



بررسی آزمایشگاهی رفتار جذب انرژی یک پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع خاص تحت بار جانبی شبه‌استاتیکی

عباس نیک نژاد^{1*}، مجتبی فیروزی²، حمیدرضا سعادتفرد²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج

* Aniknejad@mail.yu.ac.ir 75914-353 صندوق پستی

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 آبان 1393

پذیرش: 12 بهمن 1393

ارائه در سایت: 11 اسفند 1393

کلید واژگان:

بارگذاری جانبی

پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع خاص

پهن‌شدگی جانبی

فوم پلی‌یورتان

جذب انرژی مخصوص

این مقاله، ظرفیت جذب انرژی و نحوه تغییر شکل پلاستیک فرآیند پهن‌شدگی جانبی یک نوع پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع خاص، تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی را به روش آزمایشگاهی بررسی می‌کند. سطح مقطع پروفیل بررسی شده، دایره‌ای شکل با دو شیار طولی متقارن است. نمونه‌ها با قطر و طول متفاوت در سه حالت پرشدگی مختلف شامل، توخالی، هسته پرشده و بطور کامل پرشده توسط فوم پلی‌یورتان، آماده شده‌اند. همچنین، نمونه‌هایی با هندسه و شرایط پرشدگی یکسان با زوایای صفر، 30، 45، 60 و 90 درجه بین امتداد بار جانبی و خط تقارن دو شیار طولی، تحت فشار جانبی قرار گرفته‌اند. اثر پارامترهایی مانند طول و قطر خارجی پروفیل، سه حالت پرشدگی مختلف و زاویه بارگذاری بر روی نیروی جانبی و جذب انرژی مخصوص، بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند، جذب انرژی مخصوص، مستقل از طول نمونه‌هاست و در یک تغییر مکان جانبی یکسان، با افزایش قطر نمونه‌های توخالی، نیروی جانبی کاهش می‌یابد. همچنین، در زاویه بارگذاری صفر درجه، وجود پرکننده باعث افزایش جذب انرژی مخصوص سازه می‌شود. از دیدگاه طراحی جاذب انرژی، بهترین شرایط، استفاده از پروفیل کاملاً پرشده تحت زاویه بارگذاری صفر درجه است. چنانچه به دلیل محدودیت‌های طراحی، امکان نصب سازه به گونه‌ای که تحت بارگذاری با زاویه صفر درجه قرار بگیرد، وجود نداشته باشد، نصب این سازه در حالت توخالی به گونه‌ای که تحت بارگذاری با زاویه 90 قرار بگیرد، می‌تواند انتخاب مناسب بعدی باشد. نتایج نشان می‌دهند، بالاترین جذب انرژی مخصوص در نمونه‌هایی با قطرهای مختلف، مربوط به زاویه‌ای بارگذاری صفر و 90 درجه است.

Experimental investigation of energy absorption behavior by an aluminum profile with special cross-section subjected to the quasi-static lateral loading

Abbas Niknejad*, Mojtaba Firouzi, Hamidreza Saadatfard

Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

*P.O.B 75914-353 Yasouj, Iran, Aniknejad@mail.yu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 99 April 9999

Accepted 99 January 9999

Available Online 02 March 2015

Keywords:

Lateral loading

Aluminum profile with a special cross-section

lateral flattening

polyurethane foam

specific absorbed energy

ABSTRACT

This article investigates energy absorption capacity and plastic deformation of lateral flattening process on an aluminum profile with special cross-section under the lateral compressive loading in the quasi-static condition by experimental method. The profile section is a circular tube with two symmetric longitudinal grooves. Different samples with various lengths and outer diameters in three different filling conditions consisting of empty, core-filled and full-filled by polyurethane foam were prepared. Some specimens with the same geometry and filling condition but with different loading angles of 0, 30, 45, 60 and 90° with respect to symmetric line of two longitudinal grooves, were laterally compressed. Effects of various parameters such as profile length, outer diameter, three different filling conditions, and loading angle are investigated on lateral loading and specific absorbed energy. Experimental results show that specific absorbed energy is independent of specimen length. At the same displacement, when diameter of samples increases compressive loading decreases. Also, in zero loading angle, the presence of the filler enhances lateral load, and consequently increases specific absorbed energy by the structure. From the viewpoint of the design of an energy absorber design, optimum specimen is full-filled profile under a loading angle equal to zero. However, if due to some design limitations, assembling the special profile with loading angle of zero is impossible, assembling the structure in empty condition with loading angle of 90° can be the next suggestion. Experiments show that the highest specific absorbed energy occurs in the profile with different diameters under loading angles of zero and 90°.

1- مقدمه

سازه‌های رایج مانند خودروها، زرده‌های محافظ بزرگراه‌ها، آسانسورها، هواپیماها و کشتی‌ها رو به افزایش است. برخورد تجهیزات متحرک و توقف

در دهه‌های اخیر همراه با توسعه صنعتی، تقاضا برای ارتقای ایمنی در

Please cite this article using:

A. Niknejad, M. Firouzi, H.R. Saadatfard, Experimental investigation of energy absorption behavior by an aluminum profile with special cross-section subjected to the quasi-static lateral loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 229-238, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تغییر شکل‌های پلاستیک در آن، بخش قابل توجهی از انرژی ضربه زننده را مستهلک می‌نماید. ستون‌های خودرو که درب‌های خودروی سواری بر روی آن‌ها سوار می‌شوند، نیز مقاطع جدار نازکی هستند که در برخورد، اغلب تحت بار جانبی قرار می‌گیرند. این کاربردهای صنعتی، اهمیت بررسی رفتار مقاطع جدار نازک تحت بار جانبی را نشان می‌دهد. رید و ردی [15]، به بررسی اثر توان کرنش سختی در پدیده پهن‌شدگی جانبی لوله‌ها پرداختند. گوپتا و همکاران [16]، الگوی تغییر شکل و اثر پارامترهای مؤثر بر آن در لوله‌های فلزی تحت بارگذاری فشار جانبی شبه‌استاتیکی را به روش‌های تجربی و عددی بررسی کردند. کلنتانو و چابوچه [17]، میزان جذب انرژی در فرآیند پهن‌شدگی جانبی لوله‌های فولادی با مقطع دایره‌ای شکل را به صورت تجربی و عددی مطالعه نمودند. زورایدا و همکاران [18]، رفتار لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری جانبی را با روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بررسی کردند.

فان و همکاران [19]، الگوی تغییر شکل لوله‌های ساندویچی را تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار آباکوس، مورد مطالعه قرار دادند و هم‌خوانی خوبی بین نتایج تجربی و عددی مشاهده کردند. نیک نژاد و همکاران [20]، نحوه تغییر شکل‌های پلاستیک و میزان جذب انرژی ستون‌های جدار نازک چهارگوش مربع و مستطیلی طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی را ارائه کردند. آن‌ها بر پایه روش انرژی، روابطی تئوری برای پیش‌بینی نیروی لحظه‌ای و انرژی جذب شده بصورت توابعی از جابجایی جانبی، ابعاد هندسی و مشخصات مادی نمونه، ارائه کردند. کارامانوس و الیف‌سریادیس [21]، فروریزش جانبی لوله‌های دایره‌ای در حضور فشار داخلی را مورد بررسی قرار دادند. در واقع آن‌ها، اثر فشار داخلی بر نیروی حد تناسب و میزان انرژی جذب شده توسط لوله را بررسی کردند. زمانی و همکاران [22]، فرآیند لهیدگی شعاعی لوله‌های فلزی جدار نازک تحت بارگذاری عرضی شبه‌استاتیکی را به روش تجربی بررسی نمودند و نتایج بدست آمده را با فرمول‌های تحلیلی سایر محققین مقایسه کردند. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها هم‌خوانی قابل قبولی با نتایج تئوری نشان داد.

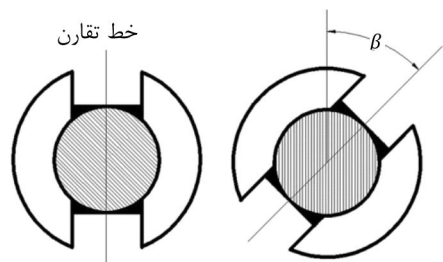
به همین ترتیب، فعالیت‌های پژوهشی متعددی رفتار مقاطع جدار نازک کامپوزیتی را تحت بارگذاری‌های مختلف با هدف جذب انرژی بررسی کرده‌اند. مهدی و همودا [23]، به بررسی اثر زاویه شش‌وجهی و جهت بارگذاری بر میزان انرژی جذب شده و الگوی شکست رینگ شش‌وجهی کامپوزیتی تحت بار جانبی پرداختند. همچنین مهدی و کادی [24]، لوله‌های کامپوزیتی با مقطع بیضی شکل را تحت بارگذاری فشار جانبی مورد بررسی قرار دادند. نیک‌نژاد و همکاران [25]، فرآیند پهن‌شدگی جانبی لوله‌های کامپوزیتی ساخته شده از جنس شیشه/وینیل استر را در دو حالت توخالی و پرشده از فوم پلی‌یورتان تحت بارگذاری فشار جانبی مطالعه نمودند. قاجار و رصاف [26]، به بررسی تجربی اثر شکل ضربه زننده بر رفتار صفحه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت ضربات سرعت پائین پرداختند. آن‌ها میزان آسیب، زمان برخورد، بیشینه‌ی نیروی برخورد، انرژی جذب شده و جابجایی را برای چهار ضربه زننده مختلف با یکدیگر مقایسه کردند. توسلی و همکاران [27]، مدل تجربی-تحلیلی جذب انرژی پروفیل کامپوزیتی کلاهی شکل تحت نیروی عرضی با سرعت پائین در سه شرایط مختلف تکیه‌گاهی را بررسی کردند.

بررسی آزمایشگاهی انجام شده توسط نیک نژاد و همکاران [14] نشان می‌دهد، در حین فرآیند پهن‌شدگی جانبی لوله‌های دایره‌ای ساده تحت بار جانبی بین دو صفحه تخت صلب، دو لولای پلاستیک در دیواره لوله تشکیل می‌شود و انحنا اولیه دیواره لوله، مسطح می‌شود. لذا، تنها دو مکانیزم

آن‌ها در مدت زمان کوتاه، گاهی موجب اعمال شتاب بیش از حد و تخریب تجهیزات و یا صدمه جانی به سرنشینان می‌شود. مهندسان و طراحان، طراحی سازه‌های تضعیف کننده شدت ضربه و مستهلک کننده انرژی را با هدف کاهش این آسیب‌ها انجام می‌دهند [1]. جاذب‌های انرژی، با هدف اتلاف انرژی جنبشی ناشی از ضربه‌های کوچک و اتلاف تمام یا بخشی از انرژی جنبشی در ضربه‌های بزرگ به دو نوع برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر تقسیم می‌شوند [2]. ضربه‌گیرها، انرژی جنبشی را به دیگر انواع انرژی تبدیل می‌کنند. در این نوع سیستم‌ها، انرژی جنبشی صرف غلبه بر اصطکاک، تغییر شکل پلاستیک یا شکست در قطعات می‌گردد [3]. انرژی مستهلک شده در محدوده رفتار الاستیک سازه، ناچیز است. ولی هنگامی که نیروهای بزرگی به سازه وارد می‌شود، تغییر شکل‌های بزرگی در سازه ایجاد می‌گردد. این گونه بارگذاری‌ها، موجب به وجود آمدن تغییرشکل‌های پلاستیک در نقاطی از سازه می‌شوند [4].

فرآیند تغییر شکل پلاستیک در یک جاذب انرژی، به اندازه و نوع بارگذاری، نرخ بارگذاری، الگوی تغییر شکل، خواص مادی و موارد متعدد دیگری نظیر شرایط تکیه‌گاهی بستگی دارد. برای یک جاذب انرژی برگشت-ناپذیر که تحت بارگذاری‌های مختلف مانند بارگذاری محوری، عرضی و مایل قرار می‌گیرد، مکانیزم‌های تغییر شکل پلاستیک متعددی به منظور تخمین میزان انرژی جذب شده آن ارائه شده است که از متداول‌ترین این مکانیزم‌ها می‌توان به مچالگی محوری [5]، وارونگی [6]، پهن‌شدگی جانبی [7] و پارگی محوری [8] اشاره نمود. به‌عنوان مثال، شریعتی و همکاران [9]، تحلیل‌هایی تجربی و عددی بر روی کنترل میزان جذب انرژی توسط پوسته‌هایی با هندسه‌های مختلف از جنس فولاد ضد زنگ تحت بار محوری شبه‌استاتیکی انجام دادند. امروزه، از سازه‌های جدار نازک با هندسه‌های مختلف به طور گسترده‌ای به عنوان جاذب انرژی جنبشی استفاده می‌شود. صرف‌نظر از کارایی یک جاذب انرژی، جاذب‌های انرژی برگشت‌ناپذیر از لحاظ هندسی انواع مختلفی دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به لوله‌ها [10]، فروستاها، قوطی‌های جدار نازک چند گوش، لانه زنبوری‌ها [11]، صفحه‌های ساندویچی و سلول‌های مکعبی شکل اشاره کرد [12].

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. بالا بودن نسبت استحکام به وزن سازه‌های جدار نازک استفاده شده به عنوان جاذب انرژی، یکی از مزایای کلیدی آن‌ها محسوب می‌شود. برای افزایش نسبت استحکام به وزن سازه‌های جدار نازک، گاه از پرکننده‌هایی نظیر فوم آلومینیوم [13]، فوم پلی‌یورتان و فوم پلی‌استیرین استفاده می‌شود. نیک نژاد و همکاران [14]، به بررسی تجربی اثر فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های مختلف بر رفتار جذب انرژی لوله‌های برنجی با سطح مقطع دایره‌ای تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی پرداختند. آن‌ها اثر طول، قطر، ضخامت و پرکننده را بر میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی، بررسی کردند. نتایج تجربی نشان داد، استفاده از فوم پلی‌یورتان میزان جذب انرژی مخصوص را طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی افزایش می‌دهد. از دیدگاه کاربردی، ضربه‌گیرهای عرضی در صنایع خودروسازی و کشتی‌سازی نقش قابل توجهی ایفاء می‌کنند. سپر برخی از خودروها، از چهار قسمت مختلف تشکیل شده است که یکی از مهمترین قطعات آن، تیر عرضی سپر 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



شکل 2 زاویه β ، امتداد بارگذاری با خط تقارن دو شیار طولی



شکل 3 بارگذاری نمونه‌ها با زوایای مختلف

مقادیر این پارامترها برای سه سطح مقطع مختلف در جدول 1، ذکر شده است. در این جدول، SS و LS به ترتیب بیانگر سطح مقطع با قطر کوچک‌تر و قطر بزرگ‌تر است.

به ازای هر دو قطر 30 و 40 میلی‌متر مربوط به سطح مقطع خاص، نمونه‌هایی با سه طول مختلف و با دیگر خصوصیات یکسان تست می‌شوند. همچنین، نمونه‌ها در سه حالت پرشدگی مختلف آزمایش می‌شوند. در این پژوهش، از فوم پلی‌یورتان با چگالی 50 کیلوگرم بر متر مکعب و تنش مسطح 260 کیلوپاسکال به‌عنوان پرکننده استفاده می‌شود. با توجه به این‌که هندسه مقطع لوله، دو دیواره 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 برای نمونه‌های با قطر بزرگ‌تر را نشان می‌دهد. علاوه بر مشخصات ذکر شده، برای هر یک از سه حالت پرشدگی مختلف، زاویه امتداد بارگذاری جانبی با خط تقارن عبوری از وسط عرض دو شیار طولی که β نام‌گذاری می‌شود، در شکل 2 نشان داده شده است.

پنج زاویه مختلف شامل صفر، 30، 45، 60 و 90 درجه انتخاب و نمونه‌ها تحت این زوایا بصورت جانبی بارگذاری می‌شوند. شکل 3، نمونه‌هایی را با زوایای بارگذاری مختلف، نشان می‌دهد.

جدول 2، کد سطح مقطع نمونه، طول نمونه، شرایط پرشدگی، زاویه بارگذاری و جرم 28 نمونه آزمایش شده را گزارش می‌دهد. برای اطمینان از تکرارپذیری آزمایش‌های انجام شده، به ازای هر یک از شرایط هندسی و پرکنندگی، دو نمونه مشابه تهیه شده و تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. لذا، مجموع آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، 56 عدد است. شرایط پرشدگی با کد F1 نمونه‌های با هسته پرشده (شکل 1-ب) را نشان می‌دهد و کد F2، بر نمونه‌هایی که به‌طور کامل با فوم پلی‌یورتان پرشده است (شکل 1-ج)، دلالت دارد. در ضمن، کد E بیانگر نمونه‌های توخالی است.

دو نمونه پروفیلی که قطرهای متفاوتی دارند، از دو نوع آلیاژ مختلف آلومینیوم ساخته شده‌اند. برای به‌دست آوردن مشخصات مادی دو پروفیل آلومینیومی، نمونه‌های دمبلی شکلی از هر ماده تهیه می‌شوند و براساس استاندارد ASTM E8M، تحت کشش استاتیکی تک محوره قرار می‌گیرند. مشخصات مادی هر دو نوع آلیاژ در جدول 1 گزارش شده‌اند. در هر آزمایش فشار جانبی، نمودار نیروی جانبی-جابجایی و نمودار انرژی جذب شده

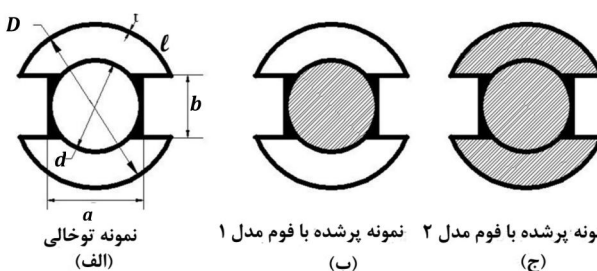
مختلف، شامل دو لولای پلاستیک و صاف شدن انحنای اولیه دیواره، در فرآیند جذب انرژی توسط لوله‌های دایره‌ای ساده نقش دارند. لذا، پژوهش حاضر، به بررسی رفتار جذب انرژی یک پروفیل جدید با هندسه خاص می‌پردازد تا امکان بروز مکانیزم‌های جذب انرژی جدیدی طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی را در مقاطع جدار نازک بررسی نماید. این مقاله، رفتار جذب انرژی یک پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع خاص تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی در سه حالت مختلف از لحاظ شرایط پرکنندگی به روش آزمایشگاهی را بررسی می‌کند. لذا، در این پژوهش، برای اولین بار، فرآیند پهن‌شدگی جانبی پروفیل در نظر گرفته شده با سطح مقطع خاص که دارای دو شیار طولی متقارن است، مطالعه می‌شود. اثر پارامترهای مختلف از جمله طول و قطر خارجی نمونه‌ها، نحوه پرشدگی نمونه‌ها با فوم پلی‌یورتان و نیز زاویه امتداد بار جانبی با خط تقارن دو شیار طولی بر روی ظرفیت جذب انرژی پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع خاص مورد بررسی قرار می‌گیرد. 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 چندین حالت مناسب برای جذب انرژی پیشنهاد گردد.

2- آزمایش‌های انجام شده

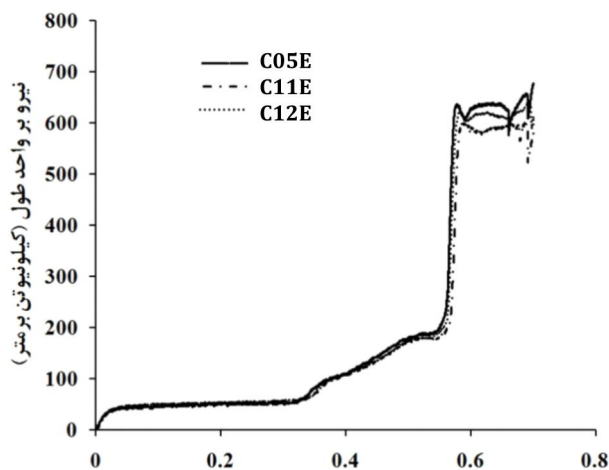
برای بررسی نحوه تغییر شکل و میزان جذب انرژی پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع خاص تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی، از روش آزمایشگاهی استفاده می‌شود. شکل 1، نمونه‌هایی از این پروفیل را نشان می‌دهد. تمام تست‌ها، با دستگاه DMG مدل 7166 انجام می‌شود. هر نمونه پس از تهیه و آماده‌سازی، بصورت جانبی بین دو صفحه صلب تخت تحت فشار جانبی قرار می‌گیرد. نمونه‌های آزمایشی، با طول اولیه 6m به روش اکستروژن تولید شده‌اند و سپس، طی فرآیند برش کاری توسط دستگاه اهر دوار، به طول مطلوب رسیده‌اند. نرخ بارگذاری در هر تست، 10 میلی‌متر بر دقیقه تنظیم می‌شود، لذا، شرایط شبه‌استاتیکی بر بارگذاری حاکم است. نمونه‌ها با شکل هندسی سطح مقطع یکسان و با دو قطر مختلف آزمایش می‌شوند تا اثر ابعاد هندسی سطح مقطع بر فرآیند پهن‌شدگی جانبی بررسی شود. شکل 1-الف، پارامترهای مختلف هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی را معرفی می‌کند. در ضمن، l طول نمونه‌ها را عمود بر سطح مقطع نشان می‌دهد.

جدول 1 خصوصیات هندسی و مادی برای پروفیل خاص با دو قطر خارجی مختلف

نوع سطح مقطع	تنش جریان (MPa)	B (mm)	A (mm)	t (mm)	d (mm)	D (mm)
SS	178	12	15	2	10	30
LS	115	12	26	2	20	40

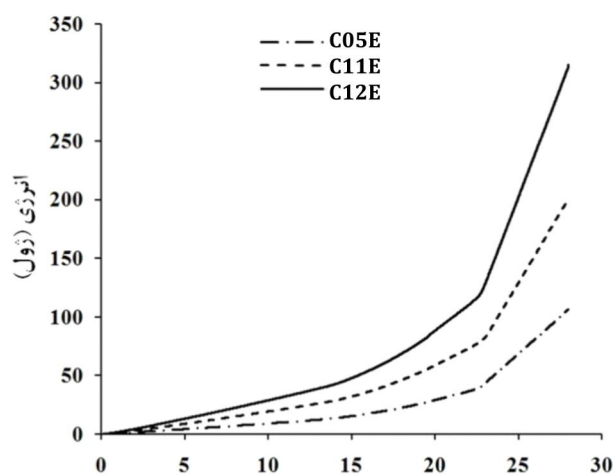


شکل 1 نمونه‌های آزمایشگاهی توخالی و پرشده با فوم مدل 1 و 2



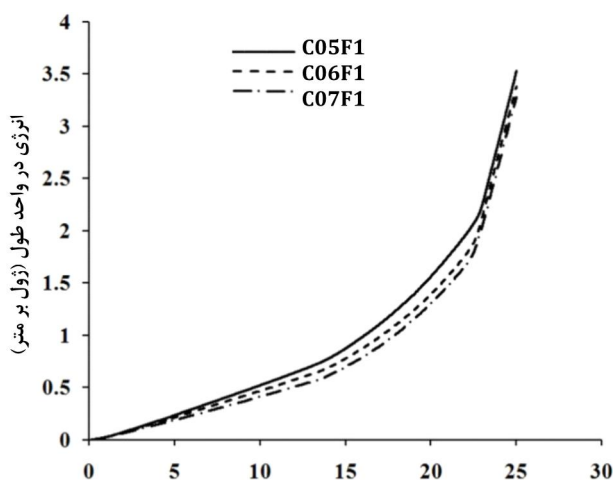
نسبت جابجایی جانبی به قطر

شکل 4 نمودار نیروی جانبی بر واحد طول - نسبت جابجایی جانبی به قطر اولیه نمونه برای سه نمونه توخالی با طول‌های مختلف و با دیگر خصوصیات یکسان و زاویه بارگذاری 90 درجه



تغییر مکان جانبی (میلی متر)

شکل 5 نمودار انرژی جذب شده - تغییر مکان جانبی برای سه نمونه توخالی با طول اولیه متفاوت و دیگر خصوصیات مادی و هندسی یکسان و زاویه بارگذاری 90 درجه



تغییر مکان جانبی (میلی متر)

شکل 6 نمودار انرژی جذب شده بر واحد طول - تغییر مکان جانبی برای سه نمونه پرشده مدل 1 با طول اولیه متفاوت و خصوصیات مادی و هندسی یکسان تحت زاویه بارگذاری 90 درجه

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.

3- نتایج و بحث

براساس نتایج آزمایشگاهی، مقادیر نیروی جانبی و جذب انرژی مخصوص و نیز اثر طول نمونه، قطر نمونه، زاویه امتداد بارگذاری جانبی با صفحه تقارن شیارها و اثر پرکننده فوم پلی‌یورتان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

3-1- اثر طول نمونه

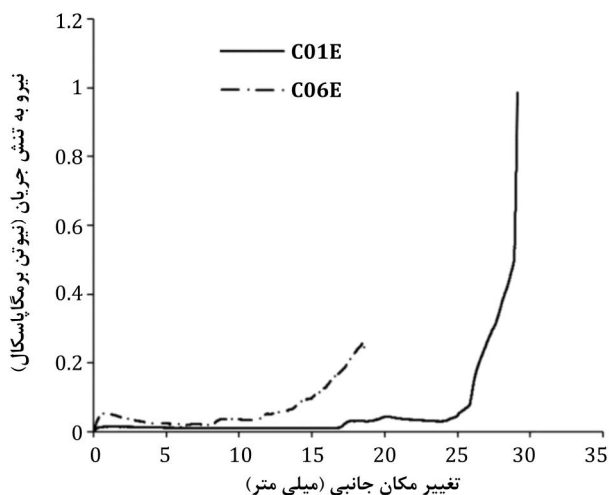
شکل 4، نمودار نسبت نیروی جانبی به طول نمونه (F/L) برحسب نسبت جابجایی جانبی به قطر اولیه (Δ/D) را برای سه نمونه توخالی که طول اولیه متفاوتی دارند، ولی دیگر خصوصیات مادی و هندسی آنها یکسان است، نشان می‌دهد. سه منحنی، برای نمونه‌هایی با طول 20، 40 و 60 میلی‌متر رسم شده است. انطباق بسیار خوب سه منحنی در اغلب نواحی به صورت آزمایشگاهی اثبات می‌کند که مقدار نیروی جانبی طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی رابطه خطی با طول اولیه نمونه مورد بررسی دارد. به عبارت دیگر، هرچه طول اولیه نمونه افزایش یابد، مقدار نیروی جانبی لازم برای له کردن جانبی آن به همان نسبت بیشتر می‌شود.

جدول 2 مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

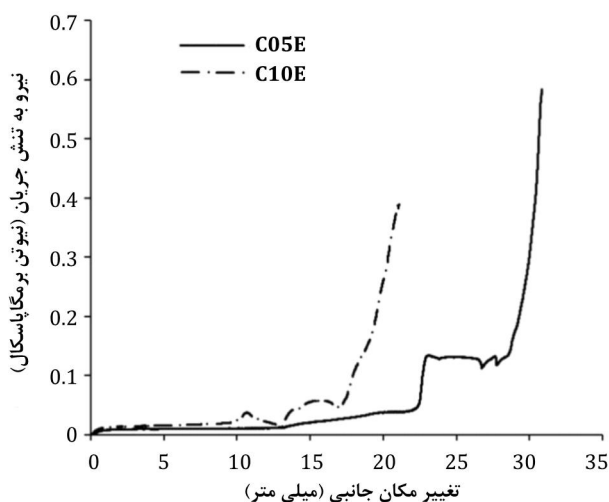
کد نمونه	جرم (گرم)	طول نمونه (میلی متر)	زاویه بارگذاری (درجه)	نوع سطح مقطع	شرایط پرشدگی
C01E	14/22	20	0	LS	توخالی
C02E	15/43	20	30	LS	توخالی
C03E	15/83	20	45	LS	توخالی
C04E	15/90	20	60	LS	توخالی
C05E	14/42	20	90	LS	توخالی
C06E	13/23	20	0	SS	توخالی
C07E	12/98	20	30	SS	توخالی
C08E	13/32	20	45	SS	توخالی
C09E	13/17	20	60	SS	توخالی
C10E	13/26	20	90	SS	توخالی
C11E	30/29	40	90	LS	توخالی
C12E	45/32	60	90	LS	توخالی
C13E	25/05	40	90	SS	توخالی
C14E	37/40	60	90	SS	توخالی
C01F1	16/17	20	0	LS	پرشده مدل 1
C02F1	16/19	20	30	LS	پرشده مدل 1
C03F1	16/09	20	45	LS	پرشده مدل 1
C04F1	16/20	20	60	LS	پرشده مدل 1
C05F1	16/15	20	90	LS	پرشده مدل 1
C06F1	31/50	40	90	LS	پرشده مدل 1
C07F1	46/81	60	90	LS	پرشده مدل 1
C01F2	15/77	20	0	LS	پرشده مدل 2
C02F2	15/97	20	30	LS	پرشده مدل 2
C03F2	15/88	20	45	LS	پرشده مدل 2
C04F2	16/02	20	60	LS	پرشده مدل 2
C05F2	15/55	20	90	LS	پرشده مدل 2
C06F2	32/76	40	90	LS	پرشده مدل 2
C07F2	48/19	60	90	LS	پرشده مدل 2

علت کوچکتر بودن مقدار نیروی جانبی لازم برای له‌شدگی جانبی مقاطع توخالی در یک جابجایی جانبی یکسان، را می‌توان به این صورت بیان نمود. طی فرآیند تغییر شکل پلاستیک، مطابق شکل 9، پنج لولای پلاستیک در هر سمت مقطع جدار نازک ایجاد می‌شود و برای تشکیل آن‌ها، به اعمال گشتاور خمشی حول هر لولا نیاز است. گشتاور خمشی حول هر لولا از نیروی جانبی وارد بر سطح مقطع توسط فک‌های صلب و تخت دستگاه ایجاد می‌شود. لذا، هرچه قطر نمونه بزرگتر شود، طول بازوی گشتاور خمشی حول هر لولای پلاستیک بلندتر می‌شود. بنابراین، با توجه به ثابت بودن گشتاور خمشی لازم برای تشکیل هر لولای پلاستیک، با افزایش قطر مقطع جدار نازک، نیروی لازم برای له‌شدگی جانبی آن کاهش می‌یابد.

رید و ردی [15]، رابطه‌ای تئوری برای پیش‌بینی نیروی جانبی برحسب تغییر مکان جانبی طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی در لوله‌های دایره‌ای ساده ارائه کردند. تئوری تحلیلی آنها به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش قطر، نیروی جانبی کاهش می‌یابد. اگرچه، هندسه مقطع جدارنازک در این پژوهش با هندسی بررسی شده توسط رید و ردی [15] متفاوت است، ولی نمودارهای تجربی بدست آمده در این پژوهش، برای نمونه‌های توخالی با قطرهای متفاوت، روند مشابهی را نشان می‌دهند.



شکل 7 نمودار نیروی جانبی به تنش جریان - تغییر مکان برای نمونه‌ها با قطر خارجی 30 و 40 میلی‌متر و زاویه بارگذاری صفر درجه



شکل 8 نمودار نیروی جانبی به تنش جریان - تغییر مکان برای نمونه‌ها با قطر 30 و 40 میلی‌متر و زاویه بارگذاری 90 درجه

سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان جانبی، انرژی جذب شده توسط هر نمونه طی فرآیند له‌شدگی را نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر، شکل 5، نمودارهای میزان جذب انرژی برحسب جابجایی برای همان سه نمونه قبلی را با یکدیگر مقایسه می‌کند.

به عنوان مثال، این نمودار نشان می‌دهد، در تغییر مکان جانبی یکسان 25 میلی‌متر، مقدار انرژی جذب شده توسط سه نمونه توخالی C05E، C11E و C12E به ترتیب با طول اولیه 20، 40 و 60 میلی‌متر برابر با 68/31، 128/43 و 201/49 ژول است. به عبارت دیگر، نسبت طول نمونه‌های C11E/C05E و C12E/C05E به ترتیب برابر با 2 و 3 و نسبت انرژی جذب شده آن‌ها تا جابجایی جانبی ذکر شده برابر با 1/88 و 2/95 است. مقایسه‌های انجام شده در شکل‌های 4 و 5 نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی و نیروی جانبی در فرآیند له‌شدگی جانبی مقطع خاص مورد بررسی، متناسب با طول اولیه نمونه‌ها است، لذا، مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم نمونه‌ها که جذب انرژی مخصوص نامیده می‌شود، مستقل از طول است. چنان‌چه، از اصل جمع آثار، ارتباط خطی بین مقدار نیروی جانبی با طول نمونه پذیرفته شود، در این صورت انطباق خوب نتایج در این دو شکل، صحت و دقت آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

شکل 6، نمودار انرژی جذب شده در واحد طول مقطع جدار نازک بررسی شده در حالت پر شده از فوم پلی‌یورتان را برحسب تغییر مکان جانبی نشان می‌دهد. در این شکل، تمام خصوصیات هندسی، مادی و پرکنندگی سه نمونه یکسان است و فقط طول اولیه آن‌ها متفاوت و برابر با 20، 40 و 60 میلی‌متر است. هسته هر سه نمونه با فوم پر شده است. این شکل نشان می‌دهد، در مقطع جدارنازک پر شده، همانند مقاطع توخالی، انرژی جذب شده تحت بار جانبی با طول نمونه‌ها نسبت مستقیم دارد.

3-2- اثر قطر نمونه

شکل‌های 7 و 8 نمودار نیروی جانبی به تنش جریان برحسب جابجایی جانبی برای دو نمونه توخالی را که دارای ضخامت دیواره و طول اولیه یکسان هستند ولی قطر خارجی آن‌ها متفاوت و برابر با 30 و 40 میلی‌متر است، را نشان می‌دهد. در شکل 7، نمونه‌ها تحت زاویه صفر درجه و در شکل 8 نمونه‌ها تحت زاویه 90 درجه تحت بارگذاری جانبی بین دو فک صلب قرار گرفته‌اند.

هر دو شکل نشان می‌دهند، در یک تغییر مکان جانبی یکسان، وقتی قطر خارجی نمونه‌های توخالی افزایش می‌یابد، نیروی جانبی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، نیروی جانبی لازم برای انجام فرآیند پهن‌شدگی جانبی بر روی مقاطع توخالی دارای دو شیار طولی متقارن که دارای قطر بزرگتر هستند، در یک جابجایی یکسان، کمتر از نمونه‌های مشابه با قطر کوچکتر است، اما، تغییر مکان نهایی نمونه‌های با قطر بزرگتر، بیشتر از نمونه‌های با قطر اولیه کوچکتر است.

طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی در مقاطع خاص بررسی شده تحت بارگذاری جانبی، لولاهای پلاستیک مطابق شکل 9، در دو سمت راست و چپ نمونه بصورت متقارن تشکیل می‌شود. از آنجایی که حداکثر تغییر مکان جانبی ممکن برای هر نمونه توخالی برابر با تفاضل قطر داخلی حلقه بیرونی آن و مجموع ضخامت‌های چهار لایه تاخورد در حین فرآیند است، علت بزرگتر بودن جابجایی نهایی نمونه‌های قطور مشخص می‌شود.

در رابطه فوق، σ_0 تنش جریان مادی و t ضخامت ورق است. شکل 12 نشان می‌دهد، در نمونه توخالی، دو عدد از لولاهای پلاستیک در محل اتصال حلقه بیرونی به شیارهای طولی تشکیل شده است که در این قسمت، نمونه دارای بیشترین ضخامت دیواره است، ولی در نمونه توپر مشابه، این دو لولای پلاستیک با فاصله کمی از محل اتصال حلقه بیرونی به شیارهای طولی که در این محل، ضخامت دیواره نمونه‌ها کوچکتر است، شکل گرفته است. تغییر در محل شکل‌گیری این دو لولای پلاستیک در نمونه‌های توپر در مقایسه با نمونه توخالی متناظر به دلیل وجود فوم پرکننده درون نمونه‌ها و تغییر در الگوی تغییر شکل به دلیل وجود فوم پلی‌یورتان است. روابط (1) و (2) نشان می‌دهند، میزان انرژی مستهلک شده توسط یک لولای پلاستیک، به توان دوم ضخامت دیواره وابسته است. لذا، ضخیم‌تر بودن دیواره نمونه در محل ایجاد دو لولای پلاستیک ذکر شده در نمونه توخالی در مقایسه با نمونه‌های توپر، یکی از عوامل تغییر در ترتیب مقدار نیروی جانبی نمونه‌ها تحت زاویه بارگذاری 90 درجه (در مقایسه با این توالی در نمونه‌های تحت زاویه بارگذاری صفر درجه) است. به عبارت دیگر، این امر، یکی از دلایل بالاتر بودن دور از انتظار مقدار نیروی جانبی نمونه‌های توخالی در مقایسه با نمونه توپر متناظر است. دلیل دوم، با مرور مشاهدات تجربی انجام شده حین آزمایش فشار جانبی بر روی نمونه‌های ذکر شده، مشخص می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند، در حین فرآیند پهن‌شدگی جانبی مقاطع جدار نازک توخالی، یک لولای پلاستیک اضافی در وسط طول لبه بالایی نمونه که قبل از تغییر شکل به‌صورت کماتی از یک دایره است، شکل می‌گیرد و سپس با ادامه بارگذاری، دوباره این لولای پلاستیک ایجاد شده، صاف می‌شود. این پدیده بر روی لبه پایینی نمونه نیز بصورت مشابه رخ می‌دهد. ولی، در نمونه‌های توپر، به دلیل نیروی مقاوم فوم پلی‌یورتان که به‌صورت فشار داخلی بر سطح داخلی حلقه‌های درونی و بیرونی نمونه‌ها اعمال شود، این پدیده مشاهده نمی‌شود. این اختلاف در الگوی تغییرشکل در نمونه توخالی در مقایسه با نمونه‌های توپر، دلیل دیگری برای بالاتر بودن میزان نیروی جانبی در نمونه توخالی در مقایسه با نمونه‌های توپر است.

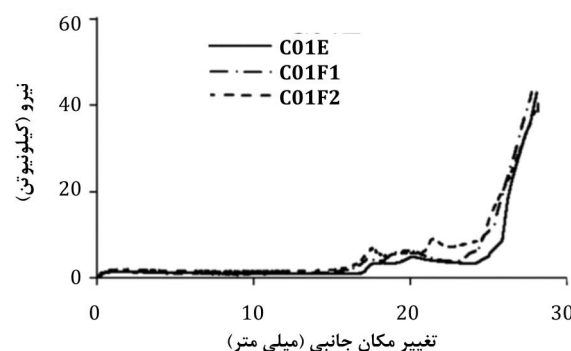
شکل 13، نمودار جذب انرژی مخصوص را برای نمونه‌های مختلف با زوایای بارگذاری صفر، 30، 45، 60 و 90 درجه در سه حالت توخالی، پر شده با فوم پلی‌یورتان مدل 1 و پر شده با فوم پلی‌یورتان مدل 2، مقایسه می‌کند. نتایج روی شکل نشان می‌دهد، در مقطع جدار نازک بررسی شده در شرایطی که زاویه بارگذاری صفر درجه است، مقدار جذب انرژی مخصوص نمونه‌های پر شده مدل 2 و مدل 1 و نمونه توخالی متناظر، به ترتیب برابر با 9/29، 10/51 و 8/21 کیلوژول بر کیلوگرم است. به عبارت دیگر، پرکننده فوم پلی‌یورتان باعث افزایش جذب انرژی مخصوص در نمونه‌های پر شده مدل 1 و 2 به ترتیب به میزان 13/2% و 28% در مقایسه با نمونه توخالی متناظر تحت زاویه بارگذاری یکسان صفر درجه شده است. این مقایسه، مزیت استفاده از فوم پلی‌یورتان را به‌عنوان پرکننده نشان می‌دهد. لذا، در شرایطی که مقطع جدار نازک بررسی شده به‌عنوان یک جاذب انرژی عرضی استفاده شود و نحوه نصب آن به‌گونه‌ای باشد که زاویه بارگذاری احتمالی صفر درجه باشد، پر کردن نمونه از فوم می‌تواند قابلیت جذب انرژی مخصوص آن را تا 28% افزایش دهد.

3-4- اثر زاویه بارگذاری

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره گردید، شکل 13، نمودار جذب انرژی مخصوص را برای نمونه‌های مختلف با زوایای بارگذاری صفر، 30، 45، 60 و 90 درجه در سه حالت توخالی، پر شده با فوم پلی‌یورتان مدل 1 و پر شده با فوم پلی‌یورتان مدل 2، نشان می‌دهد.



شکل 9 تشکیل پنج لولای پلاستیک در هر سمت نمونه، طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی



شکل 10 نمودار نیروی جانبی - تغییر مکان برای سه نمونه از مقاطع جدار نازک خاص با مشخصات هندسی و مادی یکسان و با شرایط پرکنندگی متفاوت تحت زاویه بارگذاری صفر درجه

3-3- اثر پرکننده فوم پلی‌یورتان

شکل 10، نمودار نیروی جانبی برحسب تغییر مکان را برای سه نمونه از مقاطع جدار نازک خاص با مشخصات هندسی و مادی یکسان و با شرایط پرکنندگی متفاوت را که تحت زاویه بارگذاری صفر درجه تحت فشار جانبی قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. یکی از این سه نمونه، توخالی، نمونه دیگر با هسته پر شده، و نمونه سوم بطور کامل از فوم پلی‌یورتان پر شده است. این شکل نشان می‌دهد، مطابق انتظار، مقدار نیروی جانبی لازم برای له‌شدگی جانبی نمونه کاملاً شده بیشتر از نمونه با هسته پر شده و مقدار نیروی جانبی نمونه اخیر نیز بیشتر از نمونه توخالی متناظر است. بنابراین، در زاویه بارگذاری صفر درجه، وجود فوم پرکننده باعث افزایش مقدار نیروی جانبی و در نتیجه، افزایش جذب انرژی کل توسط سازه می‌شود.

به همین ترتیب، در شکل 11، نمودارهای نیروی جانبی - تغییر مکان سه نمونه آزمایشی با ابعاد هندسی و خصوصیات مادی یکسان و با شرایط پرکنندگی مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. این سه نمونه با زاویه بارگذاری 90 درجه، تحت فشار محوری قرار گرفته‌اند. این شکل نشان می‌دهد، برخلاف انتظار، در برخی نواحی، نیروی جانبی وارد بر نمونه توخالی از نیروی وارد بر نمونه با هسته پر شده و نمونه کاملاً پر شده بیشتر است. شکل 12 برای بررسی و توجیه این پدیده دور از انتظار، ارائه شده است. در این شکل، بخشی از الگوی تغییر شکل سه نمونه ذکر شده را نشان می‌دهد. انرژی مستهلک شده طی تشکیل یک لولای پلاستیک در یک ورق از رابطه (1) محاسبه می‌شود:

$$E = M_0 \ell \Delta \theta \quad (1)$$

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 (2) محاسبه می‌شود:

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

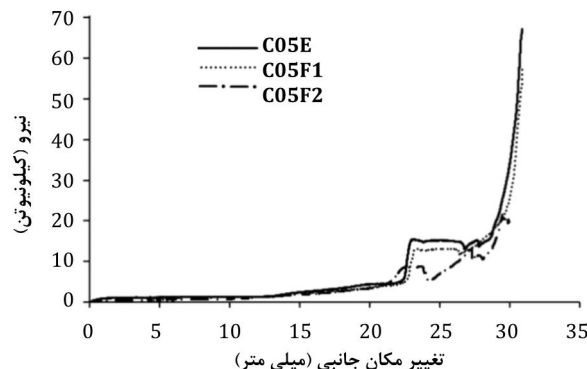
همچنین، شکل 13 نشان می‌دهد، در حالت توخالی، بالاترین میزان جذب انرژی مخصوص متعلق به نمونه‌ای با زاویه بارگذاری 90 درجه است. به عبارت دیگر، جذب انرژی مخصوص توسط نمونه‌های توخالی با زوایای بارگذاری 90 و صفر درجه به ترتیب 141/6 و 127% بیشتر از نمونه توخالی مشابه با زاویه بارگذاری 60 درجه است. لذا، این نتیجه حاصل می‌شود، چنانچه مقطع جدار نازک توخالی به عنوان جاذب انرژی تحت بارگذاری جانبی مورد استفاده قرار گیرد، باید بگونه‌ای نصب گردد که زاویه بارگذاری احتمالی وارد بر آن، 90 یا صفر درجه باشد.

بررسی نتایج نمونه‌های توخالی و توپر ارائه شده در شکل 13 این نکته جالب را نشان می‌دهد، روند کاهشی-افزایشی مقدار جذب انرژی مخصوص توسط مقطع جدار نازک خاص بررسی شده، با افزایش زاویه بارگذاری از صفر تا 90 درجه، برای هر دو مدل پرشدگی 1 و 2 مشابه با نمونه‌های توخالی، تکرار شده است. به عبارت دیگر، در هر دو حالت پرشدگی مدل 1 و مدل 2، کمترین میزان جذب انرژی مخصوص متعلق به نمونه‌ای است که با زاویه 45 درجه، تحت بارگذاری فشار جانبی قرار گرفته است. لذا، در حالت کلی این نتیجه حاصل می‌شود، زوایای بارگذاری 45 و 60 درجه، حالت‌های بحرانی برای بارگذاری جانبی هستند و نمونه‌های توخالی و توپری که با یکی از دو زاویه 45 یا 60 درجه تحت فشار جانبی قرار گرفته‌اند، کمترین قابلیت جذب انرژی مخصوص را در مقایسه با دیگر زوایای بارگذاری دارند.

از طرفی نتایج آزمایشگاهی مربوط به نمونه‌های پرشده مدل 1 که در شکل 13 گزارش شده است، نشان می‌دهد، جذب انرژی مخصوص نمونه‌های پرشده مدل 1 تحت زوایای بارگذاری صفر و 90 درجه در مقایسه با زاویه بارگذاری بحرانی 45 درجه، به ترتیب 148/6 و 82/3% افزایش یافته است. به بیان دیگر، در نمونه‌های جدارنازکی که فقط هسته آن‌ها با فوم پلی‌پورتان پر شده است، بهینه‌ترین حالت نصب سازه به‌گونه‌ای است که بار احتمالی جانبی با زاویه بارگذاری صفر یا 90 درجه بر آن اعمال شود.

مرور نتایج شکل 13 نشان می‌دهد، در مقاطع جدار نازکی که به‌طور کامل پر شده‌اند، با افزایش زاویه بارگذاری از صفر تا 45 درجه، روند جذب انرژی مخصوص به‌صورت کاهشی و پس از آن تا زاویه 90 درجه بصورت افزایشی است. در ضمن، میزان جذب انرژی توسط سازه جدار نازک با مدل پرشدگی 2 به زوایای بارگذاری صفر و 90 درجه، به ترتیب 191/1 و 53% بیشتر از جذب انرژی مخصوص نمونه مشابه تحت زاویه بارگذاری 45 درجه است. شکل 14، نمونه جدارنازک پرشده از فوم تحت بارگذاری با زاویه 45 درجه را نشان می‌دهد.

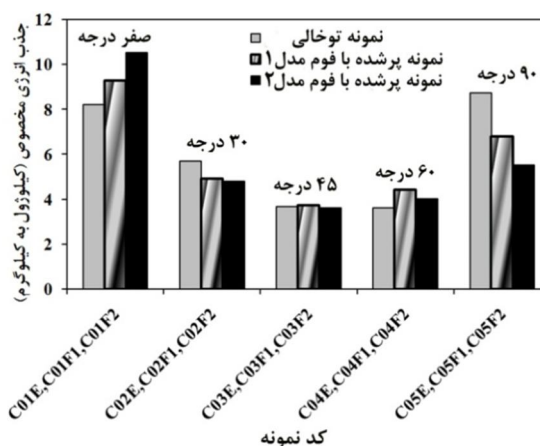
در مجموع، بالاترین نسبت انرژی جذب شده به جرم در بین تمام نمونه‌ها برابر با 10/51 کیلوژول بر کیلوگرم، متعلق به نمونه C01F2 است که مقطع جدار نازک کاملاً پرشده تحت بار جانبی با زاویه صفر درجه است و کمترین مقدار این نسبت برابر با 3/61 کیلوژول بر کیلوگرم، مربوط به نمونه جدار نازک کاملاً پرشده C03F2 با زاویه بارگذاری 45 درجه است. از این مقایسه، دو نتیجه حاصل می‌شود. اول آن‌که، با نصب بهینه مقطع جدار نازک خاص معرفی شده در این مقاله، در شرایط کاملاً پرشده تحت زاویه بارگذاری صفر درجه، می‌توان به قابلیت جذب انرژی مخصوص بیش از 10/5 کیلوژول بر کیلوگرم تحت بار جانبی شبه‌استاتیکی دست یافت که مقدار قابل توجهی برای این نوع بارگذاری محسوب می‌شود. در ضمن، با تغییر در نحوه نصب نمونه‌های جدار نازک کاملاً پرشده و در نتیجه، تغییر زاویه بارگذاری آن از 45 به صفر درجه، می‌توان به میزان جذب انرژی مخصوص 2/9 برابر رسید. این مقایسه، اهمیت زاویه بارگذاری بر فرآیند جذب انرژی را نشان می‌دهد.



شکل 11 نمودار نیروی جانبی - تغییر مکان سه نمونه آزمایشی با ابعاد هندسی و خصوصیات مادی یکسان و با شرایط پرکنندگی مختلف تحت زاویه بارگذاری 90 درجه



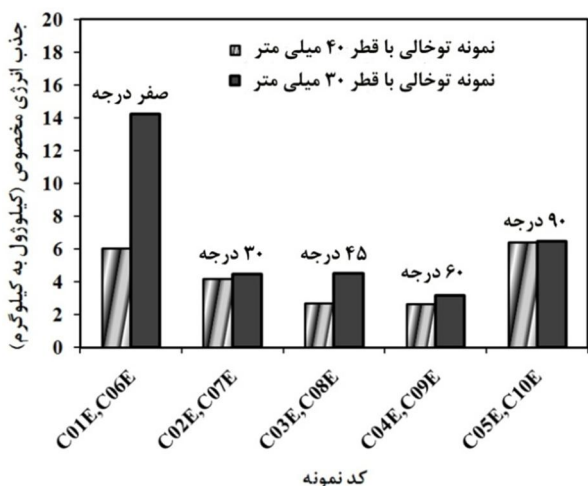
شکل 12 محل تشکیل لولاهای پلاستیک در نمونه‌های مشابه در دو حالت توخالی و پرشده از فوم پلی‌پورتان



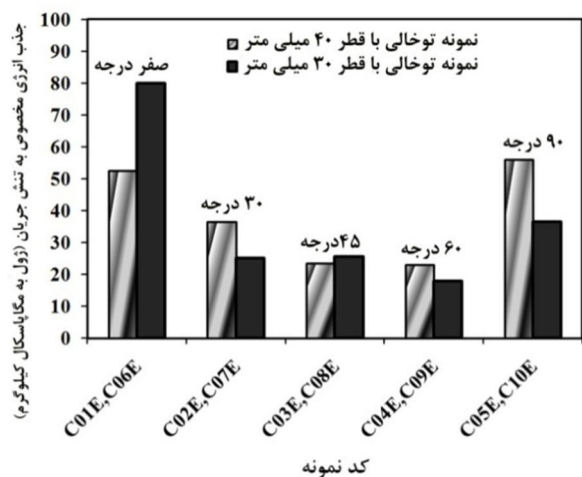
شکل 13 مقایسه جذب انرژی مخصوص نمونه‌های مختلف با قطر خارجی یکسان و با زوایای بارگذاری و شرایط پرشدگی متفاوت

در این نمودار، نتایج به صورت دسته‌های سه تایی به‌صورت نمودار میله‌ای رسم شده است که هر دسته سه تایی، مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی با سطح مقطع خاص است که دارای طول، ضخامت و قطر یکسان هستند و تنها، تفاوت آن‌ها در شرایط پرکنندگی 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 زوایای بارگذاری است.

نتایج ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد، در نمونه‌های توخالی با سطح مقطع خاص، وقتی زاویه بارگذاری از صفر به 90 درجه به تدریج افزایش می‌یابد، جذب انرژی مخصوص ابتدا یک سیر نزولی و پس از زاویه بارگذاری 60 درجه، یک سیر صعودی را طی می‌کند تا در نهایت، در زاویه بارگذاری 90 درجه، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به عبارت دیگر، در نمونه‌های توخالی، زاویه بارگذاری 60 درجه یک حالت بحرانی را نشان می‌دهد که در این حالت، میزان جذب انرژی مخصوص مقطع جدار نازک توخالی مورد بررسی، در مقایسه با دیگر زوایای ممکن برای بارگذاری، کمینه است.



شکل 15 مقایسه جذب انرژی مخصوص برای جفت نمونه‌هایی با قطر خارجی 30 و 40 میلی متر تحت زوایای بارگذاری مختلف



شکل 16 مقایسه نسبت جذب انرژی مخصوص به تنش جریان برای جفت نمونه‌هایی با قطر خارجی 30 و 40 میلی متر تحت زوایای بارگذاری مختلف

از آنجایی که نمونه‌های با قطر خارجی مختلف 30 و 40 میلی‌متر از آلیاژهای مختلف آلومینیوم ساخته شده‌اند، برای کم کردن تأثیر استحکام ماده، در شکل 16، نمودار نسبت جذب انرژی مخصوص به تنش جریان مادی برای هر جفت نمونه‌های توخالی که قطر خارجی آن‌ها متفاوت است، رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد، در محدوده مورد بررسی، بالاترین نسبت جذب انرژی مخصوص به تنش جریان، به نمونه توخالی با قطر کوچک تحت زاویه صفر درجه تعلق دارد.

بیشترین مقدار جذب انرژی مخصوص به تنش جریان در نمونه‌های توخالی با قطر 40 میلی‌متر، با توجه به روند کاهشی-افزایشی نمودار از زاویه بارگذاری صفر تا 90 درجه، مربوط به نمونه C05E با زاویه بارگذاری 90 درجه است. انجام مقایسه مشابه بین نمونه‌های با قطر کوچک‌تر نشان می‌دهد، بیشترین نسبت جذب انرژی مخصوص به تنش جریان در نمونه‌های با قطر 30 میلی‌متر، تحت زاویه بارگذاری صفر درجه بدست می‌آید و با افزایش زاویه بارگذاری از صفر به 30، 45 یا 60 درجه، میزان این نسبت کمتر از نصف می‌شود. همچنین، کمترین مقدار نسبت جذب انرژی مخصوص به تنش جریان در بین تمام نمونه‌های بررسی شده در شکل 16 با قطرهای 30 و 40 میلی‌متر، مربوط به نمونه C09E با قطر خارجی 30 میلی‌متر و با زاویه بارگذاری 60 درجه است.

دلیل اصلی این تفاوت چشم‌گیر، بروز تغییرات قابل توجه در الگوی تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی، در اثر تغییر در زاویه بارگذاری است.

از نگاهی دیگر، مقایسه هر دسته سه تایی رسم شده در نمودار میله‌ای شکل 13 نشان می‌دهد، اثر پرکننده فوم پلی‌یورتان در زوایای مختلف یکسان نیست. به عبارت دیگر، وجود دو نوع مدل مختلف برای پرکردن نمونه‌های جدار نازکی که تحت بارگذاری با زاویه 45 درجه قرار گرفته‌اند، تأثیر ناچیزی بر میزان جذب انرژی مخصوص سازه دارد و جذب انرژی هر سه نوع شرایط پرکنندگی مختلف (یک حالت توخالی و دو حالت توپر) تحت زاویه بارگذاری 45 تقریباً یکسان است. در ضمن، در نمونه‌هایی که با زاویه 90 درجه بارگذاری شده‌اند، فوم پلی‌یورتان نامطلوب‌ترین اثر را بر میزان جذب انرژی مخصوص دارد و در این زاویه بارگذاری، نمونه‌های توخالی عملکرد جذب انرژی بسیار بهتری در مقایسه با دو مدل توپر دارند. همین روال با شدت کمتری در نمونه‌های با زاویه بارگذاری 30 درجه نیز مشاهده می‌شود. از طرفی، همان‌گونه که از قبل بیان گردید، مؤثرین حالت استفاده از پرکننده فوم پلی‌یورتان، مربوط به زاویه بارگذاری صفر درجه است.

از دیدگاه دیگر، چنانچه به دلیل محدودیت‌های طراحی، امکان نصب مقطع جدار نازک خاص بررسی شده به گونه‌ای که تحت بارگذاری با زاویه صفر درجه قرار بگیرد، وجود نداشته باشد، نصب این سازه به‌صورت توخالی به گونه‌ای که تحت بارگذاری با زاویه 90 قرار بگیرد، می‌تواند یک انتخاب مناسب باشد. در این حالت، جذب انرژی مخصوص نمونه توخالی با زاویه بارگذاری 90 درجه از تمام نمونه‌های توخالی و پرشده با مدل 1 و 2 تحت زوایای بارگذاری 30، 45 و 60 درجه، به میزان چشم‌گیری بیشتر است.

شکل 15، نمودار جذب انرژی مخصوص مربوط هر جفت نمونه توخالی با قطر خارجی متفاوت 30 و 40 میلی‌متر را تحت زوایای بارگذاری مختلف نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد، در تمام زوایای مختلف بارگذاری، همواره جذب انرژی مخصوص مقطع جدار نازک خاص با قطر کوچک‌تر، بیشتر از نمونه مشابه با قطر بزرگتر است. در ضمن، بالاترین میزان جذب انرژی مخصوص متعلق به نمونه توخالی با قطر خارجی 30 میلی‌متر تحت زاویه بارگذاری صفر درجه است که مقدار آن چشم‌گیر و برابر با 14/22 کیلوژول بر کیلوگرم است. در ضمن، تغییر قطر نمونه، در زوایای بارگذاری 30 و 90 درجه، محسوس نیست. نتایج نشان می‌دهند، در نمونه‌های با قطر 40 میلی‌متر، بالاترین میزان جذب انرژی به جرم، تحت بارگذاری با زوایای 90 و صفر درجه صورت می‌گیرد.



شکل 14 نمونه جدارنازک پرشده از فوم تحت بارگذاری با زاویه 45 درجه، در حین فرآیند پهن‌شدگی جانبی

دیگر، نیروی جانبی لازم برای بروز فرآیند پهن‌شدگی جانبی در پروفیل توخالی با سطح مقطع خاص که دارای قطر بزرگ‌تر است با وجود جابجایی جانبی نهایی بیشتر، کمتر از نمونه‌های مشابه با قطر کوچک‌تر است. بیشترین مقدار جذب انرژی مخصوص به تنش جریان در نمونه‌های توخالی با قطر 40 میلی‌متر در زوایای مختلف بارگذاری، مربوط به زاویه چرخش 90 درجه است. همچنین از دیدگاه زاویه بارگذاری، در مقایسه کلی بین تمام نمونه‌ها با سطح مقطع خاص، پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع خاص در شرایط کاملا پرشده تحت زاویه بارگذاری جانبی صفر درجه، بهترین جاذب انرژی توپر و نمونه توخالی تحت زاویه بارگذاری 90 درجه، بهترین جاذب انرژی توخالی معرفی گردید. در ضمن مشخص شد، نمونه‌های تحت زوایای بارگذاری 45 و 60 درجه، ضعیف‌ترین جاذب انرژی هم در حالت توخالی و هم در حالت توپر هستند.

5- تقدیر و تشکر

این مقاله، بخشی از طرح تحقیقاتی شماره 93025667 است که هزینه آن توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (وابسته به معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری) تأمین شده است. لذا، از حمایت‌های مادی و معنوی این صندوق قدردانی می‌شود.

6- مراجع

- [1] N. Jones, W. Abramowicz, Static and dynamic axial crushing of circular and square tubes, In: Reid, S.R. editor. *Metal forming and impact mechanics*, New York: Pergamon Press, pp. 225-247, 1985.
- [2] J. M. Alexander, An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 13, No. 1, pp. 10-5, 1960.
- [3] W. Johnson, S.R. Reid, Metallic energy dissipating systems, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 31, No. 3, pp. 277-288, 1978.
- [4] G.H. Daneshi, S.J. Hosseinipour, Elastic-plastic theory for initial buckling load of thin-walled grooved tubes under axial compression, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, pp. 826-832, 2002.
- [5] M. M. Abedi, A. Niknejad, G. H. Liaghat, M. ZamaniNejad, Prediction of the mean folding force during the axial compression in foam-filled grooved tubes by theoretical analysis, *Materials and Design*, Vol. 37, pp. 144-51, 2012.
- [6] Y.H. Luo, Z.W. Huang, X.L. Zhang, FEM analysis of external inversion and energy absorbing characteristics of inverted tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, pp. 279-282, 2007.
- [7] S. Mori, K. I. Manabe, H. Nishimura, K. Hirose, Experimental analysis of the flattening of the cross-sections of springback and the bending moment of clad tubes in uniform bending, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 66, pp. 270-276, 1997.
- [8] A. Niknejad, B. Rezaei, Gh. H. Liaghat, Empty circular metal tubes in the splitting process-theoretical and experimental studies, *Thin-walled structures*, Vol. 72, pp. 48-60, 2013.
- [9] M. Shariati, M. Davarpanah, H. Chavoshan, H. R. Allahbakhsh, Numerical and experimental investigations on buckling and control amount of energy absorption of stainless steel 304L shells with various shapes under axial loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 60-68, 2014 (In Persian)
- [10] M. H. Shojaeifard, H. R. Zarei, R. Talebitooti, M. Mehdikhanlo, Bending behavior of empty and foam-filled aluminum tubes with different cross-sections, *ActaMechanica Solid Sinica*, Vol. 25, No. 6, December, 2012.
- [11] A. Alavi Nia, M. Z. Sadeghi, An experimental investigation on the effect of strain rate on the behaviour of bare and foam-filled aluminium honeycombs, *Materials and Design*, Vol. 52, pp. 748-756, 2013.
- [12] W. Johnson, A.C. Walton, Protection of car occupants in frontal impact with heavy lorries: frontal structures, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 111-123, 1983.
- [13] E. Zamani, Gh. H. Liaghat, M. H. Pol, Modeling and analytical study of progressive collapse of aluminum foam, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 99, No. 9, pp. 9-99, 9999 (In Persian)



شکل 17 نمونه جدار نازک توخالی تحت بارگذاری با زاویه 60 درجه، در حین فرآیند پهن‌شدگی جانبی

شکل 17، نمونه توخالی C09E را در حین فرآیند پهن‌شدگی جانبی نشان می‌دهد. با مرور نتایج کلیه آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف، می‌توان به این نتیجه‌گیری کلی دست یافت که بالاترین میزان جذب انرژی مخصوص و نیز نسبت جذب انرژی مخصوص به تنش جریان، در هر دو نمونه با قطرهای 30 و 40 میلی‌متر، مربوط به زوایای بارگذاری صفر و 90 درجه است.

زمانی و همکاران [22]، رفتار لهیدگی جانبی لوله‌های جدار نازک آلومینیومی و برنجی بین دو صفحه صلب تخت را تحت بار فشار شبه-استاتیکی بررسی نمودند. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان می‌دهد، طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی لوله‌های دایره‌ای ساده، ابتدا نیرو از مقدار صفر با نرخ بالایی، افزایش می‌یابد و سپس طی یک تغییر مکان جانبی بزرگ، مقدار آن تقریباً ثابت باقی می‌ماند که این امر از دیدگاه جذب انرژی، نکته ارزشمندی است. بررسی نمودارهای نیرو-تغییر مکان حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های جدارنازک با سطح مقطع خاص نشان می‌دهد، نیروی جانبی اعمال شده بر هندسه بررسی شده در این مقاله نیز طی یک تغییر مکان بزرگ، تغییرات اندکی دارد که این امر، از دیدگاه جذب انرژی یک مزیت محسوب می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ظرفیت جذب انرژی و نحوه فرآیند پهن‌شدگی جانبی یک نوع پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع خاص، تحت بارگذاری فشار جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی به روش آزمایشگاهی بررسی شده است. اثر پارامترهای مختلف هندسه پروفیل نظیر طول و قطر خارجی نمونه‌ها، سه حالت پرشدگی مختلف نمونه‌ها توسط پرکننده فوم پلی‌یورتان و نیز اثر زاویه بارگذاری جانبی بر روی مقدار نیروی جانبی، جذب انرژی کل و جذب انرژی مخصوص مطالعه گردید. نتایج تجربی انجام شده، نشان می‌دهد، مقدار نیروی جانبی طی فرآیند پهن‌شدگی جانبی، رابطه خطی با طول اولیه نمونه مورد بررسی دارد. به عبارت دیگر، هرچه طول اولیه نمونه افزایش یابد، مقدار نیروی جانبی لازم برای له کردن جانبی آن به همان نسبت بیشتر می‌شود. لذا، مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم نمونه‌ها که جذب انرژی مخصوص نامیده می‌شود، مستقل از طول آن‌هاست. همچنین نتایج نشان داد، با افزایش قطر نمونه‌های توخالی، در یک جابجایی یکسان، نیروی جانبی کاهش می‌یابد. به عبارت

- [22] J. Zamani, A. Darvize, M. Soleimani, A. Refahi, Experimental analysis of in-plane densification of circular thin-walled structures, in *The first International Conference of Society of Manufacturing Engineering of Iran*, Tehran, Iran, 2005. (In Persian)
- [23] E. Mahdi, A. M. S. Hamouda, Energy absorption capability of composite hexagonal ring systems, *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 201–210, 2012.
- [24] 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, pp. 399–412, 2008.
- [25] A. Niknejad, H. Assae, S. A. Elahi, A. Golriz, Flattening process of empty and polyurethane foam-filled E-glass/vinylester composite tubes – An experimental study, *Composite Structures*, Vol. 100, pp. 479–492, 2013.
- [26] R. Ghajar, A. Rassaf, Effect of impactor shape and temperature on the behavior of E-glass/epoxy composite laminates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 1-8, 2014 (In Persian).
- [27] 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).
- [14] A. Niknejad, S. A. Elahi, Gh. H. Liaghat, Experimental investigation on the lateral compression in the foam-filled circular tubes, *Materials and Design*, Vol. 36, pp. 24–34, 2012.
- [15] S. R. Ried, T.Y. Reddy, Effect of strain hardening on the lateral compression of tubes between rigid plates, *International Journal of Solid Structures*, Vol. 14, pp. 213–25, 1978.
- [16] N. K. Gupta, G. S. Sekhon, P. K. Gupta, Study of lateral compression of round metallic tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 43, pp. 895–922, 2005.
- [17] D. J. Celentano, J. L. Chaboche, Experimental and numerical characterization of damage evolution in steels, *International Journal of Plasticity*, Vol. 23, pp. 1739–62, 2007.
- [18] A. Zuraida, A. A. Khalid, A. F. Ismail, Performance of hybrid filament wound composite tubes subjected to quasi static indentation, *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 71–7, 2007.
- [19] Z. Fan, J. Shen, G. Lu, Investigation of lateral crushing of sandwich tubes, *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 442–449, 2011.
- [20] 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, pp. 449–464, 2013.
- [21] S.A. Karamanos, C. Eleftheriadis, Collapse of pressurized elast o plastic tubular members under lateral loads, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, pp. 35–56, 2004.