



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Modeling and Experimental Study of Regular Hexagonal Thin-Walled Structures: Investigating Energy-Absorbing Elements under Loading

Mehdi Beynaghi ^a, Ali Dadrasi ^{a,*}, Mohsen Beynaghi ^b

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Babol Noshirvani University, Babol, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-01-23

Revised: 2025-04-28

Accepted: 2025-05-21

Keywords:

Energy absorption;
Thin-walled structure;
Hexagonal structure;
Modeling;
Crushing load.

ABSTRACT

In many industries, structures are designed to demonstrate good stability against various loadings. Consequently, studying the energy absorption capacity of such structures is of great importance. This paper investigates the energy absorption capabilities of thin-walled hexagonal structures. Experimental tests and modeling were performed on both simple hexagonal structures and improved hexagonal structures. Additionally, the effect of a smaller hexagon inside these structures was studied. The results indicate that increasing the wall thickness in both simple and improved structures enhances their energy absorption capabilities. The specific energy absorption capacity of the simple structure with a thickness of 2.81 mm is 18.79 kJ/kg, representing a 53.76% increase compared to a thickness of 0.3 mm. The improved structure also exhibited higher energy absorption capabilities than the simple structure. The energy absorption value for the simple structure with a thickness of 0.3 mm was 1128 J, whereas it was 2139 J for the improved structure, showing a 62.89% increase. This increasing trend was also observed in both simple and improved structures for the average collapse load. The results of this research provide new insights for the design of improved energy absorbers.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.36693.2801>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: ali.dadrasi@hsu.ac.ir

How to cite this article:

M. Beynaghi, A. Dadrasi and M. Beynaghi, "Modeling and Experimental Study of Regular Hexagonal Thin-Walled Structures: Investigating Energy-Absorbing Elements under Loading," Journal of Modeling in Engineering, 23 83 (2025): 181-189, doi: 10.22075/jme.2025.36693.2801

مدلسازی و مطالعه‌ی تجربی ساختارهای جدارنازک شش ضلعی منظم: بررسی المان‌های جذب انرژی در اثر بارگذاری

مهدی بینقی^۱، علی دادرسی^{۱*}، محسن بینقی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱	
واژگان کلیدی: جذب انرژی، ساختار جدار نازک، ساختار شش ضلعی، مدلسازی، بار فروپاشی.	در بسیاری از صنایع سازه‌هایی مورد پذیرش قرار می‌گیرند که پایداری مناسبی در برابر بارگذاری‌های مختلف از خود نشان می‌دهند. در نتیجه، بررسی قابلیت جذب انرژی در چنین ساختارهایی از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین منظور، در این مقاله، قابلیت‌های جذب انرژی ساختارهای جدارنازک شش ضلعی مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش تجربی و مدلسازی بر ضخامت ساختار شش ضلعی ساده و ساختار شش ضلعی بهبود یافته صورت پذیرفته است. همچنین، اثر حضور یک شش ضلعی کوچکتر درون سازه‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش ضخامت دیواره در هر دو ساختار ساده و بهبود یافته باعث افزایش قابلیت‌های جذب انرژی می‌گردد. قابلیت جذب انرژی ویژه برای ساختار ساده با ضخامت ۲/۸۱ میلی‌متر، ۱۸/۷۹ کیلوژول بر کیلوگرم بدست آمده است که ۵۳/۷۶ درصد افزایش را نسبت به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر نشان می‌دهد. همچنین، قابلیت‌های جذب انرژی ساختار بهبود یافته بالاتر از ساختار ساده گزارش شده است. به صورتی که مقدار جذب انرژی برای ساختار ساده و با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر، ۱۱۲۸ ژول گزارش شده است که این مقدار برای ساختار بهبود یافته و ۲۱۳۹ ژول محاسبه گشته است که ۸۹/۶۲ درصد افزایش را نشان می‌دهد. این روند افزایش در هر دو حالت ساختار ساده و بهبود یافته برای بار فروپاشی متوسط نیز گزارش شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند مسیر جدیدی را برای طراحی جاذب‌های انرژی بهبود یافته ارائه دهد.
DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.36693.2801	
© 2025 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)	

۱- مقدمه

المان‌های مورد بررسی در سازه‌های جدار نازک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این سیستم می‌تواند انرژی الاستیک و غیر الاستیک را به کمک روش‌های مختلف تغییر شکل به پاسخ‌های جذب انرژی متفاوت تبدیل کند. از انواع تغییر شکل‌ها می‌توان به تورفتگی جانبی، شکافتگی، فشرده سازی جانبی و وارونگی اشاره نمود [۵-۹]. از همین رو، پژوهشگران بسیاری بر این سازه‌ها متمرکز شده‌اند و تحقیقات فراوانی هم به صورت تجربی و هم به صورت

امروزه سازه‌های جدارنازک به صورت گسترده‌ای در صنایع مختلف همچون صنعت خودرو سازی، صنعت کشتی سازی و صنعت هواپیماسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سازه‌ها به دلیل سبک بودن، ظرفیت جذب انرژی بالا و نسبت جذب انرژی به وزن بالا به عنوان کارآمدترین سیستم‌های جذب انرژی معرفی می‌شوند [۱-۴]. شایان ذکر است که قابلیت جذب انرژی به عنوان یکی از مهم‌ترین

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ali.dadrasi@hsu.ac.ir

۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه نوشیروانی بابل، بابل، ایران

استناد به این مقاله:

مهدی بینقی، علی دادرسی و محسن بینقی، "مدلسازی و مطالعه‌ی تجربی ساختارهای جدارنازک شش ضلعی منظم: بررسی المان‌های جذب انرژی در اثر بارگذاری"، مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (۱۴۰۴): ۱۸۹-۱۸۱، doi: 10.22075/jme.2025.36693.2801

تحلیل عددی ارایه نموده‌اند.

ژائو و همکاران [۱۰] یک مطالعه‌ی مروری بر عملکرد قابلیت ضربه پذیری جاذب‌های انرژی ارایه کرده‌اند. بررسی تجربی فروپاشی و قابلیت جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی بوسیله‌ی آل‌باک [۱۱] مورد آزمایش قرار گرفت. وی با بهره‌گیری از مواد مختلف کامپوزیتی اعم از الیاف کربن، الیاف شیشه، آلومینیوم و الیاف برن قابلیت جذب انرژی سازه‌های مختلف را به صورت گزارش کرد؛ قابلیت جذب انرژی لوله‌های ساخته شده از الیاف کربن تا ۷۵ کیلو ژول بر کیلوگرم افزایش یافت، در صورتی که این مقدار برای لوله‌های ساخته شده از آلومینیوم معادل ۴۰ کیلو ژول بر کیلوگرم می‌باشد. از سویی دیگر، لوله‌های ساخته شده از الیاف شیشه نسبت به آلومینیوم باعث افزایش ۱۲ درصدی قابلیت جذب انرژی شده‌اند که به عنوان یک ماده‌ی سبک می‌تواند در ساختارهایی که دچار تصاوفا می‌شوند، کارساز آید. عبدالغدير و همکاران [۱۲] تغییر شکل لوله‌های دایروی جدار نازک تحت بار جانبی را مورد بررسی قرار دادند. آنها رفتار لوله‌های دایروی با تکیه گاه ساده تحت بارگذاری عرضی سمبه گوه‌ای شکل را بر مرکز لوله بررسی کردند. تحت این بارگذاری سه مرحله در تغییر شکل شناسایی شده و رابطه‌ای بین مشخصات مختلف نیروها با پارامترهای موقعیت بدست آمده است.

بررسی آزمایشگاهی قابلیت جذب انرژی کامپوزیت ترموپلاستیک توسط لیو و ژاو مورد مطالعه قرار گرفت [۱۳]. آنها با استفاده از ترکیب الیاف شیشه/لوله‌های پلی پروپیلن و کربن/پلی آمید، المان‌های تغییر طول، زاویه‌ی ضربه و سرعت ضربه را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آنها نشان دهنده‌ی آن است که ترکیب الیاف شیشه و لوله‌های پلی پروپیلن از قابلیت جذب انرژی بالاتری برخوردار است و به میزان ۶۱ کیلوژول بر کیلوگرم سبب افزایش این خاصیت می‌شود. ینگ و همکاران [۱۴] فروپاشی جانبی لوله‌های مربعی ساکن بر روی یک پایه‌ی تخت را مطالعه کردند. در این تحقیق، لوله‌ی مربعی آلومینیوم و فولاد نرم بر روی یک سطح صاف و سخت قرار داده شده و بوسیله‌ی پرتابه‌های مختلف تحت برخورد قرار گرفته است. چگونگی تغییر شکل اهداف و پاسخ فشردگی-بار آنها در این تحقیق مورد بحث قرار گرفته است. در تحقیقی دیگر، انرژی جذب شده در ترک‌های طولی دیواره‌های دایروی شکل مورد مطالعه‌ی تجربی قرار گرفته است [۱۵]. لیانگ و همکاران [۱۶] با

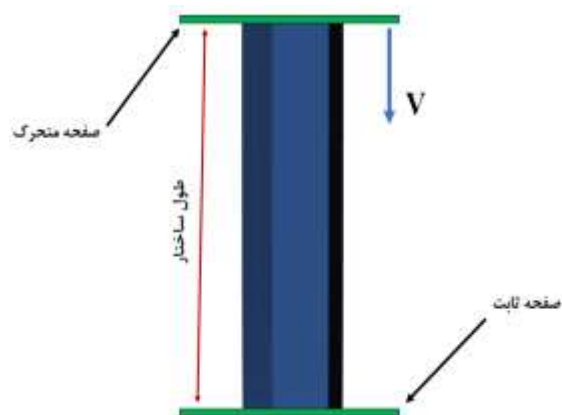
استفاده از کامپوزیت پلی آمید/الیاف شیشه به بررسی سازه‌های چهار و شش ضلعی پرداختند. نتایج آنها بیانگر آن است که بالاترین مقدار قابلیت جذب انرژی به سازه‌های مربعی شکل با بالاترین ضخامت تعلق دارد که مقدار آن معادل ۵۶ کیلوژول بر کیلوگرم بدست آمده است.

بررسی تجربی و عددی جذب انرژی و تغییر شکل لوله‌های جدار نازک تو خالی و تو پر با هندسه‌ی مقاطع دایره و مربع تحت بار ضربه‌ای عرضی توسط ژیانگ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۱۷]. هدف از انجام این مطالعه، بررسی اثر شکل هندسی برای لوله‌ی آلومینیومی بر میزان قابلیت جذب انرژی و بررسی اثر وجود فوم درون آن برای جذب انرژی بیشتر ناشی از ضربه‌ی عرضی بیان شده است. مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی نشان دهنده‌ی همخوانی مطلوبی (خطای کمتر از ۲۰ درصد) بین نتایج است. شایان ذکر است که سازه‌های مربعی شکل ۵۰ درصد بیشتر از سازه‌های دایروی شکل قابلیت جذب انرژی دارند.

در این مقاله، قابلیت‌های جذب انرژی و نحوه‌ی تغییر شکل سازه‌های جدار نازک شش ضلعی ساده و بهبود یافته به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت نیز، مقادیر بدست آمده از قابلیت جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بار فروپاشی متوسط در هر دو حالت ساده و بهبود یافته مورد مقایسه و تحلیل قرار می‌گیرد و سازه‌ی بهینه معرفی می‌گردد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش ضخامت دیواره‌ی ساختارهای شش ضلعی برای هر دو حالت ساده و بهبود یافته، موجب افزایش خواص مختلف می‌گردد. همچنین، مقایسه‌ی دو حالت ساده و بهبود یافته از ساختار، نشان دهنده‌ی آن است که تقویت ساختار شش ضلعی به بهبود ویژگی‌های مختلف از قبیل قابلیت جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بار فروپاشی کمک می‌نماید. نکته‌ی قابل اذعان آن است که با جایگزینی هر یک از رئوس شش ضلعی با دایره‌های تعبیه شده، ویژگی‌های مورد مطالعه در این مقاله بالاترین مقادیر را تجربه می‌کنند. بررسی المان‌های جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بار فروپاشی برای ساختارهای شش ضلعی جدار نازک از این بابت حائز اهمیت می‌باشد که در صنایع مختلف نظیر خودرو، هوافضا و مهندسی عمران (برای جذب انرژی در هنگام برخورد یا حوادث ضربه‌ای) قابل استفاده می‌باشد. مطالعه‌ی این ساختارها می‌تواند منجر به طراحی ایمن‌تر و کارآمدتری

متحرک، بارگذاری با جرم ۵۰۰ کیلوگرم از بالای ساختار و با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه صورت می‌گیرد. برای نشان دادن نماد سرعت از V استفاده شده است. طول سازه‌های جدارنازک شش ضلعی ۱۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (۲)، انتهای ساختار بر یک صفحه‌ی ثابت محدود شده است.



شکل ۲- شماتیک ساختار شش ضلعی که در بین دو صفحه‌ی ثابت و متحرک قرار گرفته است

برای محاسبه‌ی سه المان جذب انرژی (EA)، جذب انرژی ویژه (SEA) و بار فروپاشی متوسط (MCL) از فرمول‌های زیر استفاده شده است [۲۰-۱۸]:

$$EA = \int_0^L P(x) dx \quad (1)$$

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (2)$$

$$MCL = \frac{EA}{L} \quad (3)$$

که در آنها $P(x)$ ، L و M به ترتیب نشان دهنده‌ی نیروی اعمال شده در هنگام بارگذاری، طول و جرم جاذب می‌باشد [۲۱ و ۲۲].

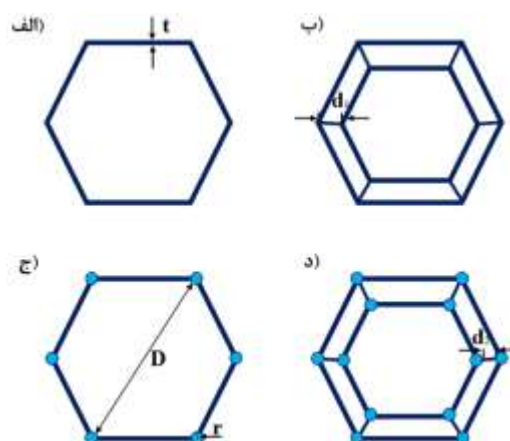
۳- اعتبارسنجی مدل و آزمایش تجربی

برای مدلسازی ساختارهای شش ضلعی ساده و بهبود یافته از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. با استفاده از آلومینیوم (AL 7075-T6) و دستگاه اینسترون ۷۷۵، خواص مکانیکی گزارش شد. با بهره‌گیری از نمودار تنش- کرنش برای سازه‌ی ساده (با توجه به شکل ۳)، مقدار مدول یانگ ۶۹/۲ گیگاپاسکال گزارش شده است. همچنین، نسبت پواسون برابر ۰/۳ و چگالی معادل ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش شده است.

گردد که سبب کاهش خسارات جانی و مالی می‌شود. همچنین، مطالعه‌ی این ساختارها می‌تواند منجر به نوآوری در هندسه و بهینه سازی مواد شود و در عین حال، به حداقل رساندن وزن و استفاده از مواد، قابلیت جذب انرژی بهتری را بدست آورد. از سویی دیگر، مدلسازی عددی و اعتبارسنجی تجربی کمک می‌کند تا درک بهتری از عملکرد سازه‌ها تحت بارگذاری بدست آید.

۲- مدلسازی و آزمایش

در شکل (۱) ساختار شش ضلعی ساده و بهبود یافته به صورت شماتیک به نمایش گذاشته است. در قسمت اول و برای ساختار شش ضلعی ساده، یک ساختار شش ضلعی کوچکتر در مرکز این سازه ایجاد شده است که این دو ساختار با اتصال رئوس هر وجه بهم متصل می‌شوند. برای نشانه گذاری فاصله رئوس از نماد d_1 استفاده شده است که مقدار آن ۱۵ میلی‌متر و ثابت می‌باشد. همچنین، ضخامت دیواره با نماد t و اندازه‌ی ۰/۸ میلی‌متر مشخص شده است. شایان ذکر است که فاصله‌ی دو رأس مقابل در شش ضلعی ساده با نماد D و با اندازه‌ی ۹۰ میلی‌متر به نمایش گذاشته شده است. در بخش دوم، ساختارهای شش ضلعی به صورت بهبود یافته ایجاد شده‌اند، به صورتی که در رأس هر بخش این سازه‌ها یک دایره با شعاع ثابت (۰/۶ میلی‌متر) قرار گرفته است. در این قسمت نیز برای مشخص نمودن فاصله‌ی بیرونی دایره‌ها از نماد d_2 و برای ضخامت دیواره‌ی سازه و دایره‌ها از t استفاده شده است. همچنین، شعاع هر دایره با نماد r مشخص گردیده است.



شکل ۱- شماتیک ساختار شش ضلعی ساده و بهبود یافته در دو حالت مختلف

با توجه به شکل (۲)، یک سازه‌ی شماتیک شش ضلعی مشاهده می‌شود که با کمک گرفتن از یک صفحه‌ی

هم به صورت پیش بینی مدل عددی ارایه شده است. در هر رأس از ساختار شاهد یک فروپاشی مشخص می‌باشیم که شرایط جذب انرژی بالاتری را فراهم می‌آورد. در طول فرآیند بارگذاری، روی هم فشرده شدن ساختار شش ضلعی ساده تا پایین‌ترین قسمت سازه پیش روی کرد و باعث ایجاد چین‌های منظم بر روی یکدیگر شد. اگرچه شکل (۴) بیانگر آن است که انطباق قابل قبولی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد، اما در بخش بعدی این مطالعه به مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی با بهره‌گیری از جدول و نمودارهای مربوطه خواهیم پرداخت.

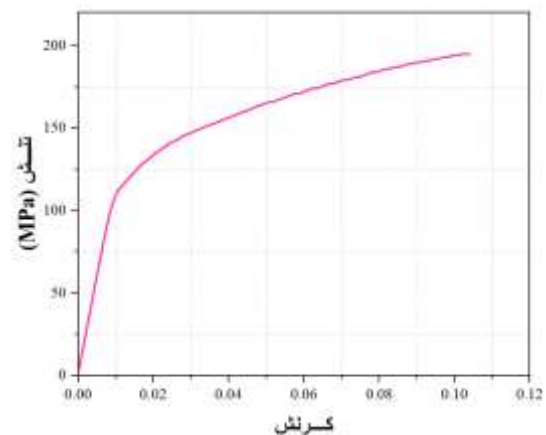
۴- بحث و نتایج

برای بررسی المان‌های جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بار فروپاشی متوسط ساختارهای شش ضلعی منظم و بهبود یافته که نمونه‌های آن در شکل (۱) ارایه شده است، مدلسازی این نمونه‌ها با ۴ ضخامت دیواره‌ی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این نکته را باید اذعان داشت که افزایش ضخامت دیواره یکی از المان‌های تأثیرگذار بر قابلیت‌های جذب انرژی می‌باشد. جدول ۱ اطلاعات مربوط به سازه‌های شش ضلعی ساده و منظم را برای ضخامت‌های مختلف ارایه کرده است.

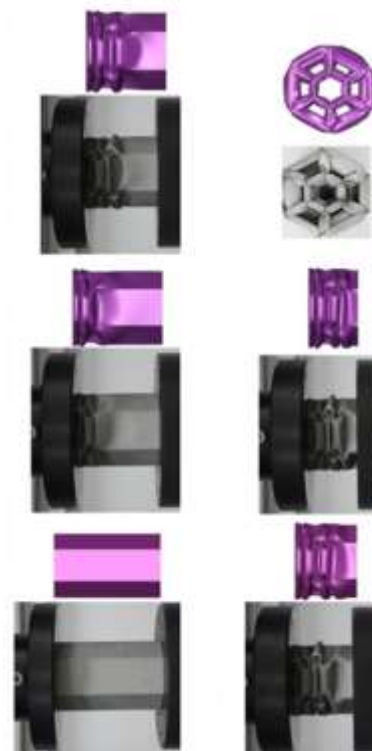
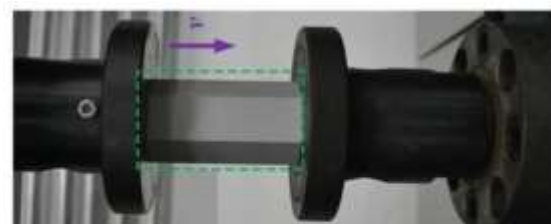
جدول ۱- ضخامت‌های انتخاب شده برای سازه‌های شش ضلعی ساده و بهبود یافته

نمونه	D	C	B	A
ضخامت (میلیمتر)	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳	۰/۳
	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۵۷	۰/۵۷
	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۲۹	۱/۲۹
	۲/۸۲	۲/۸۲	۲/۸۱	۲/۸۱

جدول ۲ نتایج عددی بدست آمده برای ساختارهای شش ضلعی ساده و بهبود یافته را برای ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار تنش-گرش آلومینیوم



شکل ۴- مقایسه‌ی حالت‌های تجربی و عددی برای ساختار شش ضلعی ساده

در بخش تجربی این مطالعه، نمونه سازه‌ی شش ضلعی ساده مورد آزمایش قرار گرفت. همانطور که در شکل (۴) قابل مشاهده است، فروپاشی نمونه هم به صورت آزمایشگاهی و

جدول ۲- قابلیت جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بار فروپاشی متوسط برای تمامی ساختارها

نمونه	ضخامت (میلیمتر)	EA (J)	SEA (kJ/kg)	MCL (kN)
A	۰/۳	۱۱۰۲	۱۲/۲۲	۱۷/۰۶
	۰/۵۷	۱۲۴۸	۱۳/۹۸	۱۸/۵۵
	۱/۲۹	۱۶۲۹	۱۷/۵۶	۲۱/۳۴
	۲/۸۱	۱۷۳۶	۱۸/۷۹	۲۲/۹۸
B	۰/۳	۱۱۲۸	۱۲/۷۹	۱۷/۷۸
	۰/۵۷	۱۳۴۴	۱۴/۱۱	۱۸/۶۹
	۱/۲۹	۱۷۸۲	۱۸/۰۷	۲۲/۴۹
	۲/۸۱	۱۸۱۱	۱۹/۱۳	۲۳/۱۱
C	۰/۳۲	۱۸۴۹	۱۹/۲۸	۲۲/۳۷
	۰/۶۱	۲۰۵۶	۲۱/۳۸	۲۴/۵۱
	۱/۳۱	۲۶۱۸	۲۷/۴۶	۳۰/۷۶
	۲/۸۲	۳۰۴۴	۳۱/۰۹	۳۵/۱۹
D	۰/۳۲	۲۱۳۹	۲۲/۱۵	۲۶/۴۷
	۰/۶۱	۲۴۷۱	۲۵/۷۱	۳۰/۹۱
	۱/۳۱	۲۹۱۶	۳۰/۵۱	۳۴/۸۱
	۲/۸۲	۳۴۵۹	۳۵/۱۶	۳۹/۲۵

با توجه به نتایج گزارش شده برای ساختارهای شش ضلعی ساده (نمونه‌های A و B) در جدول ۲، افزایش ضخامت در دیواره‌ی سازه‌ها باعث افزایش قابلیت‌های جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بار فروپاشی متوسط گشته است. برای محاسبه‌ی جذب انرژی از نقاط ثبت شده توسط دستگاه استفاده شده است. بدین صورت که نقاط ثبت شده‌ی نیرو به صورت دو به دو و نقاط ثبت شده‌ی جابجایی به صورت دو به دو با یکدیگر جمع می‌شوند و اعداد بدست آمده در یکدیگر ضرب می‌شود و در نهایت بر ۲ تقسیم می‌شوند. مجموع اعداد بدست آمده از مرحله‌ی پایانی بیانگر جذب انرژی می‌باشد. با در نظر گرفتن نمونه‌ی A، مقدار جذب

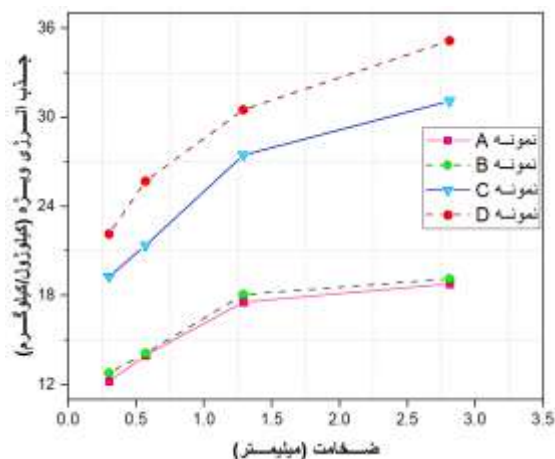
انرژی از ۱۱۰۲ ژول برای ضخامت ۰/۳ میلیمتر به ۱۷۳۶ ژول برای ضخامت ۲/۸۱ میلیمتر رسیده است که معادل ۵۷/۵۳ درصد افزایش یافته است. این افزایش در قابلیت جذب انرژی ویژه نیز قابل مشاهده است؛ به طوریکه، مقدار این خاصیت از ۱۲/۲۲ کیلوژول بر کیلوگرم برای ضخامت ۰/۳ میلیمتر به ۱۸/۷۹ کیلوژول بر کیلوگرم برای ضخامت ۲/۸۱ میلیمتر افزایش یافته است. همچنین، مقدار بار فروپاشی متوسط برای ضخامت ۲/۸۱ میلیمتر معادل ۳۴/۷۱ درصد نسبت به ضخامت ۰/۳ میلیمتر افزایش داشته است. این روند صعودی برای نمونه‌ی B نیز قابل مشاهده است. قابلیت‌های جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بار فروپاشی متوسط به ترتیب ۵۴٪/۶۰، ۵۶٪/۴۹ و ۹۷٪/۲۹ برای ضخامت ۲/۸۱ نسبت به ۰/۳ افزایش داشته است. شایان ذکر است که این افزایش ضخامت برای سازه‌های شش ضلعی بهبود یافته نیز سبب افزایش قابلیت‌های یاد شده گردیده است.

در این قسمت، به مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از ساختارهای شش ضلعی ساده و بهبود یافته می‌پردازیم. نتایج برای هر دو نمونه نشان دهنده‌ی آن است که حضور شش ضلعی کوچکتر در هر دو نمونه باعث افزایش قابلیت‌های مورد بررسی می‌گردد. از سویی دیگر، با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از نمونه‌های A (شش ضلعی ساده) و نمونه‌ی C (شش ضلعی بهبود یافته) می‌توان دریافت که حضور دایره‌هایی با شعاع ثابت در رأس سازه‌های شش ضلعی باعث افزایش قابلیت‌های جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بار فروپاشی متوسط می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که در ضخامت‌های مشابه، مقدار جذب انرژی از ۱۱۰۲ ژول به ۱۸۴۹ ژول افزایش داشته است. همچنین، با افزایش ضخامت، مقدار این قابلیت از ۱۷۲۶ ژول به ۳۰۴۴ ژول افزایش یافته است. این روند افزایشی برای جذب انرژی ویژه و بار فروپاشی متوسط نیز گزارش شده است. همچنین، حضور یک شش ضلعی کوچکتر برای سازه‌های بهبود یافته (نمونه D) نیز تأثیر بسزایی در افزایش قابلیت‌های مورد بررسی داشته است. مقدار قابلیت جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بار فروپاشی متوسط با افزایش ضخامت دیواره به ترتیب ۷۱٪/۶۱، ۷۳٪/۵۸ و ۲۸٪/۴۸ افزایش یافته است. برای درک بهتر نتایج گزارش شده در جدول ۲، نمودار شکل (۵) نیز ارائه شده است.

نواحی ضربه گیر در صنعت خودرو سازی مورد استفاده قرار گیرد که انرژی ضربه را جذب می کند و سبب کاهش نیروی منتقل شده به داخل خودرو می گردد. از این سازه ها می توان در صنعت هوافضا نیز استفاده نمود. به طوری که ظرفیت جذب انرژی بالای آنها برای حذف راندمان سوخت و در عین حال، افزایش دوام و ایمنی ایده آل کارآمد خواهد بود. از سویی دیگر، این سازه ها در مناطق زلزله خیز می تواند به عنوان تقویت تیرهای پشتیبان در ساختمان ها ایفای نقش نماید که توانایی آنها را در جذب و اتلاف انرژی ناشی از نیروهای لرزه ای بهبود می بخشد و آسیب را به حداقل می رساند.

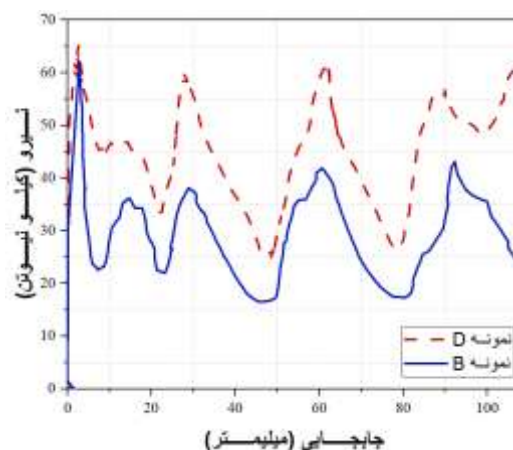
۵- نتیجه گیری

در این مقاله، قابلیت جذب انرژی ساختارهای جدارنازک شش ضلعی مورد مطالعه قرار گرفت. مدلسازی و آزمایش های تجربی بر ضخامت ساختار شش ضلعی ساده و شش ضلعی بهبود یافته صورت گرفت. در ادامه، اثر حضور یک شش ضلعی با ابعاد کوچکتر درون سازه ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج گزارش شده نشان داد که افزایش ضخامت دیواره برای هر دو ساختار شش ضلعی ساده و شش ضلعی بهبود یافته سبب افزایش قابلیت های جذب انرژی می شود. نتایج گزارش شده بیانگر آن بود که قابلیت جذب انرژی ویژه برای ساختار شش ضلعی ساده از ۱۲/۲۲ کیلوژول بر کیلوگرم با ضخامت ۰/۳ میلیمتر به ۱۸/۷۹ کیلوژول بر کیلوگرم با ضخامت ۲/۸۱ میلیمتر افزایش یافت که معادل ۵۳/۷۶ درصد افزایش را نشان می دهد. همچنین، مقایسه ی نتایج بدست آمده از جذب انرژی ویژه برای یک ضخامت ثابت (۱/۲۹ میلیمتر) برای دو ساختار ساده و بهبود یافته نشان داد که مقدار این خاصیت از ۱۷/۵۶ کیلوژول بر کیلوگرم به ۳۰/۵۱ کیلوژول بر کیلوگرم افزایش یافت که نشان دهنده ی اثر تقویت دیواره در ساختارها بود. از سویی دیگر، مقدار خاصیت جذب انرژی برای ساختار شش ضلعی ساده (نمونه ی A) از ۱۱۰۲ ژول با ضخامت ۰/۳ میلیمتر به ۱۷۳۶ ژول با ضخامت ۲/۸۱ میلیمتر افزایش یافت که ۵۷/۵۳ درصد افزایش را نشان می دهد. مقدار جذب انرژی برای ساختار شش ضلعی بهبود یافته از ۲۱۳۹ ژول با ضخامت ۰/۳۲ میلیمتر به ۳۴۵۹ ژول با ضخامت ۲/۸۲ افزایش یافت. مقایسه ی نتایج جذب انرژی برای دو ساختار شش ضلعی ساده و بهبود یافته در یک ضخامت ثابت، افزایش ۷۹ درصدی را نشان داد.



شکل ۵- تغییرات قابلیت جذب انرژی ویژه نسبت به ضخامت برای نمونه های مختلف

برای نشان دادن روند تغییرات بار-جابجایی سازه های مورد بررسی، نمودار شکل (۶) به نمایش گذاشته شده است که در آن، تغییرات بار-جابجایی دو نمونه ی B و D نشان داده شده است. با توجه به نمودار، کاملاً واضح است که نمونه ی شش ضلعی بهبود یافته توانسته است نیروی بیشتری را نسبت به نمونه ی شش ضلعی ساده تحمل کند و نشان دهنده ی آن است که انطباق قابل قبولی با نتایج گزارش شده در جدول ۲ دارد.



شکل ۶- مقایسه ی نمودار بار-جابجایی دو نمونه ی B و D

نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می دهد که افزایش ضخامت دیواره ی سازه های شش ضلعی به عنوان یک عامل اثرگذار بر خواص این سازه ها معرفی می شود. همچنین، تقویت سازه های شش ضلعی سبب تغییرات عمده ای در جذب انرژی و بار فروپاشی متوسط می گردد. در نتیجه، با استفاده از نتایج تجربی و عددی می توان کاربرد عملیاتی سازه های شش ضلعی جدار نازک را در زمینه های مختلف در نظر گرفت. استفاده از این سازه ها می تواند به عنوان

تعارض منافع

نویسندگان مقاله تایید می‌کنند که هیچ گونه تعارض منافع مالی، حرفه‌ای یا شخصی که بر نتایج یا تفسیر پژوهش تاثیر بگذارد، وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله‌ی دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت نویسندگان

مهدی بینقی: کد نویسی، بررسی، تفسیر نتایج، نگارش مقاله

علی دادرسی: تعریف مساله، نظارت، ارزیابی

محسن بینقی: اعتبارسنجی، ویرایش

منابع مالی

هیچ گونه حمایت مالی برای این پژوهش صورت نگرفته است.

مراجع

- [1] Liu, Hu, Zheng Chng, Guanghian Wang, and Bing Ng. "Crashworthiness improvements of multi-cell thin-walled tubes through lattice structure enhancements." *International Journal of Mechanical Sciences* 210, no. 15 (2021): 106731.
- [2] Liang, Rui, Xuebang Tang, Jie Huang, Cheng Zhang, and Wanghie Tuo. "Experimental Studies on Energy Absorption of Curved Steel Sheets under Impact Loading and the Effect of Pendentive on the Deformation of Samples." *Journal of Modeling in Engineering* 18, no. 63 (2020): 27-40.
- [3] Zhang, Hongbo, Dayong Hu, Haojie Peng, Wentao Yuan, Zhen Zhang, Zhenyu Yang, and Zhing Zhang. "In-plane crashworthiness study of bio-inspired metallic lattice structure based on deep-sea glass sponge." *Thin-Walled Structures* 205, no. 15 (2024): 112505.
- [4] Miao, Fuxing, and Yue Jin. "Crashworthiness analysis and structural optimization of thin-walled circular tubes with porous arrays." *Structures* 70, no. 16 (2024): 107811.
- [5] Singh, Kumar, Ramesh Pandey, and Ashutosh Upadhyay. "A numerical study on combined effects of groove shape and numbers on crashworthiness characteristics of thin-walled tube." *Materials Today: Proceedings* 44, no. 6 (2020): 4381-4386.
- [6] Fu, Jie, Qiang Liu, Xiaokang Ma, and Ming Cai. "Experimental investigation of impact loading effects on rectangular flat panels of fiber self-compacting cementations composite with expanded steel sheet." *Journal of Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering* 42, no. 318 (2020): 221453.
- [7] Ye, Xiu, Xiaojie Shi, Xiaojin Miao, Peipei Lu, and Meiping Wu. "The influence mechanism of fractal design method on mechanical properties and corrosion behavior of sheet Gyroid porous structures formed by LPBF." *Materialstoday* 41, no. 8 (2024): 110373.
- [8] Pehlivan, Levent, and Cengiz Baykasong. "Theoretical and Numerical Study and Comparison of the Inertia Effects on the Collapse Behavior of Expanded metal tube Absorber with Single and Double Cell under Impact Loading." *Amirkabir Journal of Mechanical Enginnering* 50, no. 5 (2019): 999-1014.
- [9] Viccica, Marco, Manuela Galati, Flaviana Calignano, and Luca Iuliano. "Design, additive manufacturing, and characterization of a three-dimensional cross-based fractal structure for shock absorption." *Thin-Walled Structures* 181, no. 15 (2022): 110106.
- [10] Zhu, Guohua, Zhonghao Zhao, Po Hu, Geng Luo, Xuan Zhao, and Qiang Yu. "On energy-absorbing mechanisms and structural crashworthiness of laterally crushed thin-walled structures filled with aluminum foam and CFRP skeleton." *Thin-Walled Structures* 160, no. 1 (2021): 107390.
- [11] Albak, Emre. "Crashworthiness design for multi-cell circumferentially corrugated thin-walled tubes with sub-sections under multiple loading conditions." *Thin-Walled Structures* 164, no. 11 (2021): 107886.
- [12] Abdulgadir, Seif, Ammar Abed, and Alaseel Bassam. "Crashworthiness enhancement of thin-walled hexagonal tubes under flexural loads by using different stiffener geometries." *Materials Today: Proceedings* 42, no. 5 (2021): 2887-2895.
- [13] Liu, Bin, and Xiang Xu. "Experimental and numerical study on crashworthiness of bionic hedgehog spine thin-walled structures." *Thin-Walled Structures* 189, no. 13 (2023): 110892.

- [14] Ying, Liang, Sensen Wang, and Yong Wang. "Crashworthiness analysis and optimization of multi-functional gradient foam-aluminum filled hierarchical thin-walled structures." *Thin-Walled Structures* 189, no. 8 (2023): 110906.
- [15] Liang, Rui, XI Liu, and Christophe Bastien. "A methodology to investigate and optimise the crashworthiness response of foam-filled twelve right angles thin-walled structures under axial impact." *Composites Structures* 310, no. 15 (2023): 116736.
- [16] Xiao, Yong, Qian Wu, and Hong Hu. "Optimization design of crashworthiness of polyurethane foam filled Origami thin wall square tube based on an surrogate model." *Structures* 65, no. 12 (2024): 106713.
- [17] Yao, Ruyang, Tong Pang, and Guangyong Sun. "On the crashworthiness of thin-walled multi-cell structures and materials: State of the art and prospects." *Thin-Walled Structures* 189, no. 8 (2023): 110734.
- [18] Li, Tianjun, Zhilong Huang, Jing Zhao, Xiongfei Xu, and Xiaobo Guo. "Pore structure characteristics and their influencing factors: A case study from the middle jurassic mixed siliciclastic carbonate rocks, Turpan-Hami basin, Northwest China." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 203, no. 11 (2021): 108611.
- [19] Cui, Cy, Song Feng, Xong Cui, and Jing Lu. "Compressive resistance of the bio-inspired cuttlebone-like sandwich structure under quasi-static load." *International Journal of Mechanical Sciences* 248, no. 15 (2023): 108222.
- [20] Qin, Ruixian Xi Wang, Feng Gao, and Bingzhi Chen. "Energy absorption performance of hexagonal multi-cell tube with hierarchy under axial loading." *Thin-Walled Structures* 169, no. 24 (2021): 108392.
- [21] Mohammadi, Hossein, Zaini Ahmad, Michal Petru, Saiful Mazlan, Mohd Johari, Hossein Hatami, and Saeid Koloor. "An insight from nature: honeycomb pattern in advanced structural design for impact energy absorption." *Journal of Materials Research and Technology* 22, no. 19 (2023): 2862-2887.
- [22] Ma, Daofan, Wang Guangwei, Ma Youguang, Zhu Chunying, and Tang Xiangyang. "Hydrodynamics behavior and mass transfer performance of gas-liquid two-phase flow in the honeycomb fractal microreactor." *Chemical Engineering Journal* 462, no. 15 (2023): 142228.