مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 213-223

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل تجربی، عددی و تئوری فرآیند جذب انرژی پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع جدارنازک H شکل

مجتبی فیروزی[1]، عباس نیک‌نژاد[2*]، محمدرحیم همتیان[3]، سیما ضیایی[2]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز
*یاسوج، صندوق پستی 353-75914، aniknejad@yu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 اردیبهشت 1396
پذیرش: 03 تیر 1396
ارائه در سایت: 18 مرداد 1396

کلید واژگان:
بارگذاری جانبی
پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع H شکل
پهن‌شدگی جانبی
فوم پلی‌یورتان
جذب انرژی مخصوص

چکیده

این مقاله، ظرفیت جذب انرژی و نحوه تغییرشکل پلاستیک فرآیند پهن‌شدگی جانبی یک نوع پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع H شکل، تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه استاتیکی را به روش آزمایشگاهی، عددی و تئوری بررسی می‌کند. نمونه‌ها با طول متفاوت در سه حالت پرشدگی مختلف شامل توخالی، هسته پرشده و به‌طور کامل پرشده توسط فوم پلی‌یورتان، آماده شده‌اند. همچنین، نمونه‌هایی با هندسه و شرایط پرشدگی یکسان با زوایای صفر و 90 درجه تحت فشار جانبی قرار گرفته‌اند. اثر پارامترهایی مانند طول، سه حالت پرشدگی مختلف و زاویه بارگذاری بر روی نیروی جانبی و جذب انرژی مخصوص، به‌صورت تجربی بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند، جذب انرژی مخصوص، مستقل از طول نمونه‌ها است. در زاویه بارگذاری 90 درجه، وجود پرکننده باعث افزایش جذب انرژی مخصوص سازه می‌شود. بهترین گزینه، استفاده از پروفیل کاملاً پرشده تحت زاویه بارگذاری 90 درجه است. رابطه تئوری جهت تخمین میزان جذب انرژی کل، برای نمونه توخالی تحت زاویه بارگذاری صفر درجه براساس دو مکانیزم مختلف جذب انرژی استخراج و نتایج حاصل با نمونه آزمایشگاهی مقایسه گردید. به‌علت محدودیت آماده سازی نمونه‌ها با ابعاد هندسی مختلف از نرم‌افزار غیرخطی آباکوس استفاده شد. نمونه‌هایی با ضخامت‌های مختلف مدل‌سازی و اثر ضخامت بر جذب انرژی کل بررسی گردید. جذب انرژی کل با توان دوم ضخامت نسبت مستقیم دارد که این موضوع را، رابطه تئوری ارائه شده و نتایج به‌دست آمده از حل عددی نشان می‌دهد. مطابقت بسیار خوب نتایج تجربی، عددی و تئوری با درصد خطای بسیار کم، دقت و صحت پژوهش انجام شده را نشان می‌دهد.

Experimental, numerical and theoretical analysis of energy absorption process by aluminum profile with H-shaped thin-walled cross section

Mojtaba Firouzi[1], Abbas Niknejad[1*], Mohammad Rahim Hematiyan [2], Sima Ziaee[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
* P.O. B. 75914-353, Yasouj, Iran, aniknejad@yu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 May 2017
Accepted 24 June 2017
Available Online 09 August 2017

Keywords:
Lateral loading
Aluminum profiles with H-shaped cross section
Lateral flattening
Polyurethane foam
Specific absorbed energy

ABSTRACT

This article investigates energy absorption capacity and plastic deformation trend of lateral flattening of an aluminum profile with H-shaped cross section under the quasi-static lateral loading by experimental, numerical and theoretical methods. Samples were prepared with different lengths and three different filling conditions including empty, core-filled and perfectly-filled by polyurethane foam. In addition, samples with the same geometry and filling conditions were laterally compressed with loading angles of 0 and 90 degrees. Effect of some parameters such as length, three different filling conditions and loading angle were experimentally investigated on lateral force and specific absorbed energy (SAE). The results show that SAE is independent of samples length. At the loading angle of 90 degrees, presence of the filler causes increment of SAE by the structure. Using the perfectly-filled profile under the loading angle of 90 degrees is the most optimum condition. Based on two different energy absorption mechanisms, a theoretical equation was derived to estimate total absorbed energy (TAE) by empty sample with loading angle of zero; and predicted results were compared with the experimental samples. Due to present limitations in preparing the samples with different geometrical dimensions, nonlinear ABAQUS software was employed. Some samples with different wall thicknesses were modeled and influence of thickness was investigated on TAE. TAE is directly correlated to the second power of wall thickness; and this relationship can be clearly understood from the theoretical equation and numerical results. High correlation of experimental, numerical and theoretical results indicates precision and accuracy of the performed research.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Firouzi, A. Niknejad, M. R. Hematiyan, S. Ziaee, Experimental, numerical and theoretical analysis of energy absorption process by aluminum profile with H-shaped thin-walled cross section, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 213-223, 2017 (in Persian)

1- مقدمه

مستهلک کردن انرژی و تحمل نیروی وارده از طرف عامل یا عوامل خارجی به هر جسم یا سازه‌ای طی برخورد، امری حیاتی برای حفظ ایمنی بشر است. مجموعه‌ای که وظیفه اتلاف یا جذب انرژی را طی برخورد بر عهده دارد، جاذب انرژی نامیده می‌شود. مستهلک کردن انرژی علاوه بر اینکه برای حفظ ایمنی و سلامت انسان‌ها موضوع با اهمیتی است، از نگاه فنی و مهندسی نیز لازمه حفظ تجهیزات صنعتی و ساختمانی حساس و ارزشمند است. جاذب‌های انرژی، سیستم‌هایی هستند که قسمتی از انرژی جنبشی یا تمام آن را به انواع دیگر انرژی تبدیل می‌کنند و به دو نوع برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر دسته‌بندی می‌شوند. جاذب انرژی برگشت‌ناپذیر معمولاً طی یک فرآیند تغییر شکل پلاستیک، انرژی را مستهلک می‌کند و پس از هر بار استفاده بایستی تعویض گردد؛ ولی جاذب انرژی برگشت‌پذیر که براساس خاصیت الاستیک مواد کار می‌کند به دفعات قابل استفاده است. هدف از طراحی یک جاذب انرژی بازگشت‌ناپذیر، جذب انرژی جنبشی زیاد ناشی از بارگذاری به‌وسیله بروز تغییر شکل پلاستیک و فدا شدن یک قطعه (جاذب انرژی) است تا از کاهش صدمات انسانی و خسارت وارد بر تجهیزات، اطمینان حاصل شود.

در یک جاذب انرژی برگشت‌ناپذیر که تحت بارگذاری‌های مختلف مانند بارگذاری محوری، عرضی و مایل قرار می‌گیرد، مکانیزم‌های تغییرشکل پلاستیک متنوعی مانند مچالگی محوری [1]، وارونگی [2]، پهن‌شدگی جانبی [3] و پارگی محوری [4] بروز می‌کند. سازه‌های جدارنازک متنوعی مانند مقاطع جدارنازک دایره‌ای، چهارگوش، شش‌گوش و لانه زنبوری با هندسه ها و مواد مختلف، به عنوان جاذب انرژی تحت شرایط بارگذاری متفاوت، تحلیل و بررسی شده‌اند. وزن و حجم کم، استحکام بالا، در دسترس بودن و صرفه اقتصادی مزیت‌هایی است که موجب انجام پژوهش‌های مستمر برای استفاده از این سازه‌ها و بهینه کردن ویژگی‌های جذب انرژی آن‌ها شده است. در برخی موارد، برای افزایش مقاومت جاذب‌های انرژی از مواد پرکننده‌ای مانند فوم آلومینیوم [5]، فوم پلی‌یورتان و فوم پلی‌استیرن استفاده می‌شود. سازه‌های جدارنازک به دلیل خواص منحصر بفرد خود نظیر استحکام به وزن بالا، در دهه های اخیر موضوع تحقیقات تجربی، تئوری و عددی پژوهشگران بسیاری بوده‌اند که این امر، اهمیت موضوع را نشان می‌دهد.

در سال 1960 میلادی، موچلر [6]، رفتار مکانیکی لوله‌های آلومینیومی را تحت بارگذاری فشار جانبی بین دو صفحه صلب تخت بررسی کردند. درانتز و هاج [7]، به بررسی رفتار لوله‌های آلومینیومی تحت فشار جانبی بین دو صفحه صلب تخت به دو روش تئوری و تجربی پرداختند. بورتن و کرایگ [8]، عملکرد جذب انرژی لوله‌های فلزی را تحت بار فشار جانبی بین دو صفحه صلب تخت به روش‌های تئوری و تجربی مطالعه کردند. هانسن و همکاران [9] به‌منظور طراحی یک جاذب انرژی بهینه، اثر یک نوع پرکننده را درون سازه‌های جدارنازک بررسی کردند. در سال 2005 میلادی، گوپتا و همکاران [10]، الگوی تغییرشکل و رفتار جذب انرژی ستون‌های دایره‌ای ساخته شده از آلومینیوم و فولاد نرم را تحت بار جانبی به روشهای عددی و تجربی بررسی کردند. کارامانوس و الفتریادیس [11]، لهیدگی جانبی لوله‌های دایره‌ای را در شرایط شبه‌استاتیکی مطالعه کردند. فان و همکاران [12]، مطالعه‌ای تجربی و عددی بر روی لوله‌های جدارنازک پر شده از فوم آلومینیم با نسبت قطر به ضخامت‌های مختلف، انجام دادند. در سال 2012 میلادی، نیک‌نژاد و همکاران [13]، اثر فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های مختلف را بر روی رفتار جذب انرژی لوله‌های برنجی با سطح مقطع دایره‌ای تحت بارگذاری فشار جانبی شبه‌استاتیکی، بررسی کردند. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد، استفاده از فوم پلی‌یورتان میزان جذب انرژی مخصوص را طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی افزایش می‌دهد. نیک‌نژاد و همکاران [14]، تحلیل تئوری و تجربی فرآیند پهن‌شدگی جانبی بر روی نمونه‌های جدارنازک با مقاطع چهارگوش مربعی و مستطیلی را ارائه نمودند. نیک نژاد و رحمانی [15]، له‌شدگی جانبی مقاطع جدارنازک فلزی با سطح مقطع شش‌گوش منتظم در دو حالت توخالی و پرشده از فوم پلی‌یورتان با چگالی پایین را تحت بارگذاری جانبی شبه‌استاتیکی بررسی نمودند. در سال 2015، ظهرابی و همکاران [16]، روش جدیدی برای افزایش میزان جذب انرژی مقاطع جدارنازک آلومینیومی با سطح مقطع مربعی و مستطیلی تحت بارگذاری جانبی شبه‌استاتیکی، پیشنهاد کردند. ژائو و همکاران [17]، به بررسی تجربی و عددی میزان جذب انرژی یک نوع فوم ساده و یک نوع فوم هدفمند استفاده شده در تیر عرضی سپر خودرو پرداختند. شن و همکاران [18]، مطالعه‌ای تئوری و تجربی بر روی رفتار جذب انرژی و الگوی تغییرشکل پلاستیک لوله‌های پرشده از فوم آلومینیوم تحت بار جانبی شبه‌استاتیکی انجام دادند. باروتاجی و همکاران [19]، به بررسی میزان جذب انرژی لوله‌های تودرتو تحت بارگذاری جانبی شبه استاتیکی و بارگذاری دینامیکی پرداختند. در سال 2016 میلادی، نیک‌نژاد و حیدری ارجلو [20]، رفتار یک سیستم از لوله‌های تودرتوی شیاردار با سطح مقطع خاص را به عنوان یک جاذب انرژی جدید، به روش آزمایشگاهی بررسی کردند. باروتاجی و همکاران [21]، به بررسی تجربی و عددی لوله‌های ساندویچی پرشده از فوم آلومینیوم تحت بار جانبی شبه‌استاتیکی پرداختند. از دیدگاه کاربردی، جاذب‌های انرژی عرضی در صنایع خودروسازی، کشتی‌سازی، راه‌آهن و نظامی نقش قابل توجهی ایفاء می‌کنند. به عنوان مثال، یکی از مهترین قطعات سپر خودرو، تیر عرضی است. تیر عرضی سپر خودرو، وظیفه مستهلک کردن انرژی جنبشی ناشی از برخوردها طی ضربات از روبرو را بر عهده دارد. طی این فرآیند، تیر عرضی تحت بارگذاری فشار جانبی قرار می‌گیرد و با بروز تغییر شکل‌های پلاستیک در آن، بخش قابل توجهی از انرژی ناشی از برخورد را مستهلک می‌کند. از سازه‌های جدار نازک در ستون‌ها، سپر، شاسی، بدنه و سیستم فرمان خودرو، قسمت‌های در معرض برخورد کشتی‌ها، قطارها، کف آسانسورها، بالگردها، فضاپیماها و مخازن سوخت به عنوان جاذب انرژی استفاده می‌شود. همچنین، از لوله‌ها و صفحات مواج فلزی به عنوان جاذب انرژی در جاده‌ها استفاده می‌شود. این کاربردهای صنعتی، اهمیت بررسی رفتار مقاطع جدارنازک تحت بارگذاری جانبی را نشان می‌دهد به همین دلیل، فعالیت‌های پژوهشی متعددی رفتار مقاطع جدارنازک فلزی و کامپوزیتی را تحت بارگذاری‌های دینامیکی و شبه‌استاتیکی با هدف جذب انرژی بررسی کرده‌اند. گله‌داری و همکاران[22]، به بررسی تجربی، تئوری و عددی سازه‌های لانه زنبوری تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی با سرعت کم پرداختند. چوبینی و همکاران [23]، جذب انرژی و تغییرشکل لوله‌های جدارنازک توخالی و توپر با سطح مقاطع دایره‌ای و مربعی را تحت بار عرضی شبه‌استاتیکی و دینامیکی بصورت تجربی و عددی مطالعه کردند. آن‌ها در این پژوهش اثر تغییرشکل هندسی لوله آلومینیومی و همچنین بررسی اثر وجود فوم بر روی ظرفیت جذب انرژی ساختار را بررسی کردند. رجبیه فرد و همکاران [24]، رفتار پوسته‌های استوآن‌هایی با توزیع‌های ضخامت مختلف را تحت دو بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی و دینامیکی بصورت تجربی و عددی مطالعه کردند.

دامغانی نوری و همکاران [25]، عملکرد استوانه‌های مشبک تحت بارگذاری دینامیکی را به عنوان جاذب انرژی بصورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش نوع فروریزش، نمودار نیرو-جابجایی و پارامترهای مؤثر بر فرآیند را مطالعه کردند. مهدی و هنمودا [26]، به بررسی اثر زاویه شش‌وجهی و جهت بارگذاری بر میزان انرژی جذب شده و الگوی شکست رینگ شش وجهی کامپوزیتی تحت بار جانبی پرداختند. همچنین مهدی وکادی [27]، لوله‌های کامپوزیتی با مقطع بیضی شکل را تحت بارگذاری فشار جانبی مورد بررسی قرار دادند. قاجار و رصاف [28]، به بررسی تجربی اثر شکل ضربه زننده بر رفتار صفحه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت ضربات سرعت پائین پرداختند. آن‌ها میزان آسیب، زمان برخورد، بیشینه نیروی برخورد، انرژی جذب شده و جابجایی را برای چهار ضربه زننده مختلف با یکدیگر مقایسه کردند. توسلی و همکاران [29]، مدل تجربی- تحلیلی جذب انرژی پروفیل کامپوزیتی کلاهی شکل تحت نیروی عرضی با سرعت پائین در سه شرایط مختلف تکیه‌گاهی را بررسی کردند.

در این پژوهش، رفتار جذب انرژی یک نوع پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع H شکل، تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی به روش آزمایشگاهی در سه حالت مختلف شامل یک حالت توخالی و دو حالت پرشده از فوم پلی‌یورتان، بررسی می‌شود. همچنین، رفتار این نوع ساختار در حالت توخالی به دو روش تئوری و عددی، مطالعه می‌شود. فرآیند پهن‌شدگی جانبی این پروفیل H شکل برای اولین بار بررسی می‌شود و اثر پارامترهای مختلف از جمله طول، نحوه پرشدگی نمونه‌ها و نیز زاویه امتداد بار جانبی با خط تقارن دو شیار طولی، بر روی ظرفیت جذب انرژی پروفیل آلومینیومی به روش تجربی بحث و بررسی می‌شود. بدین منظور، نمودارهای نیروی جانبی برحسب تغییر مکان و نیز انرژی جذب شده- تغییر مکان جانبی برای هر آزمایش رسم می‌گردد و سپس، جذب انرژی مخصوص نمونه‌های مختلف با شرایط هندسی و پرشدگی متفاوت با یکدیگر مقایسه می‌شوند تا حالت مناسب برای جذب انرژی پیشنهاد گردد. همچنین در تحلیل تئوری، با مشاهده الگوی تغییرشکل پلاستیک پروفیل آلومینیومی توخالی تحت بارگذاری جانبی شبه استاتیکی، مدل تئوری تغییرشکل پلاستیک این نوع ساختار ارائه می‌گردد و براساس آن، مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی مشخص، و با محاسبه میزان جذب انرژی توسط هر مکانیزم، رابطه‌ای تئوری برای تخمین ظرفیت جذب انرژی ساختار H شکل توخالی، استخراج می‌شود. در ضمن، با توجه به محدودیت تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی متنوع، از نرم افزار المان محدود آباکوس جهت بررسی پارامترهای مختلف هندسی استفاده می‌شود. بنابراین به منظور صحت سنجی و ارزیابی دقت نتایج عددی، نمونه آزمایشگاهی موجود تحت دو زاویه بارگذاری جانبی مختلف، بصورت عددی شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از تحلیل عددی، شامل الگوی تغییرشکل و نمودار نیروی جانبی بر حسب تغییرمکان جانبی، با نتایج متناظرآزمایشگاهی مقایسه می‌شود. سپس برای بررسی اثر ضخامت جداره ساختار، نمونه‌هایی با ضخامت‌های جداره مختلف به روش المان محدود تحلیل می‌شوند. درضمن جهت اعتبارسنجی، نتایج تئوری و عددی با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند.

2- تعیین مشخصات مادی پروفیل

پروفیل آلومینیومی، از روش اکستروژن و با طول اولیه 6 m تولید شد و سپس، طی فرآیند برش‌کاری با استفاده از اره دوار، به نمونه‌هایی با طول مطلوب تبدیل شد. این پروفیل از یک نوع آلیاژ آلومینیوم ساخته شده است که برای بدست آوردن مشخصات مادی آن، ابتدا نمونه‌های دمبلی شکلی براساس استاندارد ASTM E8M از آن‌ها ساخته شد و تحت تست کشش استاتیکی تک‌محوره استاندارد، نمودار تنش-کرنش آن تعیین گردید. همچنین، برای تعیین نوع آلیاژ آلومینیوم و ساختار مادی آن، آزمون آنالیز شیمیایی براساس استاندارد ASTM E1251-11 بر روی قطعه‌ای از آن انجام گردید. مشخصات مادی آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در ساخت پروفیل H شکل، در جدول 1 گزارش شده است. با انجام آزمون آنالیز شیمیایی، نوع آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده، Alloy 6063-T6 تعیین گردید.

3- تحلیل آزمایشگاهی

برای بررسی الگوی تغییرشکل و میزان جذب انرژی پروفیل آلومینیومی H شکل، تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی، از روش آزمایشگاهی استفاده شده است. "شکل 1"، نمونه‌ای از این نوع پروفیل را نشان می‌دهد. تمام تست‌ها، با دستگاه DMG مدل 7166 انجام شده است. هر نمونه پس از تهیه و آماده‌سازی، به صورت جانبی بین دو صفحه صلب تخت، تحت فشار جانبی با نرخ بارگذاری 10 میلی‌متر بر دقیقه، قرار گرفت، لذا، شرایط شبه‌استاتیکی بر تحلیل آزمایشگاهی، حاکم است. در هر آزمایش، نمودار نیروی جانبی- جابجایی و نمودار انرژی جذب شده- جابجایی رسم می‌شوند. علاوه بر این، جذب انرژی کل و جذب انرژی مخصوص که بیانگر نسبت جذب انرژی کل به جرم سازه است، برای هر نمونه محاسبه می‌شود. "شکل 1"، پارامترهای مختلف هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی را معرفی می‌کند. پارامترهای h، w، d، b و t، ابعاد هندسی پروفیل را مطابق شکل نشان می‌دهند. در ضمن، l بیانگر طول نمونه‌ها عمود بر سطح مقطع (در شکل 1، طول نمونه‌ها عمود بر صفحه کاغذ) است. مقادیر این پارامترهای هندسی به همراه تنش جریان آلیاژ آلومینیوم سازنده این نوع ساختار، در جدول 1 ذکر شده است.

در این پژوهش، از فوم پلی‌یورتان با چگالی 50 کیلوگرم بر متر مکعب و تنش مسطح 260 کیلوپاسکال به عنوان پرکننده استفاده می‌شود. فوم پلی-یورتان از ترکیب دو ماده اولیه با نام‌های تجاری ایزو و پلی ساخته شده است. برای تولید نمونه‌های توپر، نسبت حجمی مساوی از این دو ماده، اندازه‌گیری و درون ظرفی با یکدیگر ترکیب شده‌اند. قبل از شروع واکنش شیمیایی، این ترکیب درون پروفیل تزریق شده است. پس از یک مدت زمان مشخص، نمونه پر شده از فوم، آماده استفاده است. با توجه به این‌که هندسه مقطع لوله، دو جداره است در یک حالت نمونه توخالی، در حالت دوم، نمونه‌ای با هسته پرشده و در حالت سوم نمونه‌ای که بطور کامل از فوم پلی‌یورتان پرشده است، آزمایش و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. "شکل 1"، هر سه حالت پرشدگی مختلف را نشان می‌دهد. همچنین، نمونه‌ها با سه طول مختلف و با دیگر خصوصیات یکسان، تست می‌شوند. همان‌طورکه در "شکل 2" نشان

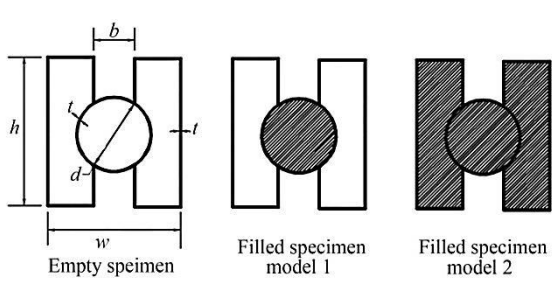

Fig. 1 Experimental specimens, empty and filled by the foam, model 1 and 2

شکل 1 نمونه‌های آزمایشگاهی توخالی و پرشده از فوم مدل 1و 2

جدول 1 خصوصیات هندسی و مادی برای پروفیل H شکل

Table 1 Geometrical and material properties of the H-shaped profile

w (mm)	h (mm)	d (mm)	t (mm)	b (mm)	تنش جریان (MPa)
40	40	20	1.6	13	185

داده شده است، علاوه بر پارامترهای هندسی ذکر شده، زاویه امتداد بارگذاری جانبی با خط تقارن گذرنده از وسط عرض دو شیار طولی، β نامگذاری می‌شود. برای هر یک از سه حالت پرشدگی مختلف، اثر زاویه بارگذاری جانبی، β نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور صحت و دقت نتایج، هر یک آزمایش‌ها حداقل دو مرتبه تکرار شده‌اند. نمونه‌های آزمایشگاهی مربوط به سه حالت پرشدگی مختلف، تحت دو زاویه بارگذاری جانبی صفر و 90 درجه تست شده‌اند. "شکل 3"، یک جفت نمونه توخالی و یک جفت نمونه توپر را تحت دو زاویه بارگذاری مختلف، نشان می‌دهد. جدول 2 طول نمونه، شرایط پرشدگی، زاویه بارگذاری و جرم هر نمونه را گزارش می‌دهد. در کدگذاری نمونه‌ها، پسوند F1، نمونه‌های با هسته پرشده و پسوند F2، نمونه هایی که بطور کامل با فوم پلی‌یورتان پرشده‌اند را مشخص می‌کند. در این سیستم کدگذاری، پسوند E، بیانگر توخالی بودن نمونه‌هاست.

4- مدل عددی

از نرم‌افزار غیرخطی آباکوس و روش حل صریح، برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. در مدلسازی دستگاه DMG، فقط صفحات میز دستگاه (دو فک مسطح دستگاه) مدل شده و نمونه نیز پس مدل شدن، در ماژول چیدمان قطعات، بین این دو صفحه قرار گرفته است. صفحات میز دستگاه بصورت صلب مدل شده‌اند و نمونه‌های جدارنازک با تکنیک اکستروژن، در ماژول قطعات، ایجاد شده‌اند.

برای تعریف جنس نمونه، در ماژول خصوصیات مواد، چگالی 2700 کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ E=70 GPa، تنش تسلیم σy =180 MPa و ضریب پواسون ν=0.3 برای خواص الاستیک تعریف شده‌اند و برای خواص پلاستیک، نمودار تنش-کرنش حقیقی تعریف شده است. همچنین در قسمت تعریف برهم‌کنش، بین صفحات صلب و نمونه جدارنازک شرایطی انتخاب می‌شود تا از نفوذ نمونه درون سطح صلب جلوگیری شود. ضریب اصطکاک بین نمونه و صفحات صلب 0.3 در نظر گرفته شده است که مقدار آن، از آزمایش سطح شیبدار اندازه‌گیری شده است. برای استقلال حل عددی از مش‌بندی، شبیه‌سازی‌های متعددی با تعداد المان‌های مختلف انجام شد تا اندازه مش مناسب که منجر به همگرایی جواب می‌شود، مشخص شود. چگالی مش‌بندی، به تدریج از 0.009 تا 0.002 کوچک شد که مطابق شکل 4 در بازه 0.004 تا 0.002، با کوچک‌تر کردن اندازه المان‌ها، تغییر قابل توجهی در پاسخ تحلیل عددی و میزان جذب انرژی کل مشاهده نشد. لذا، در تمام شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده، از چگالی دانه‌بندی 0.002 استفاده شده است. برای المان‌بندی نمونه، از المان Solid با کد C3D8R استفاده شده است که دارای هشت گره روی هشت رأس المان مکعبی شکل است و روش انتگرال‌گیری روی نقاط آن، از نوع کاهش یافته است. با توجه به محدودیت تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، جهت بررسی نمونه‌های بیشتر با ابعاد هندسی مختلف از نمونه‌های توخالی شبیه‌سازی شده در نرم افزار آباکوس استفاده می‌شود. مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده در جدول 3 ارائه شده است.

5- تحلیل تئوری

با مشاهده الگوی تغییرشکل پروفیل آلومینیومی تحت بارگذاری فشارجانبی شبه استاتیکی، الگوی تغییر شکل تئوری و مکانیزم‌های جذب انرژی این الگو مشخص می‌شوند. تحلیل تئوری، برای مقطع جدار نازک توخالی تحت زاویه بارگذاری صفر درجه ارائه می‌شود. در تحلیل تئوری، از مدل مادی «صلب- پلاستیک کامل» استفاده می‌شود. در این مدل مادی، از تغییر شکل‌های الاستیک در مقایسه با تغییرشکل‌های پلاستیک صرفنظر می‌شود و

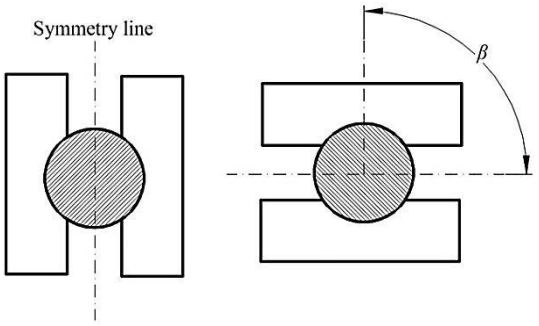

Fig. 2 The angle between the loading direction and symmetry line passing through the midpoint of two longitudinal grooves, β

شکل 2 زاویه بین امتداد بارگذاری با خط تقارن گذرنده از وسط دو شیار طولی، β

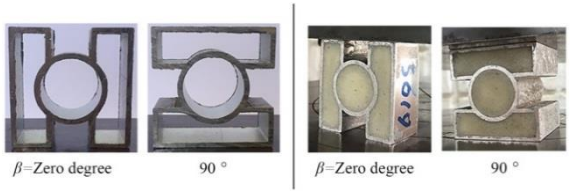

Fig. 3 A pair of empty and a pair of filled sample under different loading angles

شکل 3 یک جفت نمونه توخالی و یک جفت نمونه توپر تحت دو زاویه بارگذاری مختلف

جدول 2 مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

Table 2 Characteristics of the experimental specimens

کد نمونه	جرم (گرم)	طول نمونه (میلی متر)	زاویه بارگذاری (درجه)	نوع سطح مقطع
S01E	18.85	20	90	S
S02E	39.95	40	90	S
S03E	58.95	60	90	S
S04E	18.88	20	0	S
S05F2	43.14	40	90	S
S06F2	63.24	60	90	S
S07F1	19.12	20	90	S
S08F2	19.93	20	90	S
S09F1	19.19	20	0	S
S10F2	19.90	20	0	S

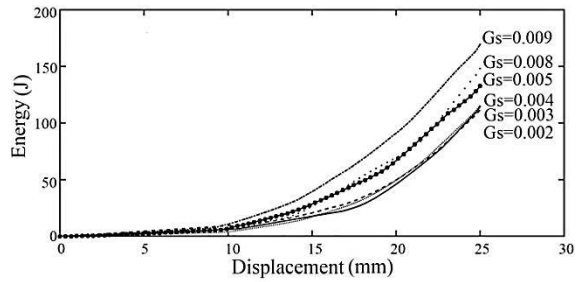

Fig. 4 Energy-displacement diagram in lieu of different seed densities

شکل 4 نمودار انرژی-جابجایی به ازای چگالی‌های دانه‌بندی مختلف

در محدوده پلاستیک، تنش جریان مادی از رابطه زیر تخمین زده می‌شود [30]:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sigma_y \sigma_u}{1+n}} \quad (1)$$

که در این رابطه، σ_y، σ_u و n به ترتیب تنش تسلیم، تنش نهایی و توان کرنش سختی ماده را نشان می‌دهند.

مکانیزم‌های اصلی جذب انرژی در حین فرآیند پهن‌شدگی جانبی مقطع جدارنازک مورد بررسی، تشکیل لولاهای پلاستیک و فرآیند صاف‌شدگی (برگشت خمشی) جداره است. "شکل 5"، یک نمونه جدارنازک دارای دو شیار طولی را قبل و در حین انجام آزمایش نشان می‌دهد. براساس این شکل و مشاهدات تجربی، در این مقاله، مدل تغییرشکل پلاستیک تئوری مقطع جدارنازک دارای دو شیار طولی، مطابق "شکل 6" ارائه می‌شود. در حالت کلی، انرژی مستهلک شده طی تشکیل یک لولای پلاستیک از رابطه (2) محاسبه می‌شود [30]:

$$E_{\mathrm{PHL}} = M_0 l \Delta\theta \quad (2)$$

که در این رابطه، l طول لولای پلاستیک، θ میزان دوران حول لولای پلاستیک برحسب رادیان و M_0 گشتاور خمشی پلاستیک کامل بر واحد طول است و از رابطه (3) تعیین می‌شود:

$$M_0 = \frac{1}{4}\sigma_0 t^2 \quad (3)$$

در رابطه فوق، t ضخامت جداره جسم در محل تشکیل لولای پلاستیک است.

جدول 3 مشخصات نمونه‌های عددی

Table 3 Characteristics of the numerical samples

کد نمونه	طول نمونه (میلی متر)	زاویه بارگذاری (درجه)	ضخامت	نوع سطح مقطع
S01EN	20	90	1.6	S
S04EN	20	0	1.6	S
S05EN	20	0	1	S
S06EN	20	0	2.1	S
S07EN	20	0	2.6	S

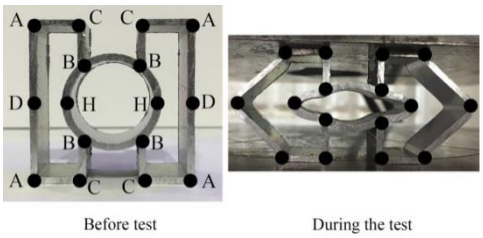

Fig. 5 Forming position of plastic hinges during the lateral flattening process

شکل 5 محل تشکیل لولاهای پلاستیک طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی

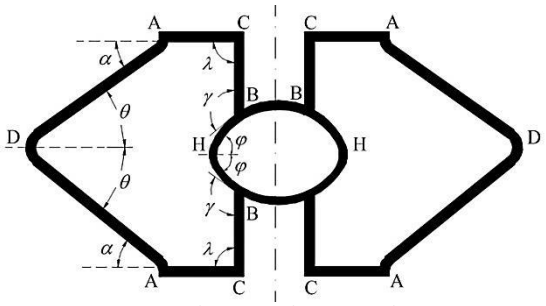

Fig. 6 Theoretical model of plastic deformation of thin-walled section with two longitudinal grooves

شکل 6 مدل تغییرشکل تئوری مقطع جدارنازک دارای دو شیار طولی

انرژی مستهلک شده طی فرآیند صاف شدگی، از رابطه زیر بدست می‌آید [30]:

$$E_{\mathrm{Unbend}} = \iint \sigma d\varepsilon dv \quad (4)$$

براساس مدل تئوری تغییرشکل پلاستیک (شکل 6) مشاهده می‌شود که کلیه مکانیزم‌های مستهلک کننده انرژی طی فرآیند لهیدگی جانبی در دو دسته زیر قرار می‌گیرند:

- فرآیند صاف‌شدگی (برگشت خمشی)
- تشکیل لولای پلاستیک.

بنابراین، انرژی مستهلک شده کل، طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{\mathrm{total}} = E_{\mathrm{Unbend}} + E_{\mathrm{PHL}} \quad (5)$$

که در این رابطه، E_{Unbend} و E_{PHL} به ترتیب، انرژی مستهلک شده توسط مکانیزم صاف شدگی و مکانیزم تشکیل لولاهای پلاستیک را نشان می‌دهد. برای محاسبه انرژی مستهلک شده طی صاف‌شدگی جداره استوانه داخلی مقطع جدارنازک، کافی است، مقدار مؤلفه کرنش $\varepsilon = y/R$ و المان حجم $dv = \pi R l dy$ در رابطه (4) قرار داده شود. در این صورت، با توجه به مدل مادی «صلب- پلاستیک کامل»، میزان جذب انرژی ناشی از پدیده صاف شدگی برای یک نیم استوانه که در "شکل 7" نشان داده شده، براساس روند زیر استخراج می‌شود:

$$E_{\mathrm{Unbend}} = \iint \sigma d\varepsilon dv = \sigma_0 \int \varepsilon dv = 2\sigma_0 \int_0^{\frac{t}{2}} \pi l y dy \quad (6)$$

با حل انتگرال رابطه (6)، میزان جذب انرژی ناشی از مکانیزم صاف شدگی یک نیم استوانه، بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$E_{\mathrm{Unbend}} = \frac{\pi}{4}\sigma_0 l t^2 \quad (7)$$

با دو برابر کردن رابطه (7)، جذب انرژی کل توسط فرآیند صاف‌شدگی جداره کل استوانه داخلی، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{\mathrm{Unbend}} = \frac{\pi}{2}\sigma_0 l t^2 \quad (8)$$

مدل تئوری تغییرشکل پلاستیک معرفی شده در "شکل 6" نشان می‌دهد که در حین فرآیند پهن شدگی جانبی، 4 لولای پلاستیک A، 4 لولای پلاستیک B، 4 لولای پلاستیک C، 2 لولای پلاستیک D و 2 لولای پلاستیک H و در مجموع، 16 لولای پلاستیک در دیواره مقطع جدارنازک تشکیل می‌شود. بنابراین، مجموع انرژی‌های جذب شده توسط این 16 لولای پلاستیک از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$E_{\mathrm{PHL}} = 4E_{\mathrm{A}} + 4E_{\mathrm{B}} + 4E_{\mathrm{C}} + 2E_{\mathrm{D}} + 2E_{\mathrm{H}} \quad (9)$$

در این رابطه، E_A، E_B، E_C، E_D و E_H به ترتیب، بیانگر انرژی مستهلک شده توسط هر لولای A، B، C، D و H است. "شکل‌های 5 و 6" نشان می‌دهند که چهار لولای پلاستیک یکسان در چهار گوشه مقطع جدارنازک (لولاهای پلاستیک A) تشکیل می‌شود. مدل تئوری تغییرشکل در نظر گرفته

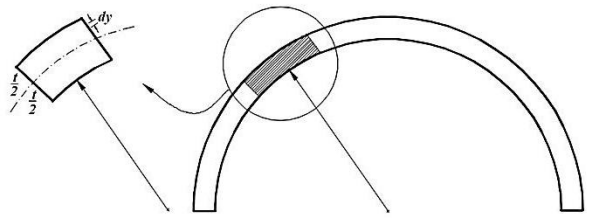

Fig. 7 An element of a semi-cylinder

شکل 7 المانی از یک نیم استوانه

شده در شکل 6 نشان می‌دهد، زاویه بین دو بال هر یک از چهار لولای پلاستیک A، در ابتدا برابر با $\pi/2$ رادیان و در انتهای فرآیند پهن‌شدگی جانبی برابر با π رادیان است. لذا، میزان تغییر زاویه (یا میزان دوران حول) هر یک از چهار لولای پلاستیک A برابر با $\pi/2$ است. بررسی الگوهای تغییرشکل پلاستیک نمونه‌های آزمایش شده نشان می‌دهد، محل تشکیل هر یک از چهار لولای پلاستیک A، فاصله اندکی با چهار گوشه مقطع جدارنازک دارد. به عبارت دیگر، ضخامت جداره در محل تشکیل چهار لولای پلاستیک A برابر با t است. لذا، انرژی جذب شده توسط هریک از چهار لولای پلاستیک A برابر است:

$$E_{\mathrm{A}} = \frac{\pi}{8}\sigma_0 l t_{\mathrm{A}}^2 \quad (10)$$

در جدول 4، تعداد، میزان تغییر زاویه و ضخامت جداره مقطع جدارنازک در محل تشکیل هر لولای پلاستیک براساس مدل تئوری تغییرشکل پلاستیک، گزارش شده است. بنابراین، مشابه با رابطه (6)، انرژی مستهلک شده توسط هر لولای پلاستیک B، C، D و H به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} E_{\mathrm{B}} &= \frac{1}{4}\sigma_0 t_{\mathrm{B}}^2 \cdot l \cdot \frac{3\pi}{4} = \frac{3\pi}{16}\sigma_0 l t_{\mathrm{B}}^2 \\ E_{\mathrm{C}} &= \frac{1}{4}\sigma_0 t_{\mathrm{C}}^2 \cdot l \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{8}\sigma_0 l t_{\mathrm{C}}^2 \\ E_{\mathrm{D}} &= \frac{1}{4}\sigma_0 t_{\mathrm{D}}^2 \cdot l \cdot \pi = \frac{\pi}{4}\sigma_0 l t_{\mathrm{D}}^2 \\ E_{\mathrm{H}} &= \frac{1}{4}\sigma_0 t_{\mathrm{H}}^2 \cdot l \cdot \pi = \frac{\pi}{4}\sigma_0 l t_{\mathrm{H}}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

با قرار دادن روابط (10) و (11) در رابطه (9)، میزان انرژی جذب شده توسط مکانیزم تشکیل لولاهای پلاستیک 16 گانه، به‌صورت زیر استخراج می‌گردد:

$$E_{\mathrm{PHL}} = 4\pi\sigma_0 l t^2 \quad (12)$$

در نهایت، با قرار دادن روابط (8) و (12) در رابطه (5)، رابطه نهایی زیر استخراج می‌شود:

$$E_{\mathrm{total}} = 4.5\pi\sigma_0 l t^2 \quad (13)$$

رابطه فوق، میزان انرژی مستهلک شده توسط مقطع جدارنازک دارای دو شیار طولی را طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی با زاویه بارگذاری صفر درجه را پیش بینی می‌کند.

6- نتایج و بحث

نتایج بررسی‌های تجربی با هدف به‌دست آوردن جذب انرژی کل و جذب انرژی مخصوص و هم‌چنین بررسی اثر پارامترهای مختلف از جمله اثر طول، زاویه بارگذاری و پرکننده فوم پلی‌یورتان بحث و بررسی می‌شود و از این نتایج برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل عددی و تحلیلی استفاده می‌گردد.

جدول 4 تعداد، میزان تغییر زاویه و ضخامت جداره در محل تشکیل لولاهای پلاستیک

Table 4 Number, angle variation and wall thickness in the plastic hinges position

محل تشکیل لولای پلاستیک	تعداد لولا	تغییر زاویه (رادیان)	ضخامت (میلی متر)
A	4	$\pi/2$	t
B	4	$3\pi/4$	$\sqrt{2}\,t$
C	4	$\pi/2$	$\sqrt{2}\,t$
D	2	π	t
H	2	π	t

6-1- اثر طول نمونه

"شکل 8"، نمودار نیرو بر واحد طول نمونه (F/L) را بر حسب نسبت جابجایی جانبی به ارتفاع اولیه نمونه (Δ/h) برای سه نمونه توخالی مختلف با طول اولیه متفاوت 20، 40 و 60 میلی‌متر و دارای دیگر خصوصیات هندسی و مادی یکسان نشان می‌دهد. هر سه نمونه تحت زاویه 90 درجه بارگذاری شده‌اند. مقایسه سه منحنی نمایش داده شده روی شکل، مطابقت بسیار خوبی را در اغلب نواحی نشان می‌دهد. این همخوانی نتایج آزمایشگاهی اثبات می‌کند که مقدار نیروی جانبی طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی با طول اولیه نمونه مورد بررسی، رابطه خطی دارد. به عبارت دیگر، هرچه طول اولیه نمونه افزایش یابد، مقدار نیروی جانبی لازم برای له کردن جانبی آن به همان نسبت بیشتر می‌شود. از نگاه دیگر این مقایسه نشان می‌دهد، جذب انرژی مخصوص مقاطع جدارنازک دارای دو شیار موازی طولی طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی، مستقل از طول نمونه‌هاست.

در حالت کلی، سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان جانبی، انرژی جذب شده توسط نمونه طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی را نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر "شکل 9"، نمودارهای میزان جذب انرژی برحسب جابجایی جانبی را برای سه نمونه قبلی با یکدیگر مقایسه می‌کند. "شکل 9" نشان می‌دهد مقادیر انرژی جذب شده برای سه نمونه توخالی S01E، S02E و S03E با طول اولیه 20، 40 و 60 میلی‌متر تا جابجایی یکسان 20 میلی‌متر با زاویه بارگذاری 90 درجه به ترتیب برابر با 55.19، 116.49 و 178.22 ژول است. به عبارت دیگر، نسبت طول نمونه‌های S02E/S01E و S03E/S01E به ترتیب برابر با 2 و 3 و نسبت انرژی جذب شده آن‌ها تا جابجایی یکسان 20 میلی‌متر به ترتیب برابر با 2.11 و 3.22 است. مقایسه‌های انجام شده براساس "شکل‌های 8 و 9"، وجود رابطه خطی بین میزان جذب انرژی و طول اولیه نمونه را اثبات می‌کند. برای تعیین رابطه بین میزان جذب انرژی و طول اولیه نمونه‌های پرشده از فوم پلی‌یورتان، نمودارهای جذب انرژی بر واحد طول بر حسب تغییرمکان جانبی برای سه نمونه S08F2، S05F2 و S06F2 به ترتیب با طول اولیه متفاوت 20، 40 و 60 میلی‌متر و با دیگر خصوصیات یکسان که از فوم پلی‌یورتان به‌صورت مدل 2 پر شده‌اند و تحت بارگذاری با زاویه 90 درجه قرار گرفته‌اند، در "شکل 10" رسم شده است. میزان جذب انرژی این سه نمونه، تا جابجایی یکسان 25 میلی‌متر به ترتیب برابر با 118.88، 251.65 و 355.33 ژول است. از نتایج مشخص است که مشابه نمونه‌های توخالی، در نمونه‌های پرشده از فوم پلی‌یورتان نیز رابطه خطی بین میزان جذب انرژی و طول اولیه برقرار است. ارتباط خطی بین نیروی فشار جانبی و طول اولیه نمونه و انطباق خوب نتایج در سه "شکل 8، 9 و 10"، گواهی بر دقت و صحت آزمایشات انجام شده است.

6-2- اثر پرکننده فوم پلی‌یورتان

برای بررسی اثر فوم پلی‌یورتان به عنوان پرکننده، سه نمونه با مشخصات هندسی و مادی یکسان در سه حالت توخالی، پرشده با فوم از مدل1 و نمونه پرشده با فوم از مدل2 مطابق "شکل 1"، تحت بارگذاری فشارجانبی در شرایط شبه‌استاتیکی قرار گرفته‌اند. نمودارهای جذب انرژی برحسب تغییرمکان جانبی برای هر گروه از نمونه‌های سه گانه (از لحاظ شرایط پرشدگی)، تحت دو زاویه بارگذاری مختلف صفر و 90 درجه در "شکل های 11 و 12" رسم و با یکدیگر مقایسه شده است. مطابق انتظار، مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه کاملاً پر شده با فوم طی فرآیند لهیدگی جانبی بیشتر از نمونه با هسته پرشده و مقدار جذب انرژی نمونه اخیر بیشتر از

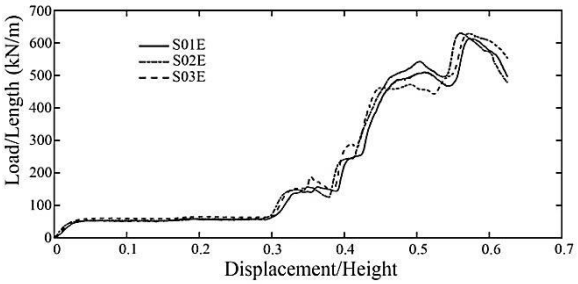

Fig. 8 Diagram of load/length-displacement/height for three empty samples with different lengths and with the same other properties under loading angle of 90 °

شکل 8 نمودار نیروی جانبی بر واحد طول برحسب نسبت جابجایی جانبی به ارتفاع اولیه نمونه، برای سه نمونه توخالی با طول‌های مختلف و با دیگر خصوصیات یکسان و زاویه بارگذاری 90 درجه

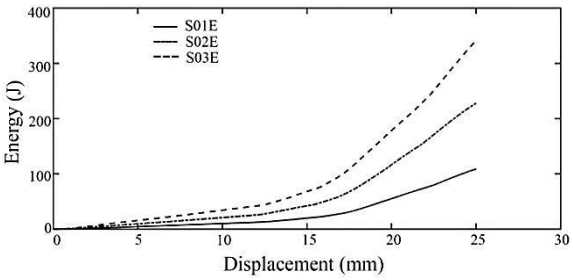

Fig. 9 Diagram of absorbed energy-lateral displacement of three empty samples with different initial lengths and with the same properties under loading angle of 90 °

شکل 9 نمودارانرژی جذب شده-تغییرمکان جانبی برای سه نمونه توخالی با طول اولیه متفاوت و دیگر خصوصیات مادی و هندسی یکسان وزاویه بارگذاری 90 درجه

نمونه توخالی متناظر است. بنابراین، تحت هر دو زاویه بارگذاری صفر و 90 درجه، وجود فوم پرکننده باعث افزایش جذب انرژی کل توسط ساختار می‌شود.

"شکل 13"، نمودار جذب انرژی مخصوص را برای نمونه‌های مختلف با دو زاویه بارگذاری صفر و 90 درجه در سه حالت توخالی، پرشده با فوم پلی-یورتان مدل1 و پرشده با فوم پلی‌یورتان مدل 2، تا جابجایی یکسان 25 میلی‌متر مقایسه می‌کند. نتایج روی شکل نشان می‌دهد، در مقطع جدارنازک بررسی شده در شرایطی که زاویه بارگذاری صفر درجه است، مقدار جذب انرژی مخصوص نمونه‌های توخالی، پرشده مدل1 و نمونه پرشده مدل2، به ترتیب برابر با 5.25، 5.35 و 5.62 کیلوژول بر کیلوگرم

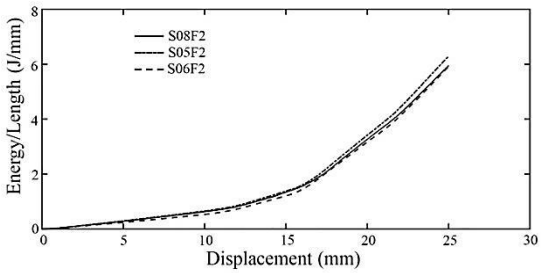

Fig. 10 Diagram of energy/length-lateral displacement of three filled samples of model 2 with different initial lengths and with the same material and geometrical properties under loading angle of 90 °

شکل 10 نمودار انرژی جذب شده بر واحد طول- تغییرمکان جانبی برای سه نمونه پرشده مدل 2 با طول اولیه متفاوت و دیگر خصوصیات مادی و هندسی یکسان، تحت زاویه بارگذاری90 درجه

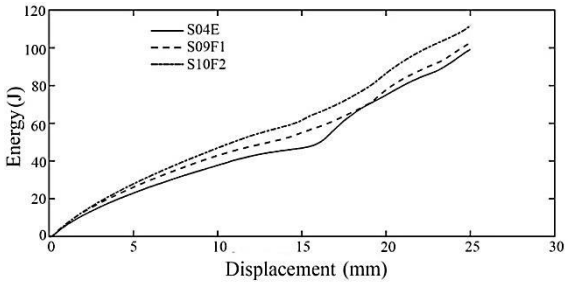

Fig. 11 Diagram of energy-lateral displacement of three thin-walled samples with different filling conditions and with the same material and geometrical properties under loading angle of zero

شکل 11 نمودار انرژی- تغییرمکان برای سه نمونه از مقاطع جدارنازک با مشخصات هندسی و مادی یکسان و با شرایط پرشدگی متفاوت، تحت زاویه بارگذاری صفر درجه

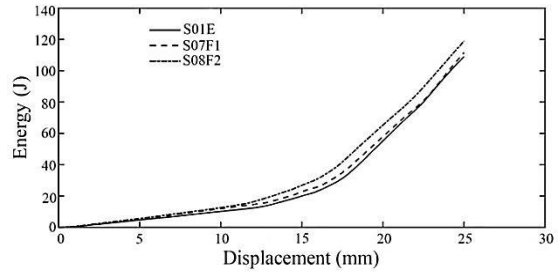

Fig. 12 Diagram of energy-displacement of three thin-walled samples with different filling conditions and with the same material and geometrical properties under loading angle of 90 °

شکل 12 نمودار انرژی- تغییرمکان برای سه نمونه از مقاطع جدارنازک با مشخصات هندسی و مادی یکسان و با شرایط پرشدگی متفاوت، تحت زاویه بارگذاری 90 درجه

است.

همچنین، مقدار جذب انرژی مخصوص نمونه‌های توخالی، پرشده مدل1 و نمونه پرشده مدل2، تحت زاویه بارگذاری 90 درجه به ترتیب برابر با 5.78، 5.83 و 5.96 کیلوژول بر کیلوگرم است. به عبارت دیگر، استفاده از فوم پلی‌یورتان باعث افزایش جذب انرژی مخصوص در نمونه‌های پرشده با فوم مدل 1 و 2 در مقایسه با نمونه توخالی متناظر، تحت هر دو زاویه بارگذاری صفر و 90 درجه شده است. بنابراین اگر مقطع جدارنازک مورد نظر به عنوان جاذب انرژی تحت زاویه بارگذاری جانبی صفر و 90 درجه مورد استفاده قرار گیرد، پرکردن نمونه از فوم‌پلی‌یورتان می‌تواند قابلیت جذب انرژی کل توسط ساختار را به ترتیب 11.33% و 8.4% افزایش دهد. بررسی نمونه‌های جدارنازک با سطح مقطع H شکل، در حالت توخالی و پرشده با فوم پلی‌یورتان تحت زوایای بارگذاری صفر و 90 درجه نشان می‌دهد، استفاده از فوم پلی‌یورتان باعث افزایش جذب انرژی مخصوص ساختار H شکل می‌شود. به عبارت دیگر، اگر چه تزریق فوم درون نمونه‌ها باعث افزایش درصدی در جرم ساختار می‌شود، ولی وجود این فوم، جذب انرژی کل ساختار را درصد بیشتری افزایش می‌دهد، لذا، در نهایت، جذب انرژی مخصوص در اثر تزریق فوم، افزایش می‌یابد.

اخیرا، ظهرابی و همکاران [16]، روش جدیدی جهت افزایش میزان جذب انرژی مقاطع جدارنازک آلومینیومی با مقطع مربعی و مستطیلی تحت بارگذاری جانبی شبه‌استاتیکی معرفی نمودند. همچنین، نیک‌نژاد و همکاران [13]، بررسی تجربی رفتار جذب انرژی نمونه‌های جدارنازک با سطح مقطع دایره‌ای را تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی انجام دادند. آن‌ها اثر طول، قطر، ضخامت و پرکننده را بر میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی بررسی کردند. نتایج تجربی آن‌ها نشان

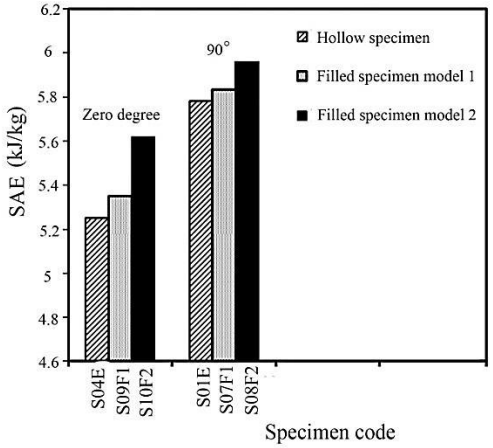

Fig. 13 Comparison of specific absorbed energy of different samples with the same material and geometrical characteristics and with different filling conditions and loading angles, until the same displacement of 25 mm

شکل 13 مقایسه جذب انرژی مخصوص نمونه‌های مختلف با مشخصات مادی و هندسی یکسان و با زوایای بارگذاری و شرایط پرشدگی متفاوت، تا جابجایی یکسان 25 میلی‌متر

داد، استفاده از فوم پلی‌یورتان، میزان جذب انرژی مخصوص نمونه‌های جدارنازک دایره‌ای را طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی افزایش می‌دهد. آن‌ها با استفاده از تحلیل آزمایشگاهی نشان دادند، طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی نمونه‌های جدارنازک با سطح مقطع چهارگوش و لوله‌های دایره‌ای ساده، ابتدا نیرو از مقدار صفر با نرخ بالایی، افزایش می‌یابد و سپس، طی یک تغییرمکان جانبی بزرگ، مقدار آن تقریبا ثابت باقی می‌ماند که این امر از دیدگاه جذب انرژی، نکته ارزشمندی است. بررسی نمودارهای نیرو- تغییرمکان حاصل از آزمایش‌های انجام شده در مقاله حاضر بر روی نمونه‌های جدارنازک با سطح مقطع H شکل تحت زوایای بارگذاری صفر و 90 درجه نشان می‌دهد، نیروی جانبی اعمال شده بر ساختار تحت بررسی در این مقاله نیز، طی یک تغییرمکان بزرگ، تغییرات اندکی دارد که این امر از دیدگاه جذب انرژی یک مزیت بزرگ محسوب می‌شود. از طرفی، نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در دو مرجع [13 و 16] نشان می‌دهد، جذب انرژی مخصوص نمونه توخالی با سطح مقطع چهارگوش 4.47 کیلوژول بر کیلوگرم است که در مقایسه با جذب انرژی مخصوص نمونه جدارنازک با سطح مقطع H شکل در حالت توخالی تحت زاویه بارگذاری صفر درجه (مقاله حاضر)، 14.85% کمتر است. این مقایسه، ارزش تحلیل آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

6-3- اثر زاویه بارگذاری

"شکل 13"، نمودار جذب انرژی مخصوص را برای نمونه‌های مختلف با دو زاویه بارگذاری صفر و 90 درجه در سه حالت توخالی، پرشده با فوم پلی-یورتان مدل1 و پرشده با فوم پلی‌یورتان مدل2، نشان می‌دهد. در این نمودار، نتایج به بصورت نمودار میله‌ای در دسته‌های سه‌تایی رسم شده است که هر دسته سه تایی، مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی است که دارای طول، ضخامت و دیگر مشخصات مادی و هندسی یکسان هستند و تنها تفاوت آن‌ها در شرایط پرشدگی است. در هر دسته سه تایی، به ترتیب از چپ به راست، جذب انرژی مخصوص نمونه توخالی، توپر مدل 1 و توپر مدل 2 نشان داده شده است. هر دسته سه تایی، مربوط به یکی از دو زاویه بارگذاری صفر و 90 درجه است. نتایج ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد، وقتی زاویه بارگذاری از صفر به 90 درجه تغییر می‌یابد جذب انرژی مخصوص سیر صعودی دارد؛ بطوری‌که، در زاویه بارگذاری 90 درجه، جذب انرژی مخصوص نمونه‌های توخالی، پرشده با فوم مدل 1 و پرشده با فوم مدل 2، نسبت به نمونه‌های متناظر تحت زاویه بارگذاری صفر درجه، بیشتر است. در مجموع، بیشترین جذب انرژی مخصوص متعلق به نمونه کاملاً پرشده با فوم S08F2 به میزان 5.96 کیلوژول بر کیلوگرم تحت زاویه بارگذاری 90 درجه است. بنابراین برای استفاده از این مقطع جدارنازک به عنوان جاذب انرژی، بهینه ترین حالت نصب سازه، تحت زاویه بارگذاری فشار جانبی 90 درجه و پرشده با فوم پلی‌یورتان مدل2 است.

6-4- صحت‌سنجی تحلیل عددی در مقایسه با تحلیل تجربی

در "شکل 14"، فروریزش نمونه توخالی S01EN از نمای روبرو، طی دو تحلیل تجربی و عددی تحت زاویه بارگذاری 90 درجه نشان داده شده است. همان‌طور که از "شکل14" استنباط می‌گردد، مطابقت خوبی بین الگوی تغییرشکل پلاستیک نمونه آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی وجود دارد. این امر صحت شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده را نشان می‌دهد. برای صحت سنجی بهتر تحلیل عددی، "شکل 15" نمودار نیرو برحسب تغییرمکان جانبی را برای یک نمونه آزمایشگاهی و نمونه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس، تحت زاویه بارگذاری صفر درجه در حالت توخالی، با یکدیگر مقایسه می‌کند.

هم‌خوانی خوب دو نمودار در اکثر نواحی و با یکسان بودن تقریبی سطح زیر نمودار نیرو برحسب تغییرمکان که انرژی جذب شده توسط نمونه طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی را نشان می‌دهد، صحت و دقت تحلیل عددی انجام شده را اثبات می‌کند. در دو نمودار رسم شده در "شکل 15"، پیک اولیه‌ای در مقدار نیرو مشاهده می‌شود که به دلیل بروز کمانش در ابتدای فرآیند بارگذاری، در دو ضلع موازی عمودی پروفیل، است. زیرا، در ابتدای فرآیند، این دو ضلع همانند دو ستون تحت کمانش اویلری عمل می کنند که با ایجاد انحنا در این دو ضلع و افزایش بازوی گشتاور خمشی حول نقطه وسط هر ضلع، در ادامه نیرو کاهش می یابد.

همچنین برای صحت سنجی بهتر، نمودارهای آزمایشگاهی و عددی جذب انرژی برحسب تغییرمکان برای نمونه بارگذاری شده تحت زاویه صفر درجه، در "شکل 16" نشان داده شده است. "شکل‌های 15 و "16 نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی نمونه‌های H شکل تحت زاویه بارگذاری

Fig. 14 Comparison of the collapse of an empty specimen under loading angle of 90 ° by the experimental and numerical methods

شکل 14 مقایسه فروریزش یک نمونه توخالی، به دو روش تجربی و عددی تحت زاویه بارگذاری 90 درجه

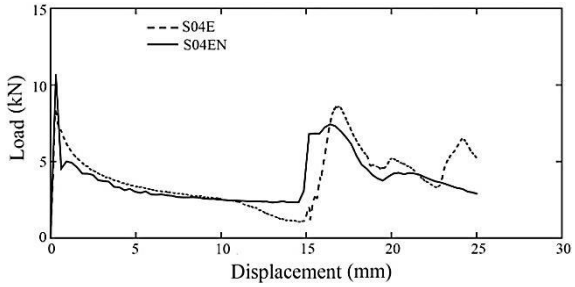

Fig. 15 Comparison of experimental and numerical diagrams of lateral force- displacement of an empty H-shaped thin-walled specimen under loading angle of zero

شکل 15 مقایسه نمودارهای تجربی و عددی نیروی جانبی- تغییرمکان برای نمونه جدارنازک H شکل توخالی تحت زاویه بارگذاری صفر درجه

صفر درجه را با یکدیگر مقایسه می‌کند که هر دو شکل، صحت و دقت تحلیل‌های المان محدود انجام شده در نرم‌افزار آباکوس را گواهی می‌دهد. در ادامه مقایسه‌های مشابهی برای زاویه بارگذاری 90 درجه ارائه می‌شود. نمودارهای نیرو- تغییرمکان و انرژی- تغییرمکان جانبی حاصل از دو تحلیل آزمایشگاهی و عددی انجام شده بر روی یک نمونه توخالی تحت زاویه بارگذاری 90 درجه، به ترتیب در "شکل‌های 17 و 18" نشان داده شده است. مطابقت قابل قبول نتایج شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، در نمودار نیروی جانبی برحسب تغییرمکان جانبی و نمودار انرژی برحسب تغییرمکان جانبی برای نمونه‌های تحت زاویه بارگذاری 90 درجه در دو "شکل 17 و 18" مشاهده می‌شود. به عنوان یک مقایسه کمّی، ظرفیت جذب انرژی نمونه شبیه سازی شده S01EN از تحلیل عددی برابر با 156.27 ژول و از تحلیل آزمایشگاهی برابر با 163.05 ژول بدست آمده است که خطایی کمتر از 5 درصد را نشان می‌دهد. در ضمن، مشاهده "شکل‌های 15 و 17" نشان می‌دهد، دو نمودار تجربی و عددی متناظر نشان داده شده روی هر یک از دو "شکل 15 و 17"، در اکثر نواحی مطابقت بسیار خوبی دارند، به گونه‌ایی که درصد اختلاف دو جواب تجربی و عددی در اکثر نواحی نزدیک به صفر است و فقط در چند ناحیه محدود از نمودار، درصد خطا به‌صورت موضعی افزایش یافته است. به عنوان مثال در "شکل 15"، در دو جابجایی 16 و 25 میلی‌متر، اختلاف دو نمودار تجربی و عددی 32.96% و 36.25% و در "شکل 17"، در دو جابجایی 18 و 25 میلی‌متر، اختلاف دو نمودار 20.47% و 29.50% است. در این پژوهش، براساس تحلیل آزمایشگاهی، اثر طول نمونه‌ها، زاویه بارگذاری و اثر پرکننده فوم پلی‌یورتان بررسی گردید. براساس تطابق خوب بین نتایج دو تحلیل تجربی و عددی و با

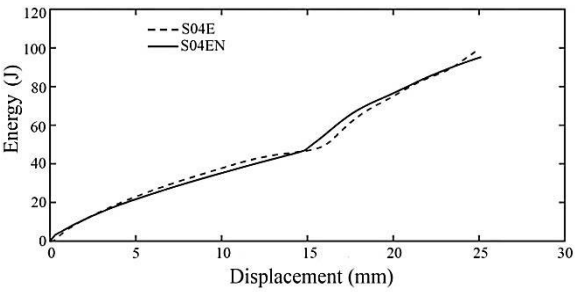

Fig. 16 Comparison of experimental and numerical diagrams of energy-displacement of empty H-shaped thin-walled under loading angle of zero

شکل 16 مقایسه نمودارهای تجربی و عددی انرژی- تغییرمکان برای نمونه جدارنازک H شکل توخالی تحت زاویه بارگذاری صفر درجه

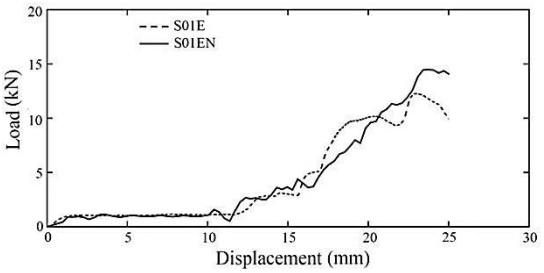

Fig. 17 Comparison of experimental and numerical diagrams of lateral force- displacement of empty H-shaped thin-walled under loading angle of 90 °

شکل 17 مقایسه نمودارهای تجربی و عددی نیروی جانبی- تغییرمکان برای نمونه جدارنازک H شکل توخالی تحت زاویه بارگذاری 90 درجه

توجه به محدودیت‌های موجود در تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی با ابعاد هندسی مختلف، برای بررسی اثر دیگر پارامتر هندسی (ضخامت جداره مقطع جدارنازک H شکل)، از تحلیل عددی استفاده می‌شود.

6-5- اثر ضخامت جداره

در این قسمت، اثر ضخامت جداره مقطع جدارنازک H شکل توخالی بر فرآیند جذب انرژی بررسی می‌شود. بدین منظور، چهار مقطع جدارنازک H شکل با ضخامت‌های مختلف 1، 1.6، 2.1 و 2.6 میلی‌متر در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و تحلیل شد. دیگر خصوصیات مادی و هندسی این چهار نمونه، یکسان مدل‌سازی گردید. "شکل 19"، میزان جذب انرژی توسط این چهار نمونه را برحسب ضخامت جداره آن‌ها نشان می‌دهد. "شکل 19" نشان می‌دهد با افزایش ضخامت جداره مقطع H شکل، ظرفیت جذب انرژی ساختار افزایش می‌یابد. بنابراین، تحلیل عددی انجام شده، استفاده از مقاطع

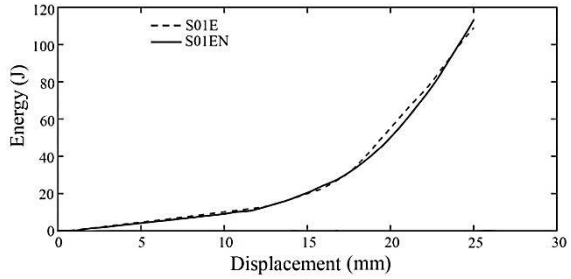

Fig. 18 Comparison of experimental and numerical diagrams of energy-displacement of an empty H-shaped thin-walled specimen under loading angle of 90 °

شکل 18 مقایسه نمودارهای تجربی و عددی انرژی- تغییرمکان برای نمونه جدارنازک H شکل توخالی تحت زاویه بارگذاری 90 درجه

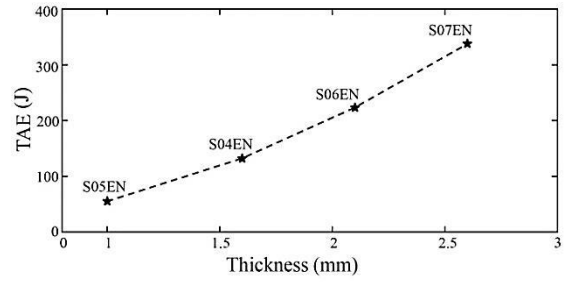

Fig. 19 Diagram of energy absorption of four H-shaped thin-walled section under loading angle of zero versus their wall thickness

شکل 19 نمودار جذب انرژی کل برای چهار مقطع جدارنازک H شکل تحت زاویه بارگذاری صفر درجه برحسب ضخامت جداره آن‌ها

جدارنازک H شکل با ضخامت جداره بیشتر را در مقایسه با مقاطع مشابه با ضخامت جداره کوچکتر، پیشنهاد می‌دهد. بدیهی است، افزایش دادن ضخامت جداره مقطع H شکل تا زمانی که الگوی تغییرشکل پلاستیک آن به طور کلی عوض نشود، مناسب است.

6-6- صحت سنجی تحلیل تئوری در مقایسه با دو تحلیل عددی و تجربی

از مقایسه انجام شده روی "شکل 19" مشاهده گردید که افزایش ضخامت جداره مقطع جدارنازک H شکل، باعث یک روند افزایشی در میزان ظرفیت جذب انرژی ساختار می‌شود. بررسی مقادیر عددی نشان می‌دهد که این روند افزایشی، بطور تقریبی از یک چند جمله‌ای درجه دوم تبعیت می‌کند. به عبارت دیگر، ظرفیت جذب انرژی مقطع جدارنازک H شکل با توان دوم ضخامت جداره آن، ارتباط مستقیم دارد. نکته جالب و قابل اهمیت در این قسمت، مقایسه این نتیجه با تحلیل تئوری ارائه شده در این مقاله است. رابطه (13) استخراج شده در بخش تئوری، ظرفیت جذب انرژی مقاطع جدارنازک H شکل را طی فرآیند لهیدگی (پهن‌شدگی) جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی تخمین می‌زند. مطابق این رابطه تئوری، ظرفیت جذب انرژی ساختار به توان دوم ضخامت جداره و توان اول طول نمونه جدارنازک وابسته است. از طرفی، "شکل 19" که ماحصل شبیه‌سازی‌های عددی است، وابستگی ظرفیت جذب انرژی ساختار به توان دوم ضخامت جداره آن و "شکل 8" که ماحصل تست‌های تجربی است، وابستگی ظرفیت جذب انرژی ساختار به توان اول طول آن را نشان می‌دهد. این تطابق چشمگیر بین نتایج تحلیل تئوری و نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی، صحت تحلیل تئوری انجام شده را اثبات می‌کند. برای بررسی بهتر صحت تحلیل تئوری ارائه شده، ظرفیت جذب انرژی پیش بینی شده توسط رابطه تئوری (13) با ظرفیت جذب انرژی بدست آمده از تحلیل عددی برای نمونه S04EN و ظرفیت جذب انرژی اندازه‌گیری شده برای یک نمونه یکسان طی تحلیل آزمایشگاهی، در جدول 5 با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج گزارش شده در این جدول نشان می‌دهد، ظرفیت جذب انرژی یک نمونه مقطع جدارنازک از انجام آزمایش و شبیه‌سازی عددی (نمونه S04EN) به ترتیب برابر با 128.93 و 132.3191 ژول تعیین شده است. ظرفیت جذب انرژی این نمونه از رابطه تئوری (13) برابر با 133.91 ژول پیش بینی می‌شود که تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد. این همخوانی، صحت و دقت تحلیل تئوری ارائه شده در این پژوهش را به اثبات می‌رساند. در ضمن، در جدول 5، مقادیر ظرفیت جذب انرژی سه نمونه دیگر که تحت زاویه صفر درجه بارگذاری شده‌اند و از دو روش تئوری و عددی تعیین شده‌اند را با یکدیگر مقایسه می‌کند. نتایج گزارش شده در این جدول نشان می‌دهد که خطای پیش‌بینی‌های تئوری برای تمام نمونه‌های بررسی شده کمتر از 6 درصد است که دقت بالای تحلیل تئوری استخراج شده در این مقاله و درستی آن را نشان می‌دهد.

7-6- مقایسه پروفیل H شکل و مقاطع جدارنازک ساده

برای ارزیابی کلی عملکرد پروفیل H شکل، فرآیند پهن‌شدگی جانبی این پروفیل با یک نمونه جداره نازک مربعی به ضلع 40 mm و ضخامت 1.6 mm و یک نمونه جدارنازک دایره‌ای به قطر 40 mm و ضخامت 1.6 mm بصورت عددی شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه شده است. این بررسی نشان می‌دهد، ظرفیت جذب انرژی مقطع جدارنازک H شکل، 132.3191 ژول

جدول 5 مقایسه نتایج تجربی، عددی و تئوری ظرفیت جذب انرژی چند نمونه جدارنازک H شکل

Table 5 Comparison of experimental, numerical and theoretical results of energy absorption capacity of several H-shaped thin-walled samples

کد نمونه	زاویه بارگذاری	عددی	تئوری	آزمایشگاهی	بیشترین درصد خطا
S04EN	0	132.3191	133.91	128.93	3.7%
S05EN	0	55.09	52.30	------	5.06%
S06EN	0	223.3196	230.67	------	3.18%
S07EN	0	337.6129	353.59	------	4.5%

است که در مقایسه با یک مقطع جدارنازک مربعی و دایره‌ای ساده، به ترتیب، با ظرفیت جذب انرژی 57.11 و 20.93 ژول، به میزان 56.83% و 84.18% بیشتر است، در حالی‌که ابعاد بیرونی (فضای اشغال شده توسط) هر سه نوع مقطع جدارنازک یکسان است. این امر، برتری ایده استفاده از پروفیل H شکل را به عنوان یک جاذب انرژی نشان می‌دهد.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر پارامترهای هندسی مختلف پروفیل نظیر طول و ضخامت جداره، سه حالت پرشدگی مختلف نمونه‌ها توسط پرکننده فوم پلی‌یورتان و نیز اثر زاویه بارگذاری جانبی بر روی مقدار نیروی جانبی، ظرفیت جذب انرژی، جذب انرژی مخصوص و نحوه فرآیند پهن‌شدگی جانبی یک نوع پروفیل جدارنازک با سطح مقطع H شکل، تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی به روش‌های آزمایشگاهی، تئوری و عددی بحث و بررسی و نتایج زیر حاصل شده است.

- نتایج تجربی انجام شده نشان می‌دهد، مقدار نیروی جانبی طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی، با طول اولیه نمونه مورد بررسی رابطه خطی دارد. به عبارت دیگر، هرچه طول اولیه نمونه افزایش یابد، مقدار نیروی جانبی لازم برای لهیدگی جانبی ساختار به همان نسبت، بیشتر می‌شود. لذا، مقدار انرژی جذب شده بر واحدجرم نمونه‌ها که جذب انرژی مخصوص نامیده می‌شود، مستقل از طول آن‌هاست.
- با مقایسه نتایج تجربی سه حالت پرشدگی مختلف بین نمونه‌های با سطح مقطع H شکل، پروفیل کاملا پرشده تحت زاویه بارگذاری جانبی 90 درجه، به عنوان بهترین جاذب انرژی توپر و نمونه توخالی تحت زاویه بارگذاری 90 درجه، به عنوان بهترین جاذب انرژی توخالی معرفی می‌شوند.
- روابط تئوری استخراج شده برای تخمین میزان ظرفیت جذب انرژی توسط نمونه‌های توخالی تحت زاویه بارگذاری صفر درجه، براساس دو مکانیزم مختلف جذب انرژی و تحلیل‌های عددی انجام شده نشان می‌دهند که ظرفیت جذب انرژی ساختار جدارنازک H شکل به توان دوم ضخامت جداره آن وابسته است و در نتیجه، ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های ضخیم‌تر بیشتر از ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های متناظر با جداره نازک‌تر است.

با مقایسه کلی بین نتایج تجربی، عددی و آزمایشگاهی، انطباق بسیار خوب نتایج مشاهده شد که حاکی از صحت و دقت پژوهش انجام شده است.

8- مراجع

[1] S. Azarakhsh, A. Rahi, A. Ghamarian, H. Motamedi, Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 95, No. 1, pp. 60-72, 2015.

[2] X. Yu, X. Qiu, T. X. Yu, Theoretical model of a metal tube under inversion over circular dies, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 108-109, No. 1, pp. 23-28, 2016.
[3] M. Nema-Alla, Reproducing hoop stress–strain behavior for tubular material using lateral compression test, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 45, No. 4, pp. 605-621, 2003.
[4] B. Rezaei, A. Niknejad, H. Assaee, G.H. Liaghat, G.H, Axial splitting of empty and foam-filled circular composite tubes - An experimental study, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 650-662, 2015.
[5] X. Pang, H. Du, Dynamic characteristics of aluminium foams under impact crushing, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 112, No. 1, pp. 265-277, 2017.
[6] L. D. Mutchler, Energy absorption of aluminium tubing, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 27, No. 4, pp. 740-743, 1960.
[7] J. A. DeRuntz, P. G. Hodge, Crushing of a tube between rigid plates, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 30, No. 3, pp. 391-395, 1963.
[8] R. H. Burton, J. M. Craig, An investigation into the energy absorbing properties of metal tubes loaded in the transverse direction, *BSc (Engineering) Report*, University of Bristol, Bristol, England, 1963.
[9] A. G. Hanssen, M. Langseth, O. S. Hopperstad, Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 347-383, 1998.
[10] N. K. Gupta, G. S. Sekhon, P. K. Gupta, Study of lateral compression of round metallic tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 43, No. 6, pp. 895-922, 2005.
[11] S. A. Karamanos, C. Eleftheriadis, Collapse of pressurized elastoplastic tubular members under lateral loads, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, No. 1, pp. 35-56, 2004.
[12] Z. Fan, Z. Shen, J. G. Lu, Investigation of lateral crushing of sandwich tubes, *Procedia Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 442-449, 2011.
[13] A. Niknejad, S. A. Elahi, G. H. Liaghat, Experimental investigation on the lateral compression in the foam-filled circular tubes, *Materials and Design*, Vol. 36, No. 1, pp. 24-34, 2012.
[14] A. Niknejad, S. M. Elahi, S. Ahmad Elahi, S. Ali Elahi, Theoretical and experimental study on the flattening deformation of the rectangular brazen and aluminum columns, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 449-464, 2013.
[15] A. Niknejad, D. M. Rahmani, Experimental and theoretical study of the lateral compression process on the empty and foam-filled hexagonal columns, *Materials and Design*, Vol. 53, No. 1, pp. 250-261, 2014.
[16] M. Zohrabi, A. Niknejad, S. Ziaee, A novel method for enhancing energy absorption capability by thin-walled sections during the flattening process, *Thin-Walled Structures*, Vol. 97, No. 1, pp. 140-153, 2015.
[17] Z. Xiao, J. Fang, G. Sun, Q. Li, Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam, *Advances in Engineering Software*, Vol. 85, No. 1, pp. 81-95, 2015.
[18] J. Shen, G. Lu, D. Ruan, C. C. Seah, Lateral plastic collapse of sandwich tubes with metal foam core, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 91, No. 1, pp. 99-109, 2015.
[19] A. Baroutaji, M. D. Gilchrist, A. G. Olabi, Quasi-static, impact and energy absorption of internally nested tubes subjected to lateral loading, *Thin-Walled Structures*, Vol. 98, No. 2, pp. 337-350, 2016.
[20] A. Niknejad, P. Heidari Orojloo, A novel nested system of tubes with special cross-section as the energy absorber, *Thin-Walled Structures*, Vol. 100, No. 1, pp. 113-123, 2016.
[21] A. Baroutaji, M. D. Gilchrist, D. Smyth, A. G. Olabi, Analysis and optimization of sandwich tubes energy absorbers under lateral loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 82, No. 1, pp. 74-88, 2015.
[22] S. A. Galehdari, M. Kadkhodayan, S. Hadidi-moud, Low velocity impact and quasi static in plane loading on a graded honeycomb structure, experimental, analytical and numerical study, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 47, No. 1, pp. 425-433, 2015.
[23] M. Choubini, G. H. Liaghat, M. Hossein Pol, Investigation of energy absorption and deformation of thin walled tubes with circle and square section geometries under transverse impact loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 75-83, 2015. (In Persian فارسی)
[24] R. Rajabiehfard, A. Darvizeh, M. Alitavoli, H. Sadeghi, M. Moghaddam, N. Noorzadeh, An investigation into the behavior of cylindrical shells with different thickness distributions under axial quasi-static and impact loadings, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 269-280, 2016. (in Persian فارسی)
[25] M. Damghani Nouri, H. Hatami, A. Ghodsbin Jahromi, Experimental investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 371-378, 2015. (In Persian فارسی)
[26] E. Mahdi, A. M . S. Hamouda, Energy absorption capability of composite hexagonal ring systems, *Materials and Design*, Vol. 34, No. 1, pp. 201-210, 2012.
[27] E. S. Mahdi, H. E. Kadi, Crushing behavior of laterally compressed composite elliptical tubes: Experiments and predictions using artificial neural networks, *Composite Structures*, Vol. 83, No. 4, pp. 399-412, 2008.
[28] R. Ghajar, A. Rassaf, Effect of impactor shape and temperature on the behavior of Eglass/epoxy composite laminates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 1-8, 2014. (In Persian فارسی)
[29] N. Tavassoli, A. Darvizeh, M. Darvizeh, S. A. Sabet, Analytical and experimental investigation into the crushing behavior of hat shaped composite energy absorber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 211-216, 2015. (In Persian فارسی)
[30] S. P. Santosa, T. Wierzbicki, A. G. Hanssen, M. Langseth, Experimental and numerical studies of foam filled sections, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 509-534, 2000.