۱۲) مقطع مربعی توخالی ۰/۰۱۲ ثانیه پس از بارگذاری.

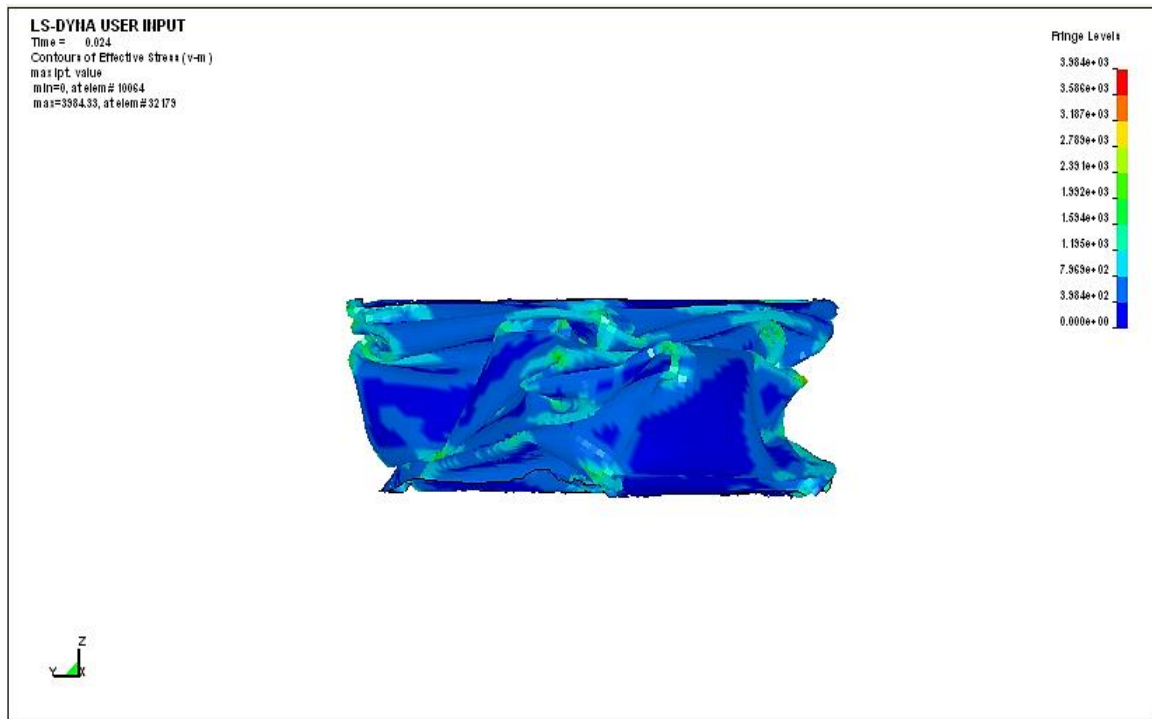
در شکل‌های (۱۳ تا ۱۵) تغییر شکل سازه‌های توخالی پس از اتمام بارگذاری نشان داده شده است. همچنین در جدول شماره ۲ می‌توان حداکثر تنش فون میسز رخ داده در المان بحرانی سازه‌ها را مشاهده کرد. در مرحله آخر بارگذاری یعنی زمانیکه سازه‌ها بیشترین تغییر طول را تجربه کرده‌اند و کاملاً پرس شدند تنش‌ها به حداکثر مقدار خود می‌رسند.



شکل (۱۳) تغییر شکل مقطع دایروی توخالی پس از بارگذاری.



شکل (۱۴) تغییر شکل مقطع شش ضلعی توخالی پس از بارگذاری.



شکل (۱۵) تغییر شکل مقطع مربعی توخالی پس از بارگذاری.

جدول (۲) حداکثر تنش رخ داده در سازه‌ها.

توپر دایروی	توخالی شش گوش	توخالی مربع	توپر دایروی	توپر شش گوش	توپر مربع
۵۲۴۷ پاسکال	۳۶۸۵ پاسکال	۳۳۸۴ پاسکال	۲۴۲۸ پاسکال	۲۴۴۲ پاسکال	۳۲۸۵ پاسکال

#### ۴- شبکه‌ی عصبی مصنوعی

یک شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) ایده‌ای است برای پردازش اطلاعات که از سیستم عصبی زیستی الهام گرفته شده و مانند مغز به پردازش اطلاعات می‌پردازد. این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی بهم پیوسته تشکیل شده (neurons) که برای حل یک مسأله با هم هماهنگ عمل می‌کنند. بنابراین مدل شبکه‌های عصبی بین داده‌ها یک رابطه غیرخطی ایجاد می‌کند و ورودی سیستم را بصورت غیرخطی به خروجی نگاشت می‌کند. لذا می‌تواند کارهایی را انجام دهد که یک برنامه خطی قادر به انجام آن نیست. شبکه عصبی بکار برده شده در این پژوهش از نوع پرسپترون چند لایه پیشرو (LMP) با الگوریتم خطایابی انتشار برگشتی که دارای دو

لایه پنهان و لایه ورودی و خروجی می‌باشد. تعداد نرون‌ها در هر لایه پنهان ۱۰ نرون و تابع وزن دهی آنها سیگموئید در نظر گرفته شده است. شبکه مورد نظر با دو نوع ورودی آموزش می‌بیند یکی ورودی زمان-نیرو و دیگری ورودی زمان-انرژی جذب شده می‌باشد. این داده‌ها برای ۶ سازه مورد نظر توسط نرم افزار LS-DYNA بدست آمده‌اند. خروجی‌های شبکه عصبی نیز توابع تخمینی نیرو و جذب انرژی هستند. منحنی‌های بدست آمده از توابع تخمینی در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ به همراه نتایج LS-DYNA ترسیم شده‌اند. در نهایت با آموزش شبکه، مدلی غیر خطی ارائه شده است که می‌تواند انرژی و نیروی جذب شده برای سازه را بصورت غیر خطی پیش بینی نماید. مشخصات و ساختار

و مربع بیشترین جذب انرژی را دارا می‌باشند. انرژی جذب شده ( $E_A$ ) از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$E_A = \int P.d\delta \quad (2)$$

که  $P$  و  $\delta$  بترتیب نیرو و جابجایی هستند. نیرو توسط نودهای موجود در سطح زیرین (تکیه گاه) استوانه‌ها توسط Reaction Force اندازه‌گیری می‌شود که بخشی از این نودها با نودهای زیرین سازه‌های جدارنازک و فوم پرکننده دارای سطح تماس از نوع ERODING هستند. در ادامه نمودارهای مربوط به تغییرات نیروی یاد شده در سرتاسر لحظات برخورد را می‌توان مشاهده کرد. تغییر شکل سازه جدار نازک با سطح مقطع دایروی حین بارگذاری محوری توسط پاگسلی و مکالای در [۱۷] بررسی شده است که در آن نیروی اعمال شده به سازه‌ها بوسیله رابطه ۳ بیان می‌شود.

$$P = 228.5 M_p \quad (3)$$

که در رابطه بالا  $M_p = \frac{\sigma_0 t^2}{4}$  عنوان گشتاور خمشی کاملاً مومسان است. همچنین  $t$  و  $\sigma_0$  ضخامت و تنش تسلیم سازه مورد نظر هستند. در شکل (۱۷) نیز ردی یک نمونه ایده‌آل از تغییر شکل این سازه را ارائه کرده است.

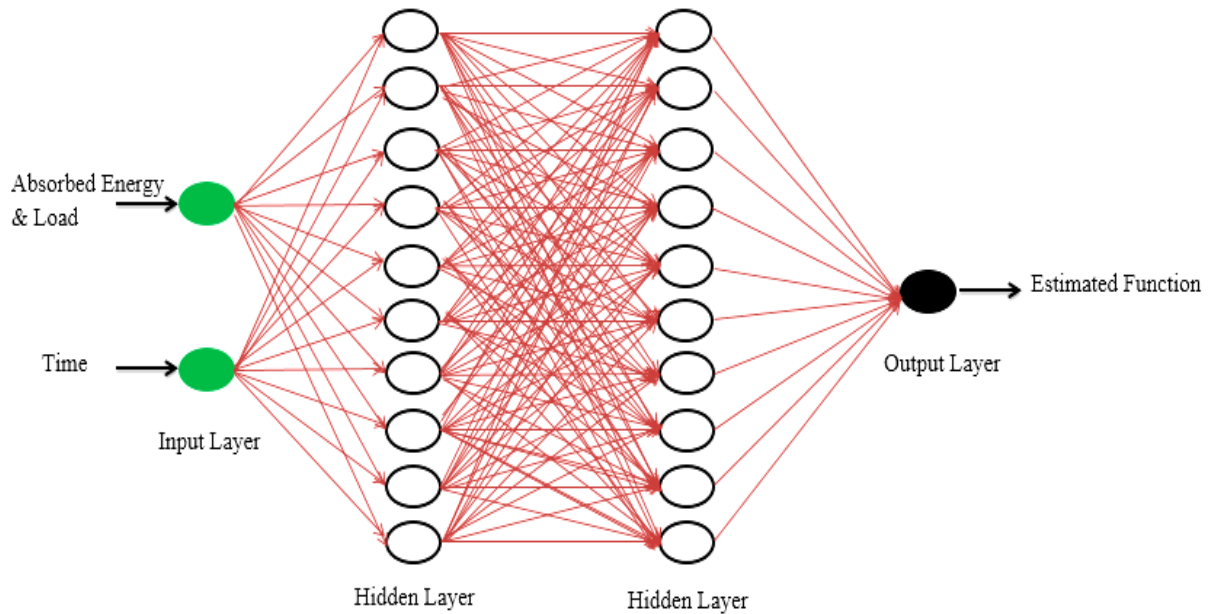
شبکه عصبی بکار برده شده در جدول (۳) و شکل (۱۶) آورده شده است.

جدول (۳) مشخصات و پارامترهای شبکه عصبی.

پارامتر	مشخصات
نوع شبکه	MLP (پرسپترون چند لایه)
الگوریتم آموزش	TRAINLM
الگوریتم خطایابی	Back Propagation
تعداد لای‌های پنهان	۲
تعداد نرون‌های لایه‌های پنهان	۱۰ و ۱۰
تابع تحریک لایه‌های پنهان	سیگموئید
تابع تحریک لایه خروجی	خطی
تعداد داده‌های آموزش	۱۲۰ نمونه (۷۵ درصد)
تعداد داده‌های آزمایش	۳۰ نمونه (۲۵ درصد)

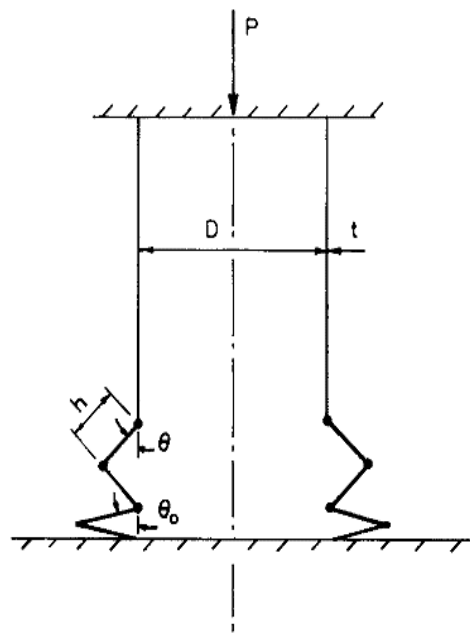
## ۵- نتایج شبیه‌سازی

از میان سازه‌های توپر، سازه جدار نازک با مقطع دایروی بیشترین جذب انرژی را با ۲/۱ درصد خطا نسبت به عدد ذکر شده در مرجع [۱۲] دارد، بطوریکه جذب انرژی در [۱۲] ۶۲۵ ژول است و جذب انرژی نمونه بررسی شده در شبیه‌سازی عددی ۶۱۲ ژول می‌باشد. پس از مقطع دایروی، بترتیب سازه‌های جدار نازک با مقطع شش ضلعی



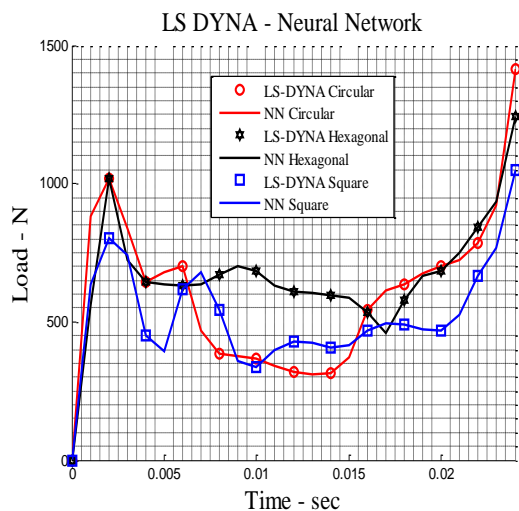
شکل (۱۶) ساختار شبکه عصبی.

کمتر، کاهش طول بیشتری را نسبت به دو سازه‌ی دیگر تجربه می‌کند. ۱۲۷ میلی متر کاهش طول که ۷ میلی متر از مقطع دایروی و ۵ میلی متر نیز از مقطع شش ضلعی بیشتر است. همچنین نیروی جذب شده توسط سازه‌های توپر در شکل (۱۹) رسم شده است. از میان سازه‌های توخالی همانند حالت توپر مقطع دایروی بیشترین جذب انرژی را دارد. همچنین سازه‌ی جدار نازک با سطح مقطع شش ضلعی ۸۴ ژول انرژی را در ۱۲۲ میلی متر کاهش طول جذب می‌کند که از مقطع دایروی ۳۹ ژول کمتر و از مقطع مربع ۱۴ ژول بیشتر انرژی جذب کرده است. در شکل (۲۰) نمودار زمان به انرژی جذب شده مشاهده می‌شود. همچنین نیروی جذب شده توسط سازه‌های توخالی در شکل (۲۱) رسم شده است.

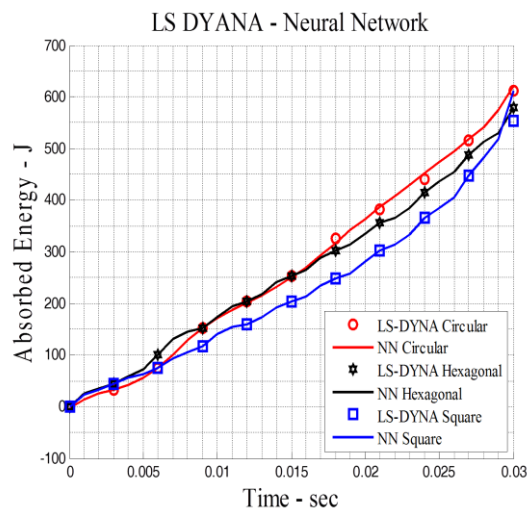


شکل (۱۷) مدل ایده آل کمانش تیوب دایروی [۱۲].

در شکل (۱۸) نمودار زمان به انرژی جذب شده سازه‌های توپر مشاهده می‌شود. سازه‌ی جدار نازک با سطح مقطع شش ضلعی ۵۸۰ ژول انرژی را در ۱۲۲ میلی متر کاهش طول جذب می‌کند که از مقطع دایروی ۳۲ ژول کمتر و از مقطع مربع ۲۶ ژول بیشتر انرژی جذب می‌کند. سازه‌ی جدار نازک با مقطع مربع علی‌رغم جذب انرژی

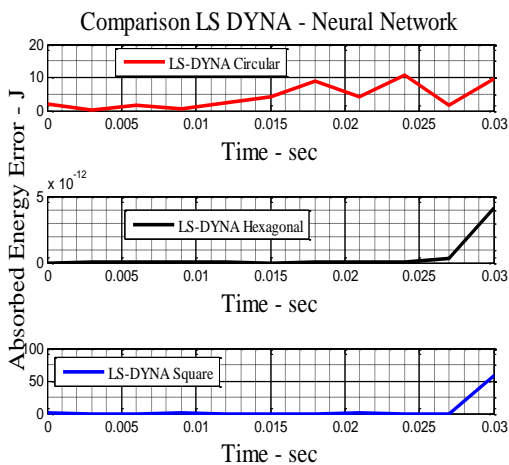


شکل (۲۱) جذب نیرو در سازه‌های توخالی.

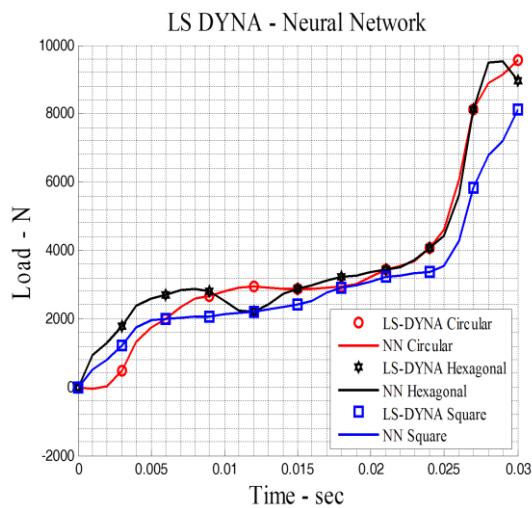


شکل (۱۸) جذب انرژی در سازه‌های توپر.

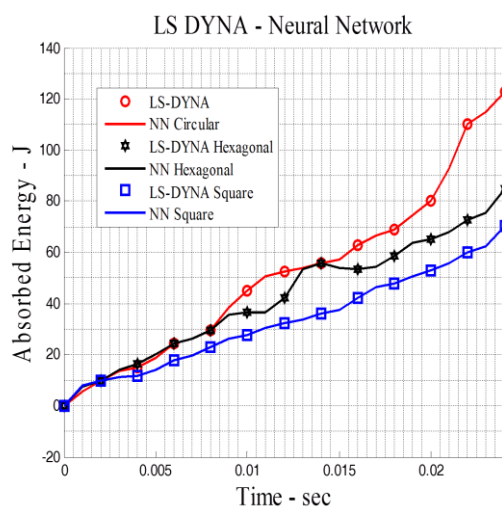
شکل‌های (۲۲ تا ۲۵) نیز خطای نتایج حاصل از شبکه عصبی نسبت به LS-DYNA را نشان داده‌اند.



شکل (۲۲) خطای جذب انرژی در سازه‌های توپر.



شکل (۱۹) جذب نیرو در سازه‌های توپر.



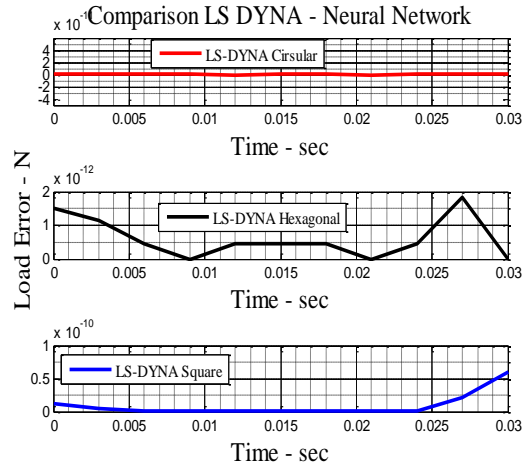
شکل (۲۰) جذب انرژی در سازه‌های توخالی.



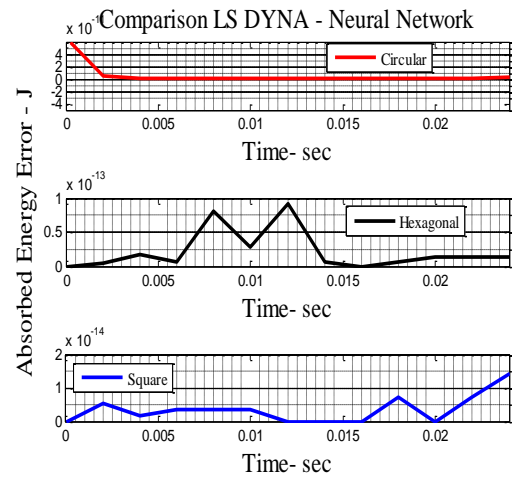
از مقایسه بین مقاطع دایروی توپر و توخالی می‌توان مشاهده کرد که این مقاطع در حالت توپر ۶۱۲ ژول انرژی جذب می‌کنند و در حالت توخالی ۱۲۳ ژول انرژی جذب می‌نمایند، در نتیجه جذب انرژی در حالت توپر ۴/۹ برابر افزایش می‌یابد. در حالت توپر مقاطع شش ضلعی ۵۸۰ ژول انرژی جذب می‌شود و در حالت توخالی ۸۴ ژول انرژی جذب می‌گردد. همچنین در میان سازه‌هایی با مقطع مربع در حالت توپر ۵۵۴ ژول انرژی جذب می‌شود و در حالت توخالی ۷۰ ژول انرژی جذب می‌گردد. سازه‌های توپر علاوه بر جذب انرژی بیشتر، قادر به مستهلک کردن انرژی در مدت زمان بیشتری نسبت به سازه‌های توخالی در مقدار جابجایی یکسان هستند. همچنین منحنی تغییرات نیروی جذب شده در سازه‌های توپر نرم‌تر و ملایم‌تر از سازه‌های توخالی است.

**۶- نتیجه گیری**

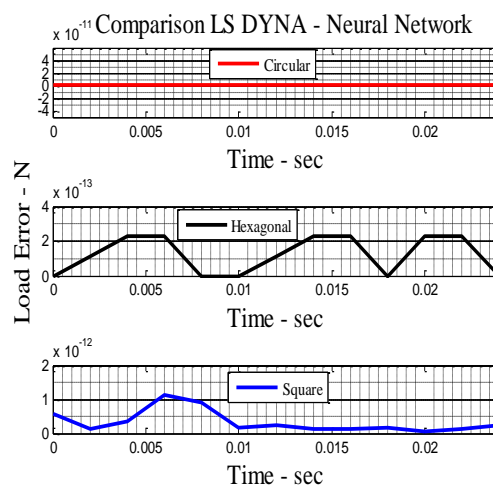
در این مقاله رفتار مکانیکی سازه‌هایی با جداره خیلی نازک در حالت توپر و توخالی تحت بررسی قرار گرفت. در این سازه‌ها هر چه تعداد اضلاع مقطع مورد بررسی بیشتر می‌شود، جذب انرژی و نیروی مستهلک شده در سازه افزایش می‌یابد و در نهایت نیز جذب انرژی در مقطع دایروی شکل به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین هر چه تعداد اضلاع مقطع مورد بررسی کمتر باشد، میل به کماتش در طول بارگذاری بیشتر می‌شود. بعلاوه اثرات تمرکز تنش در کنج-های مقاطع مربع و شش ضلعی در حین بارگذاری مشهود است، موضوعی که در مقطع دایروی مشاهده نشد. سازه توپر مقطع دایروی دارای بیشترین جذب انرژی است، درحالی‌که کمترین تغییر طول را تجربه می‌کند. همچنین منظم‌ترین چین خوردگی‌ها مربوط به سازه جدار نازک توپر با مقطع دایروی هستند. از مقایسه جذب انرژی در سازه‌های جدار نازک توپر با سازه‌های توخالی می‌توان دریافت که جذب انرژی در حالت توپر حداقل تا پنج برابر نسبت به حالت توخالی افزایش می‌یابد. در حالیکه تعداد



شکل (۲۳) خطای جذب نیرو در سازه‌های توپر.



شکل (۲۴) خطای جذب انرژی در سازه‌های توخالی.



شکل (۲۵) خطای جذب نیرو در سازه‌های توخالی.

- [6] Zarei H.R., Kroger M., Optimization of the Foam-Filled Aluminum Tubes for Crush Box Application, *Thin-Walled Structures*, vol. 46, No. 2, 2008, pp. 214–221.
- [7] Zarei H.R., Kroger M., Crashworthiness Optimization of Empty and Filled Aluminum Crash Boxes, *International Journal of Crashworthiness*, vol. 12, No. 3, 2007, pp. 255–264.
- [8] Zarei H.R., Ghamarian A., Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-Filled Thin-Walled Tubes with Shallow Spherical Caps, *Experimental Mechanics*, vol. 54, 2014, pp. 115–126.
- [9] Ghamarian A., Zarei H.R., Abadi M.T., Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-Filled End-Capped Conical Tubes, *Thin-Walled Structures*, vol. 49, 2011, pp. 1312–1319.
- [10] Gupta N.K., Velmurugan R., Axial Compression of Empty and Foam Filled Composite Conical Shells, *Journal of Composite Material*, vol. 33, No. 6, 1999, pp. 567–591.
- [11] Fan Z., Lu G., Liu K., Quasi-Static Axial Compression of Thin-Walled Tubes with Different Cross-Sectional Shapes, *Engineering Structures*, vol. 55, 2013, pp. 80–89.
- [12] Reddy T.Y., Wall R.J., Axial Compression of Foam-Filled Thin-Walled Circular Tubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 7, No. 2, 1988, pp. 151–166.
- [13] Reid S.R., Reddy T.Y., Gray M.D., Static and Dynamic Axial Crushing of Foam-Filled Sheet Metal Tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 28, 1986, pp. 295–322.
- [14] Gameiro C.P., Cirne J., Dynamic Axial Crushing of Short to Long Circular Aluminium Tubes with Agglomerate Cork Filler, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 49, 2007, pp. 1029–1037.
- اضلاع مقاطع کمتر باشد این اثر بیشتر نمایان می‌شود بطوریکه در مقطع مربع افزایش جذب انرژی تقریباً تا هشت برابر می‌رسد. علاوه بر جذب انرژی بیشتر توسط سازه‌های توپر، سازه‌های توپر قادر به مستهلک کردن انرژی در مدت زمان بیشتری نسبت به سازه‌های توخالی در همان مقدار جابجایی هستند. در این مقاله همچنین معماری از یک شبکه عصبی مصنوعی ارائه شد تا با کمک آن و بهره‌گیری از داده‌های LS-DYNA بتوان رفتار جذب انرژی و نیروی این سازه‌ها را در قالب مدلی در شبکه عصبی بیان نمود. نتایج مدل پیشنهادی در مقایسه با نتایج تحلیلی نرم‌افزار دقت قابل قبولی داشتند.
- مراجع:**
- [1] Hanssen A.G., Lorenzi L., Berger K.K., Hopperstad, O.S., Langseth, M. A demonstrator bumper system based on aluminium foam filled crash boxes, *International Journal of Crashworthiness*, vol. 5, No. 4, 2000, pp. 381–392.
- [2] Wang Z., Tian H., Lu Z., Zhou W., “High-Speed Axial Impact of Aluminum Honeycomb – Experiments and Simulations, *Composites Part B: Engineering*, vol. 56, 2014, pp. 1–8.
- [3] Algalib D., Limam A., Experimental and Numerical Investigation of Static and Dynamic Axial Crushing of Circular Aluminum Tubes, *Thin-Walled Structures*, vol. 42, 2004, pp. 1103–1137.
- [4] Seitzberger M., Rammerstorfer F.G., Degischer, H.P., Grading, R., Crushing of Axially Compressed Steel Tubes Filled with Aluminium Foam, *Acta Mechanica*, vol. 125, No. (1–4), 1997, pp. 93–105.
- [5] Nariman-Zadeh N., Darvizeh A., Jamali A., Pareto Optimization of Energy Absorption of Square Aluminium Columns Using Multi-Objective Genetic Algorithms, *Proc. IME BJ Engineering Manufacturing*, vol. 220, Issue 2, 2006, pp. 213–224.

- [15] Yamashita M., Gotoh M., Sawairi Y., Axial Crush of Hollow Cylindrical Structures with Various Polygonal Cross-Sections Numerical Simulation and Experiment, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, 2003, pp. 59–64.
- [16] .LS-DYNA 971 Keyword User's Manual.
- [17] Pugsley A., Macaulay M.A., The large scale crumpling of thin cylindrical columns, *Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics*, vol. 13, 1960, pp. 1-9.

