

Experimental and Numerical Investigation of the Effects of the Number of Longitudinal Weld Lines and Cross-Sectional Shape on the Crushing Behavior and Energy-Absorption Indices of Thin-Walled Aluminum Sections under Quasi-Static Axial Compression

Shobeir Zangeneh, Mohammad Reza Habibi* 

Department of Civil Engineering, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: August 04, 2026

Revised: September 16, 2026

Accepted: September 28, 2026

ePublished: October 22, 2026

ABSTRACT

Thin-walled aluminum sections are widely used as energy absorbers because of their low weight and ability to dissipate energy through plastic deformation. This study experimentally and numerically investigated the effects of cross-sectional shape and the number of longitudinal weld lines on the axial crushing behavior of thin-walled aluminum sections. Square specimens measuring 35×35 mm and rectangular specimens measuring 55×35 mm, all with a wall thickness of 2 mm and a height of 100 mm, were tested in unwelded, two-line welded, and four-line welded configurations. Quasi-static axial compression tests were performed at a loading rate of 400 mm/min. In the numerical analysis, the welding-induced temperature field and residual stresses were simulated in ABAQUS and then transferred to the crushing model. The results showed that longitudinal weld lines changed the initiation and propagation of folds and reduced the initial peak force. The numerical initial peak forces of the unwelded square and rectangular specimens were 45 and 43 kN, respectively. These values decreased to 37 and 40 kN for the two-line welded specimens and to 36 and 38 kN for the four-line welded specimens. The four-line welded rectangular specimen also exhibited the highest residual-stress level. The agreement between the experimental and numerical force-displacement responses and crushing modes confirmed the capability of the model to predict the overall behavior of the specimens. Overall, cross-sectional geometry and weld-line number influenced the initial peak force and axial crushing response.

Keywords: Thin-Walled Aluminum Sections; Axial Crushing; Energy Absorption; Longitudinal Welding; Residual Stress.

How to cite this article

Zangeneh S, Habibi M R, Experimental and Numerical Investigation of the Effects of the Number of Longitudinal Weld Lines and Cross-Sectional Shape on the Crushing Behavior and Energy-Absorption Indices of Thin-Walled Aluminum Sections under Quasi-Static Axial Compression. Modares Mechanical Engineering; 2027;27(02): 153-167.

*Corresponding author's email: m.r.habibi@iau.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-7559-4788



Copyright© 2027, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بررسی تجربی و عددی اثر تعداد خطوط جوش طولی و شکل مقطع بر رفتار مچالگی و شاخص‌های جذب انرژی مقاطع آلومینیومی جدارنازک تحت بارگذاری فشاری محوری شبه‌استاتیکی

شیرزنگنه، محمد رضا حبیبی*

گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده

مقاطع آلومینیومی جدارنازک به دلیل وزن کم و توانایی مناسب در جذب انرژی، در سامانه‌های ایمنی و جاذب‌های ضربه کاربرد گسترده‌ای دارند. در این پژوهش، اثر شکل مقطع و تعداد خطوط جوش طولی بر رفتار مچالگی این مقاطع به صورت تجربی و عددی بررسی شد. نمونه‌های مربعی با ابعاد ۳۵ در ۳۵ میلی‌متر و نمونه‌های مستطیلی با ابعاد ۵۵ در ۳۵ میلی‌متر، با ضخامت ۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر، در سه وضعیت بدون جوش، دوطرف جوش و چهارطرف جوش تحت فشار محوری شبه‌استاتیکی با سرعت ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند. در بخش عددی، ابتدا فرآیند حرارتی جوشکاری و تنش‌های پسماند در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی و سپس میدان تنش حاصل به مدل مچالگی منتقل شد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد خطوط جوش موجب تغییر محل آغاز و نحوه گسترش چین‌خوردگی‌ها و کاهش نیروی بیشینه اولیه می‌شود. نیروی بیشینه اولیه عددی در نمونه‌های مربعی و مستطیلی بدون جوش به ترتیب ۴۵ و ۴۳ کیلونیوتن بود و در حالت دوطرف جوش به ۳۷ و ۴۰ کیلونیوتن و در حالت چهارطرف جوش به ۳۶ و ۳۸ کیلونیوتن کاهش یافت. همچنین، نمونه مستطیلی چهارطرف جوش تنش پسماند بیشتری نشان داد. تطابق مناسب روند منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی و مودهای مچالگی تجربی و عددی نیز بیانگر توانایی مدل در پیش‌بینی رفتار کلی نمونه‌ها بود. در مجموع، شکل مقطع و تعداد خطوط جوش از عوامل مؤثر بر کنترل نیروی اولیه و رفتار مچالگی مقاطع آلومینیومی جدارنازک هستند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۳۰

کلیدواژه‌ها: مقاطع آلومینیومی جدارنازک، مچالگی محوری، جذب انرژی، جوشکاری طولی، تنش پسماند

نحوه ارجاع به این مقاله

زنگنه شبیر، حبیبی محمد رضا، بررسی تجربی و عددی اثر تعداد خطوط جوش طولی و شکل مقطع بر رفتار مچالگی و شاخص‌های جذب انرژی مقاطع آلومینیومی جدارنازک تحت بارگذاری فشاری محوری شبه‌استاتیکی، مهندسی مکانیک مدرس. ۱۶۷-۱۵۳:۱۴۰۵:۲۷(۰۲).

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.r.habibi@iau.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۷۵۵۹-۴۷۸۸-۰۰۰۱-۰۰۰۰



۱- مقدمه

سازه‌های جاذب انرژی از اجزای مهم سامانه‌های ایمنی به شمار می‌روند و وظیفه اصلی آن‌ها کاهش اثرات ناشی از برخورد، ضربه یا بارگذاری‌های شدید از طریق تبدیل انرژی جنبشی به انرژی تغییرشکل است. در جاذب‌های فداشونده، این فرایند عمدتاً با ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک دائمی انجام می‌شود و به این ترتیب، مقدار نیروی منتقل شده به اجزای اصلی سازه، تجهیزات و سرنشینان کاهش می‌یابد. در میان انواع مختلف جاذب‌های انرژی، مقاطع فلزی جدارنازک به دلیل وزن و حجم کم، سهولت ساخت، هزینه نسبتاً پایین و قابلیت جذب مقدار قابل توجهی از انرژی، در صنایع خودروسازی، حمل‌ونقل ریلی، هوافضا، سازه‌های دریایی، تجهیزات محافظ و سامانه‌های ضربه‌گیر کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند [۱-۴]. بنابراین، شناخت عوامل مؤثر بر رفتار مچالگی این مقاطع و دستیابی به الگویی پایدار و کنترل شده از تغییرشکل، نقش مهمی در طراحی سازه‌های سبک و ایمن دارد.

در بارگذاری فشاری محوری، پاسخ مقاطع جدارنازک معمولاً با افزایش سریع نیرو تا رسیدن به بیشینه اولیه آغاز می‌شود. پس از شروع کمانش موضعی و تشکیل نخستین چین، مقدار نیرو کاهش می‌یابد و با گسترش چین‌خوردگی‌های پیش‌رونده، نوسان‌های متوالی در منحنی نیرو-جابجایی ظاهر می‌شود. در این فرایند، بخش عمده انرژی ورودی از طریق تشکیل لولاهای پلاستیک، خمش دیواره‌ها و تغییرشکل‌های غشایی در نواحی میان چین‌ها مستهلک می‌شود. در مراحل پایانی، با فشردشدن چین‌های ایجادشده و نزدیک شدن دیواره‌ها به حالت تراکم کامل، نیروی فشاری مجدداً افزایش می‌یابد [۱-۳]. مقدار نیروی بیشینه اولیه، نیروی متوسط مچالگی، طول مؤثر لهیدگی و شکل نهایی چین‌ها به عواملی مانند هندسه مقطع، نسبت ابعاد به ضخامت، ارتفاع نمونه، خواص مکانیکی و سخت‌شوندگی کرنشی ماده، شرایط انتهایی و نرخ بارگذاری وابسته است [۲، ۵]. ازاین‌رو، هر عاملی که محل آغاز چین‌خوردگی یا روند گسترش آن را تغییر دهد، می‌تواند پاسخ فشاری و عملکرد جذب انرژی مقطع را به‌طور محسوسی تحت تأثیر قرار دهد.

در کنار خواص مکانیکی ماده، هندسه سطح مقطع یکی از عوامل تعیین‌کننده در رفتار مچالگی سازه‌های جدارنازک است؛ زیرا شکل و نسبت ابعاد مقطع بر توزیع سختی دیواره‌ها، محل تشکیل لولاهای پلاستیک، طول موج چین‌خوردگی‌ها و پایداری فرایند فروریزش اثر می‌گذارد. مقاطع مربعی و مستطیلی به دلیل سهولت ساخت و اتصال، استفاده مناسب از فضای موجود و قابلیت ایجاد تغییرشکل پلاستیک گسترده، از متداول‌ترین مقاطع مورد استفاده در جاذب‌های انرژی هستند [۴، ۵]. بااین‌حال، تفاوت نسبت طول به عرض در این دو نوع مقطع موجب تغییر سختی نسبی دیواره‌ها و نحوه توزیع تنش شده و ممکن است به ایجاد مدهای متفاوت مچالگی منجر شود. از سوی دیگر، آلیاژهای آلومینیوم به دلیل

چگالی کم، نسبت مناسب استحکام به وزن، مقاومت مطلوب در برابر خوردگی و شکل‌پذیری مناسب، گزینه‌ای مطلوب برای ساخت جاذب‌های انرژی سبک محسوب می‌شوند [۱۲]. بنابراین، بررسی رفتار مقاطع آلومینیومی مربعی و مستطیلی در شرایط یکسان از نظر ضخامت و ارتفاع، می‌تواند شناخت دقیق‌تری از اثر شکل مقطع بر پاسخ مچالگی فراهم کند.

پژوهش‌های متعددی با هدف کنترل فرایند لهیدگی، کاهش نیروی بیشینه اولیه و افزایش ظرفیت جذب انرژی مقاطع جدارنازک انجام شده است. علوی‌نیا و همکاران اثر ایجاد ترک و ناپیوستگی هندسی را بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی لوله‌های جدارنازک به‌صورت تجربی بررسی کردند و نشان دادند که وجود ناپیوستگی می‌تواند محل شروع مچالگی و پاسخ نیرو-جابجایی را تغییر دهد [۶]. جیائو و همکاران با ایجاد الگوهای هرمی روی دیواره لوله‌های مربعی، امکان کنترل آغاز و گسترش چین‌خوردگی‌ها را مطالعه کردند [۷]. صالح‌غفاری و همکاران نیز استفاده از سخت‌کننده‌های خارجی را برای بهبود عملکرد لهیدگی مقاطع جدارنازک مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار دادند [۸]. میرمحمدصادقی و همکاران رفتار محوری لوله‌های شیاردار را به روش آزمایشگاهی و اجزای محدود بررسی کرده و اثر فاصله و آرایش شیارها را بر مود فروریزش و نمودار نیرو-جابجایی گزارش کردند [۹]. همچنین، الیاسی و همکاران با ارائه مقاطع دارای سوراخ‌ها و ناپیوستگی‌های کنترل شده، تأثیر نوع ماده و آرایش هندسی دیواره را بر پاسخ مچالگی محوری ارزیابی کردند [۱۰، ۱۱]. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که تغییرات هندسی، شیارها، سوراخ‌ها، سخت‌کننده‌ها و آغازگرهای مچالگی می‌توانند برای کنترل نیروی اولیه و هدایت فرایند چین‌خوردگی به کار گرفته شوند.

با وجود مطالعات گسترده درباره اثر هندسه و خواص ماده بر رفتار مچالگی، بسیاری از مقاطع جدارنازک در کاربردهای واقعی از طریق اتصال ورق‌ها یا اجزای جداگانه و با استفاده از جوشکاری ساخته می‌شوند. در فرایند جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ، حرارت متمرکز ناشی از قوس الکتریکی موجب ذوب موضعی فلز پایه و ایجاد اتصال در امتداد خط جوش می‌شود [۱۳، ۱۵]. ورود و خروج موضعی حرارت و سردشدن غیریکنواخت قطعه سبب ایجاد گرادیان‌های دمایی، تغییرات موضعی خواص مکانیکی، اعوجاج و تنش‌های پسماند در ناحیه جوش و اطراف آن می‌شود. شدت و گستره این آثار به پارامترهایی مانند جریان و ولتاژ جوشکاری، سرعت حرکت منبع حرارتی، نوع گاز محافظ، ترتیب اجرای خطوط جوش و تعداد پاس‌ها وابسته است [۱۳-۱۵]. در یک مقطع جدارنازک، این تغییرات حرارتی و مکانیکی ممکن است سختی موضعی دیواره، محل شروع کمانش و نحوه گسترش چین‌ها را تغییر دهد؛ در نتیجه، رفتار یک مقطع جوش‌شده الزاماً مشابه مقطعی یکپارچه و بدون جوش با ابعاد و جنس یکسان نخواهد بود.

جوشکاری، توزیع حرارت و تنش‌های پسماند حاصل از آن شبیه‌سازی شده است؛ سپس میدان تنش پسماند به مدل مچالگی منتقل و پاسخ عددی نمونه‌ها تحت فشار محوری تعیین شده است. در نهایت، نتایج آزمایشگاهی و عددی از نظر نحوه تغییرشکل، نیروی اولیه و روند نمودارهای نیرو-جابجایی مقایسه شده‌اند تا تأثیر شکل مقطع و افزایش تعداد خطوط جوش بر رفتار فشاری مقاطع آلومینیومی مشخص شود. نوآوری اصلی این پژوهش، بررسی توأمان اثر هندسه مقطع و تعداد خطوط جوش طولی با لحاظ کردن میدان حرارتی و تنش پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری در تحلیل عددی مچالگی است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، اثر هندسه مقطع و تعداد خطوط جوش طولی بر رفتار مچالگی مقاطع آلومینیومی جدارنازک با استفاده از دو رویکرد آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. برنامه آزمایشگاهی شامل آماده‌سازی مقاطع مربعی و مستطیلی، ایجاد خطوط جوش طولی در آرایش‌های مختلف و انجام آزمایش فشار محوری بود. نمونه‌ها از نظر وضعیت ساخت در سه گروه بدون جوش، دارای دو خط جوش و دارای چهار خط جوش طبقه‌بندی شدند. در تمام گروه‌ها، ضخامت دیواره و ارتفاع نمونه ثابت در نظر گرفته شد تا تغییرات مشاهده‌شده در پاسخ فشاری عمدتاً به شکل سطح مقطع و تعداد خطوط جوش مربوط باشد.

پس از ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش فشار محوری انجام و تغییرات نیروی فشاری برحسب جابه‌جایی ثبت شد. همچنین، روند تشکیل و گسترش چین‌خوردگی‌ها در مراحل مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. در بخش عددی، نمونه‌های متناظر در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شدند. برای نمونه‌های جوش‌شده، ابتدا اثر حرارتی فرآیند جوشکاری و تنش‌های پسماند ناشی از آن بررسی و سپس پاسخ مچالگی نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری شبیه‌سازی شد. در نهایت، نتایج تجربی و عددی از نظر شکل تغییرشکل و نمودارهای نیرو-جابجایی با یکدیگر مقایسه شدند. مراحل اصلی روش تحقیق شامل مشخصات و ساخت نمونه‌ها، اجرای فرآیند جوشکاری، انجام آزمایش فشار محوری، ایجاد مدل عددی و مقایسه نتایج بود. این روند مطابق روش آزمایشگاهی و عددی ارائه‌شده در این مطالعه تنظیم شده است.

۲-۱- مشخصات هندسی و نحوه ساخت نمونه‌ها

برای بررسی اثر شکل سطح مقطع و تعداد خطوط جوش طولی، از مقاطع توخالی جدارنازک آلومینیومی با دو هندسه مربعی و مستطیلی استفاده شد. مقطع مربعی دارای ابعاد خارجی ۲۵×۲۵ میلی‌متر و مقطع مستطیلی دارای ابعاد خارجی ۵۵×۳۵ میلی‌متر بود. ضخامت اسمی دیواره در هر دو نوع مقطع برابر با ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. اگرچه در مرحله اولیه آماده‌سازی، مقاطع با

مطالعات جدیدتر نیز ضرورت بازنمایی میدان تنش پسماند در سازه‌های جدارنازک جوش‌شده را نشان داده‌اند. Xu و همکاران [۱۶] روشی مبتنی بر کرنش ویژه و اندازه‌گیری نمونه کوچک برای ارزیابی تنش پسماند در سازه‌های جدارنازک بزرگ ارائه کردند. Ghaderi Dehkordi و همکاران [۱۷] توزیع و بازآرایی تنش پسماند را در پوسته‌های استوانه‌ای آلومینیومی جوش‌شده به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. Lu و همکاران [۱۸] نشان دادند که مدل حرارتی-الاستوپلاستیک می‌تواند میدان تنش پسماند اتصالات آلومینیومی جدارنازک را با نتایج آزمایشگاهی بازتولید کند. Darvazi و Khoshroyan [۱۹] نیز اثر جریان، سرعت و توالی جوشکاری را بر تنش پسماند و اعوجاج اتصال آلومینیومی AA6061-T6 کمی‌سازی کردند. با این حال، تمرکز این مطالعات عمدتاً بر پیش‌بینی تنش پسماند، اعوجاج یا پیامدهای خستگی بوده است و پیوند مستقیم میان تعداد خطوط جوش طولی، میدان تنش پسماند حاصل و شاخص‌های مچالگی محوری مقاطع مربعی و مستطیلی هنوز به طور محدود بررسی شده است. پژوهش حاضر این خلأ را با انتقال میدان حرارتی-مکانیکی جوشکاری به تحلیل صریح مچالگی و مقایسه هم‌زمان نتایج تجربی و عددی دنبال می‌کند.

بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های پیشین بر بهینه‌سازی هندسه، ایجاد شیار و سوراخ، استفاده از سخت‌کننده یا تغییر جنس مقاطع متمرکز بوده است، درحالی‌که اثر هم‌زمان شکل مقطع، تعداد خطوط جوش طولی و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری بر پاسخ مچالگی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بررسی این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که افزایش تعداد خطوط جوش، علاوه بر تغییر وضعیت اتصال دیواره‌ها، می‌تواند توزیع حرارت و میدان تنش پسماند را نیز تغییر دهد. این میدان تنش اولیه پیش از اعمال بار فشاری در مقطع وجود دارد و ممکن است مقاومت اولیه، محل تشکیل نخستین چین و روند فروریزش نمونه را تحت تأثیر قرار دهد. از این رو، ارزیابی رفتار مقاطع جوش‌شده تنها بر مبنای هندسه نهایی آن‌ها کافی نیست و برای تفسیر مناسب پاسخ مچالگی باید آثار حرارتی و مکانیکی ناشی از فرآیند جوشکاری نیز در نظر گرفته شود.

در پژوهش حاضر، اثر جوشکاری طولی بر رفتار مچالگی و جذب انرژی مقاطع آلومینیومی جدارنازک به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. بدین منظور، دو هندسه مربعی با ابعاد ۳۵×۳۵ میلی‌متر و مستطیلی با ابعاد ۵۵×۳۵ میلی‌متر، هر دو با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر، در سه وضعیت بدون جوش، دارای دو خط جوش طولی و دارای چهار خط جوش طولی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری محوری قرار گرفته و رفتار آن‌ها با استفاده از منحنی‌های نیرو-جابجایی و الگوهای ایجادشده در مراحل مختلف مچالگی ارزیابی شده است. همچنین، مدل‌های عددی در نرم‌افزار ABAQUS توسعه یافته و فرآیند

جدول ۱ مشخصات هندسی و وضعیت جوشکاری نمونه‌ها.

Table 1 Geometric specifications and welding conditions of the specimens.

Specimen code	Cross-sectional shape	External dimensions (mm)	Wall thickness (mm)	Height (mm)	Welding condition
S-U	Square	35 × 35	2	100	Unwelded
S-2W	Square	35 × 35	2	100	Two longitudinal weld lines
S-4W	Square	35 × 35	2	100	Four longitudinal weld lines
R-U	Rectangular	55 × 35	2	100	Unwelded
R-2W	Rectangular	55 × 35	2	100	Two longitudinal weld lines
R-4W	Rectangular	55 × 35	2	100	Four longitudinal weld lines

پیوستگی خطوط جوش و آماده‌بودن سطوح انتهایی برای قرارگیری بین صفحات دستگاه فشار بررسی شدند. سپس هر نمونه به‌گونه‌ای روی صفحه پایینی دستگاه قرار گرفت که محور طولی آن با جهت اعمال نیروی فشاری هم‌راستا باشد. این آماده‌سازی برای کاهش بارگذاری خارج از مرکز و فراهم‌کردن شرایط یکسان در مقایسه نمونه‌های مختلف انجام شد.

۲-۲- فرآیند و آرایش جوشکاری نمونه‌ها

به‌منظور بررسی اثر جوشکاری طولی بر پاسخ فشاری و رفتار مچالگی مقاطع جدارنازک، نمونه‌های مربعی و مستطیلی با استفاده از فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ، موسوم به TIG یا GTAW، آماده شدند. در این فرآیند، قوس الکتریکی میان الکترود تنگستن غیرمصرفی و قطعه کار تشکیل شده و حرارت متمرکز ایجادشده موجب ذوب موضعی ناحیه اتصال می‌شود. هم‌زمان، یک گاز خنثی از الکترود، حوضچه مذاب و ناحیه جوش در برابر تماس با هوای محیط محافظت می‌کند. تمرکز مناسب قوس، امکان کنترل ورودی حرارت و قابلیت جوشکاری فلزات غیرآهنی، این روش را برای اتصال مقاطع آلومینیومی جدارنازک مناسب ساخته است [۱۳-۱۵].

در این مطالعه، برای کاهش نوسانات ناشی از حرکت دستی مشعل و ایجاد شرایط نسبتاً مشابه در امتداد خطوط جوش، از یک دستگاه جوشکاری اتوماتیک استفاده شد. این دستگاه به‌گونه‌ای طراحی شده بود که حرکت مشعل در امتداد محور طولی نمونه با مسیر مشخص انجام شود. نمونه در محل تعیین‌شده ثابت شده و مشعل جوشکاری در راستای ارتفاع آن حرکت می‌کرد؛ در نتیجه، خط جوش به‌صورت پیوسته و طولی در تمام ارتفاع نمونه ایجاد می‌شد. استفاده از سامانه خودکار سبب شد جهت حرکت مشعل، مسیر خط جوش و طول جوش در نمونه‌های هم‌گروه تا حد امکان یکسان باقی بماند. دستگاه جوشکاری اتوماتیک مورد استفاده و نحوه قرارگیری نمونه در آن در شکل ۱ نشان داده می‌شود.

ارتفاع‌های مختلف برش داده شدند، نمونه‌های مورد بررسی در این مقاله همگی دارای ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر بودند تا امکان مقایسه مستقیم رفتار فشاری آن‌ها فراهم شود.

مواد اولیه مورد استفاده شامل مقاطع آلومینیومی توخالی و ورق آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر بود. مقاطع اولیه با استفاده از دستگاه برش به قطعاتی با طول مورد نظر تقسیم شدند. در هنگام برش، تلاش شد سطوح انتهایی نمونه‌ها تا حد امکان صاف، موازی و عمود بر محور طولی باشند؛ زیرا هرگونه ناهمواری یا عدم توازی سطوح انتهایی می‌تواند موجب اعمال نامتقارن بار، تمرکز تنش موضعی و آغاز زود هنگام مچالگی از یکی از گوشه‌ها شود. تصاویر دستگاه برش و نمونه‌های آماده‌شده پس از برش در بخش بعدی ارائه شده‌اند. به‌منظور بررسی اثر جوشکاری، نمونه‌های مربعی و مستطیلی در سه وضعیت مختلف آماده شدند. گروه اول شامل نمونه‌های بدون جوش بود که به‌عنوان نمونه شاهد برای تعیین رفتار پایه مقاطع مورد استفاده قرار گرفت. گروه دوم شامل نمونه‌های دارای دو خط جوش طولی در دو وجه مقابل یکدیگر بود. در گروه سوم، چهار خط جوش طولی در امتداد چهار وجه یا لبه طولی نمونه ایجاد شد. به این ترتیب، برای هر یک از دو هندسه مربعی و مستطیلی، سه وضعیت ساخت بررسی شد و در مجموع شش گروه نمونه در برنامه آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت.

برای ایجاد یکنواختی نسبی در اجرای خطوط جوش، عملیات جوشکاری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جوشکاری اتوماتیک ساخته‌شده برای این پژوهش انجام شد. این دستگاه امکان حرکت کنترل‌شده منبع حرارتی در امتداد طول نمونه را فراهم می‌کرد و به کاهش تغییرات ناشی از جوشکاری دستی کمک می‌کرد. خطوط جوش در راستای محور طولی نمونه و در تمام ارتفاع مؤثر آن اجرا شدند. استفاده از جوشکاری خودکار موجب شد مسیر حرکت منبع حرارتی و نحوه اجرای خطوط جوش در نمونه‌های مختلف تا حد امکان مشابه باشد. دستگاه جوشکاری اتوماتیک و مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها در بخش‌های بعدی تشریح خواهند شد. نمونه‌های بدون جوش برای مشخص‌کردن اثر هندسه مقطع بر پاسخ مچالگی مورد استفاده قرار گرفتند، درحالی‌که مقایسه نمونه‌های دوطرف جوش و چهارطرف جوش با نمونه شاهد، امکان ارزیابی اثر تعداد خطوط جوش را فراهم کرد. ثابت نگه‌داشتن جنس، ضخامت دیواره و ارتفاع نمونه‌ها باعث شد اثر متغیرهای اصلی پژوهش، یعنی شکل مقطع و وضعیت جوشکاری، با دخالت کمتر سایر عوامل بررسی شود. مشخصات گروه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

نمونه‌های مربعی و مستطیلی بدون جوش و دارای دو و چهار خط جوش، مبنای آزمایش‌های فشار و شبیه‌سازی‌های عددی پژوهش بوده‌اند. پس از برش و جوشکاری، نمونه‌ها از نظر وضعیت ظاهری،



شکل ۱ دستگاه جوشکاری اتوماتیک مورد استفاده برای ایجاد خطوط جوش طولی در نمونه‌های آلومینیومی.

Fig. 1 Automatic welding apparatus used to produce longitudinal weld lines in the aluminum specimens.

خطوط جوش در راستای محور طولی نمونه‌ها و در تمام ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متری آن‌ها اجرا شدند. تعداد خطوط جوش به‌عنوان یکی از متغیرهای اصلی مطالعه در نظر گرفته شد. در آرایش دوطرف جوش، دو خط جوش طولی در دو سمت مقابل مقطع ایجاد شد؛ به‌گونه‌ای که توزیع خطوط جوش نسبت به مرکز مقطع تا حد امکان متقارن باشد. در آرایش چهارطرف جوش، چهار خط جوش طولی در چهار سمت پیرامونی مقطع اجرا شد. این آرایش برای هر دو هندسه مربعی و مستطیلی مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های بدون جوش نیز به‌عنوان حالت مرجع در نظر گرفته شدند تا اثر ایجاد خطوط جوش بر پاسخ نیرو-جابجایی و نحوه مچالگی مشخص شود. طول هر خط جوش، با توجه به اجرای آن در سراسر ارتفاع نمونه، برابر با ارتفاع مقطع در نظر گرفته شد:

$$L_w = h \quad (2)$$

که در آن، L_w طول یک خط جوش و h ارتفاع نمونه است. با توجه به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متری نمونه‌ها، طول هر خط جوش برابر با ۱۰۰ میلی‌متر بود. طول کل جوش ایجادشده روی هر نمونه نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L_{tot} = n_w L_w \quad (3)$$

که در آن، L_{tot} مجموع طول خطوط جوش روی هر نمونه، n_w تعداد خطوط جوش و L_w طول هر خط جوش است. بنابراین، مجموع طول خطوط جوش در نمونه‌های دوطرف جوش برابر با ۲۰۰ میلی‌متر و در نمونه‌های چهارطرف جوش برابر با ۴۰۰ میلی‌متر بود. مشخصات آرایش خطوط جوش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ پارامترهای فرآیند جوشکاری و ورودی حرارت اسمی

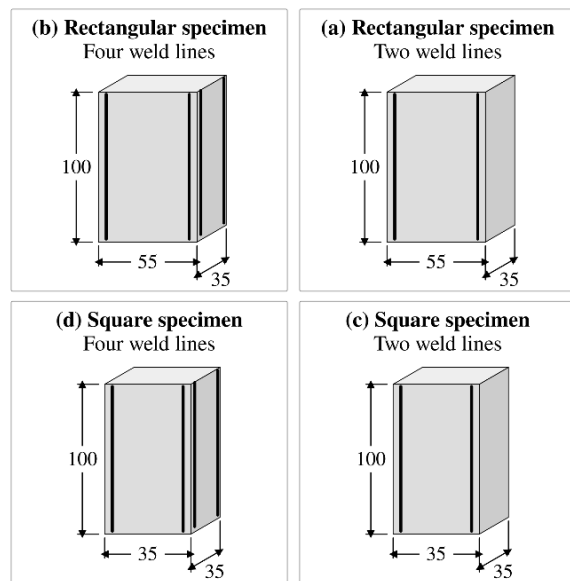
Table 2 Welding-process parameters and nominal heat input.

Parameter	Value
Welding process	GTAW (TIG)
Welding current	75 A
Arc voltage	13 V
Travel speed	3.0 mm/s
Thermal efficiency	0.70
Linear heat input	227.5 J/mm
Shielding gas	Ar (99.999%), 12 L/min
Electrode	2% lanthanated W, 2.4 mm
Current and polarity	AC, 100 Hz, 70% EN
Filler metal	None (autogenous weld)
Interpass temperature	< 50 °C
Pass sequence	Alternating opposite sides
Total weld length, 2W	200 mm
Nominal heat, 2W	45.5 kJ
Total weld length, 4W	400 mm
Nominal heat, 4W	91.0 kJ

یکی از پارامترهای مؤثر بر کیفیت اتصال و میزان تغییرات حرارتی ایجادشده در مقطع، ورودی حرارت جوشکاری است. ورودی حرارت خطی، تابعی از شدت جریان، ولتاژ قوس، سرعت حرکت مشعل و بازده حرارتی فرآیند است و به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۱۳-۱۵]:

$$H = \frac{\eta VI}{v} \quad (1)$$

که در آن، H ورودی حرارت خطی برحسب ژول بر میلی‌متر، η بازده حرارتی فرآیند جوشکاری، V ولتاژ قوس برحسب ولت، I شدت جریان جوشکاری برحسب آمپر و v سرعت حرکت مشعل برحسب میلی‌متر بر ثانیه است. براساس رابطه ۱، افزایش شدت جریان یا ولتاژ موجب افزایش ورودی حرارت می‌شود، درحالی‌که افزایش سرعت حرکت مشعل، مقدار حرارت واردشده به واحد طول خط جوش را کاهش می‌دهد. از آنجاکه افزایش تعداد خطوط جوش سبب تکرار چرخه گرم و سرد شدن در قسمت‌های بیشتری از مقطع می‌شود، آرایش دوخط و چهارخط جوش می‌تواند میدان دما و تنش پسماند متفاوتی در نمونه ایجاد کند. عملیات جوشکاری با جریان ۷۵ آمپر، ولتاژ قوس ۱۳ ولت و سرعت حرکت ثابت ۳/۰ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. بازده حرارتی فرآیند TIG برابر ۰/۷۰ در نظر گرفته شد. گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد و دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه و الکتروود تنگستن لانتان‌دار ۲ درصد با قطر ۲/۴ میلی‌متر به کار رفت. منبع تغذیه از نوع جریان متناوب با فرکانس ۱۰۰ هرتز و بالانس ۷۰ درصد الکتروود منفی بود و جوشکاری به‌صورت ذوبی و بدون فلز پرکننده انجام شد. بر این اساس، ورودی حرارت خطی هر خط جوش از رابطه $H = \eta VI / v$ برابر ۲۲۷/۵ ژول بر میلی‌متر محاسبه شد. چون پارامترهای هر پاس ثابت نگه داشته شدند، ورودی حرارت خطی در آرایش‌های دوطرف و چهارطرف برابر بود؛ اما افزایش طول کل جوش از ۲۰۰ به ۴۰۰ میلی‌متر، انرژی حرارتی اسمی واردشده به هر نمونه را از ۴۵۵۰۰ به ۹۱۰۰۰ ژول افزایش داد.



Black lines: longitudinal weld-line locations
All dimensions in mm; schematic view

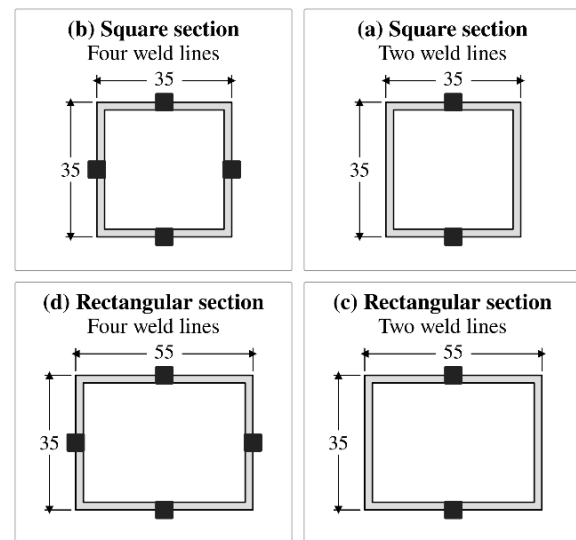
شکل ۳ نمونه‌های آلومینیومی جوش‌شده پیش از آزمایش فشاری: (الف) نمونه مستطیلی دوطرف جوش، (ب) نمونه مستطیلی چهارطرف جوش، (ج) نمونه مربعی دوطرف جوش و (د) نمونه مربعی چهارطرف جوش.

Fig. 3. Welded aluminum specimens before compression testing: (a) two-line-welded rectangular specimen, (b) four-line-welded rectangular specimen, (c) two-line-welded square specimen, and (d) four-line-welded square specimen.

ثابت‌بودن ارتفاع، ضخامت دیواره و جهت خطوط جوش، امکان مقایسه مستقیم نمونه‌های بدون جوش، دوطرف جوش و چهارطرف جوش را فراهم کرد. دستگاه جوشکاری اتوماتیک، وجود سه وضعیت ساخت و بررسی نمونه‌های مربعی و مستطیلی از اجزای اصلی برنامه تجربی این مطالعه بودند.

۲-۳- آزمایش فشار محوری شبه‌استاتیکی

به‌منظور ارزیابی رفتار مچالگی و پاسخ فشاری نمونه‌های آلومینیومی جدارنازک، آزمایش فشار محوری شبه‌استاتیکی با استفاده از دستگاه آزمون مکانیکی SANTAM انجام شد. این دستگاه از دو صفحه فشاری بالا و پایین تشکیل شده است که نمونه در فاصله میان آن‌ها قرار می‌گیرد و نیروی فشاری از طریق حرکت کنترل‌شده صفحه دستگاه در راستای محور طولی نمونه اعمال می‌شود. در جریان آزمایش، نیروی فشاری و جابه‌جایی محوری به‌صورت هم‌زمان ثبت شدند و منحنی نیرو-جابه‌جایی هر نمونه به‌عنوان پاسخ اصلی آزمایش استخراج شد. پیش از آغاز هر آزمایش، سطوح انتهایی نمونه بررسی و نمونه در مرکز صفحه پایینی دستگاه قرار داده شد. محور طولی نمونه تا حد امکان با جهت حرکت صفحه فشاری منطبق شد تا از ایجاد بارگذاری خارج از مرکز و مچالگی زود هنگام ناشی از نامتقارن بودن شرایط بارگذاری جلوگیری شود. سپس صفحه بالایی دستگاه به آرامی به سطح فوقانی نمونه نزدیک شد و پس از برقراری تماس اولیه، فرآیند



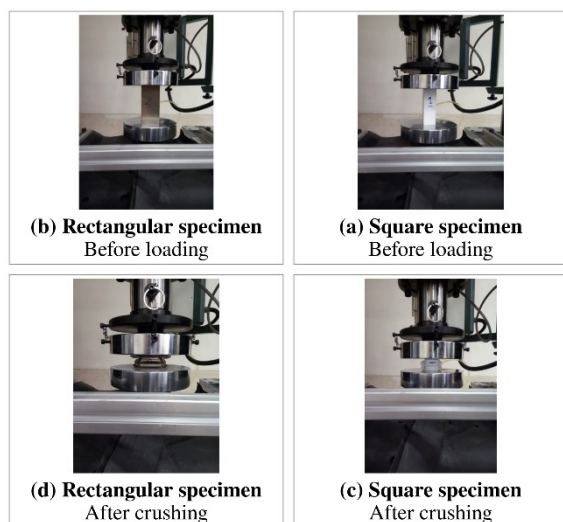
■ Longitudinal weld-line location
Dimensions in mm; wall thickness: 2 mm

شکل ۲ نمای شماتیک آرایش خطوط جوش طولی در نمونه‌های مورد بررسی: (الف) مقطع مربعی دوطرف جوش، (ب) مقطع مربعی چهارطرف جوش، (ج) مقطع مستطیلی دوطرف جوش و (د) مقطع مستطیلی چهارطرف جوش.

Fig. 2 Schematic layouts of the longitudinal weld lines in the investigated specimens: (a) two-line-welded square section, (b) four-line-welded square section, (c) two-line-welded rectangular section, and (d) four-line-welded rectangular section.

در اجرای جوشکاری، نمونه‌ها به‌گونه‌ای در دستگاه قرار گرفتند که محور طولی آن‌ها با جهت حرکت مشعل منطبق باشد. این نحوه استقرار از انحراف محسوس مسیر جوش جلوگیری کرده و امکان ایجاد خط جوش پیوسته در امتداد ارتفاع نمونه را فراهم کرد. در نمونه‌های دوطرف جوش، عملیات جوشکاری روی دو سمت مقابل انجام شد. در نمونه‌های چهارطرف جوش نیز همین فرآیند برای چهار سمت نمونه تکرار شد. پس از تکمیل عملیات جوشکاری، نمونه‌ها از نظر پیوستگی ظاهری خطوط جوش و آماده‌بودن برای انجام آزمایش فشاری بررسی شدند. افزایش تعداد خطوط جوش از دو به چهار خط، علاوه بر افزایش طول کل ناحیه جوش‌شده، موجب گسترش نواحی تحت تأثیر چرخه‌های حرارتی در پیرامون مقطع می‌شود. در اثر گرم و سرد شدن موضعی، انقباض و انقباض غیریکنواخت در دیواره‌های جدارنازک ایجاد می‌شود که می‌تواند به شکل‌گیری تنش‌های پسماند و تغییر سختی موضعی منجر شود. بنابراین، تفاوت میان نمونه‌های بدون جوش، دوطرف جوش و چهارطرف جوش صرفاً به وجود اتصال محدود نیست، بلکه تاریخچه حرارتی و میدان تنش اولیه متفاوتی نیز در آن‌ها ایجاد می‌شود. اثر این میدان‌های حرارتی و تنش‌های پسماند در بخش مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در مجموع، آرایش جوشکاری به‌گونه‌ای انتخاب شد که تأثیر افزایش تعداد خطوط جوش، در هر یک از دو هندسه مربعی و مستطیلی، تحت شرایط هندسی یکسان ارزیابی شود.



شکل ۴ نحوه استقرار نمونه‌های آلومینیومی جدارنازک بین صفحات دستگاه SANTAM در آزمایش فشار محوری: (الف) نمونه مربعی پیش از بارگذاری، (ب) نمونه مستطیلی پیش از بارگذاری، (ج) نمونه مربعی پس از مچالگی و (د) نمونه مستطیلی پس از مچالگی.

Fig. 4 Placement of the thin-walled aluminum specimens between the platens of the SANTAM testing machine during axial compression: (a) square specimen before loading, (b) rectangular specimen before loading, (c) square specimen after crushing, and (d) rectangular specimen after crushing.

از ایجاد نخستین چین، مقدار نیرو کاهش یافت و با ادامه حرکت صفحه دستگاه، چین‌های بعدی به صورت متوالی در امتداد ارتفاع نمونه ایجاد شدند. تشکیل هر چین جدید با تغییر در سختی لحظه‌ای نمونه همراه بود و در نتیجه، افت و خیزهای متوالی در منحنی نیرو-جابه‌جایی مشاهده شد. رفتار مچالگی نمونه‌ها تنها بر اساس شکل نهایی آن‌ها ارزیابی نشد، بلکه مراحل مختلف تشکیل و گسترش چین‌خوردگی‌ها نیز مورد توجه قرار گرفت. در نمونه‌های بدون جوش، مچالگی عمدتاً تحت تأثیر هندسه مقطع، ضخامت دیواره و وضعیت سطوح انتهایی قرار داشت. در نمونه‌های جوش‌شده، علاوه بر عوامل هندسی، محل خطوط جوش و میدان تنش پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری نیز می‌توانستند محل آغاز کماتش و میزان تقارن یا نامتقارن بودن مچالگی را تحت تأثیر قرار دهند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در برخی نمونه‌های جوش‌شده، مچالگی اولیه در نزدیکی لبه فوقانی ایجاد شده و با ادامه بارگذاری، تغییر شکل به قسمت‌های میانی و پایینی نمونه گسترش یافته است.

در طول هر آزمایش، مقدار نیروی فشاری متناظر با جابه‌جایی صفحه دستگاه ثبت و برای هر نمونه یک منحنی نیرو-جابه‌جایی تهیه شد. این منحنی‌ها امکان بررسی نیروی بیشینه اولیه، افت نیرو پس از شروع مچالگی، نوسان‌های ناشی از تشکیل چین‌های متوالی و افزایش نیروی مرحله تراکم را فراهم کردند. همچنین، مساحت زیر منحنی نیرو-جابه‌جایی مبنای ارزیابی میزان انرژی جذب‌شده در فرآیند تغییر شکل پلاستیک است که روابط مربوط به

جدول ۳ شرایط انجام آزمایش فشار محوری شبه‌استاتیکی.

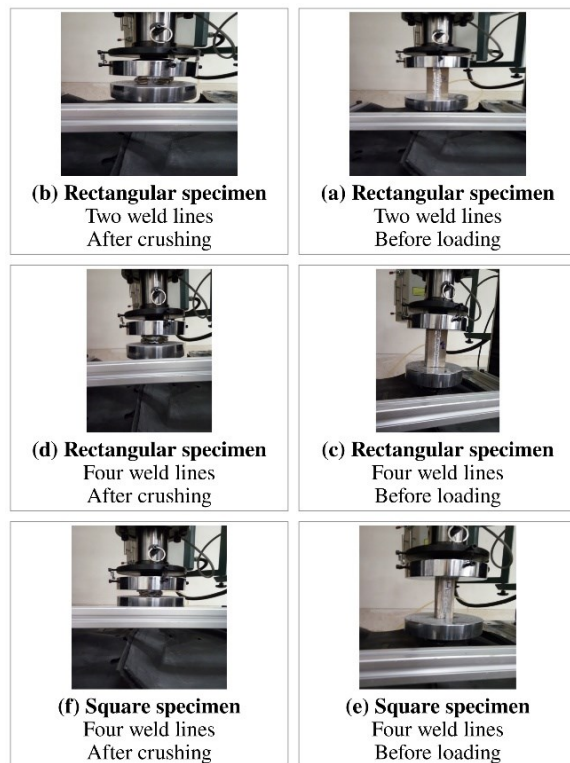
Table 3 Quasi-static axial compression test conditions.

Test parameter	Value or description
Testing machine	SANTAM compression testing machine
Loading type	Quasi-static axial compression
Loading direction	Parallel to the longitudinal axis of the specimen
Loading rate	400 mm/min
Initial specimen height	100 mm
Specimen wall thickness	2 mm
Square specimen dimensions	35 × 35 mm
Rectangular specimen dimensions	55 × 35 mm
Specimen configurations	Unwelded, two-line welded, and four-line welded
Number of investigated groups	6 groups
Recorded outputs	Compressive force, axial displacement, and crushing mode
Primary response evaluated	Force-displacement curve

بارگذاری آغاز گردید. در تمام آزمایش‌ها، نمونه‌ها به صورت قائم و بین دو سطح صلب و موازی قرار گرفتند تا بار فشاری به طور مستقیم در راستای محور طولی مقطع اعمال شود. آزمایش‌ها با سرعت ثابت ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شدند. این سرعت در تمام گروه‌های نمونه ثابت نگه داشته شد تا امکان مقایسه مستقیم پاسخ نمونه‌های مربعی و مستطیلی در وضعیت‌های بدون جوش، دوطرف جوش و چهارطرف جوش فراهم شود. ارتفاع اولیه تمامی نمونه‌ها برابر با ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره آن‌ها برابر با ۲ میلی‌متر بود. نمونه‌های مربعی دارای ابعاد خارجی ۳۵ در ۳۵ میلی‌متر و نمونه‌های مستطیلی دارای ابعاد خارجی ۵۵ در ۳۵ میلی‌متر بودند. شرایط اصلی آزمایش فشار در جدول ۳ ارائه شده است. برای هر یک از شش پیکربندی، یک نمونه مستقل آزمایش شد ($n=1$). بنابراین، مقادیر تجربی گزارش‌شده مشاهده‌های منفرد هستند و محاسبه انحراف معیار یا انجام استنباط آماری بین گروه‌ها امکان‌پذیر نبود. این محدودیت در تفسیر تفاوت‌ها لحاظ شد.

آزمایش برای شش گروه نمونه شامل مقطع مربعی بدون جوش، مربعی دوطرف جوش، مربعی چهارطرف جوش، مستطیلی بدون جوش، مستطیلی دوطرف جوش و مستطیلی چهارطرف جوش انجام شد. اعمال شرایط یکسان بارگذاری به همه نمونه‌ها موجب شد اثر دو متغیر اصلی پژوهش، یعنی شکل سطح مقطع و تعداد خطوط جوش طولی، بر پاسخ فشاری با دخالت حداقلی سایر عوامل مقایسه شود. در نمونه‌های بدون جوش، نتایج آزمایش بیانگر رفتار پایه هر هندسه بود؛ درحالی‌که مقایسه این نمونه‌ها با نمونه‌های دوطرف و چهارطرف جوش، امکان بررسی اثر جوشکاری طولی بر نیروی اولیه، روند تشکیل چین‌ها و شکل منحنی نیرو-جابه‌جایی را فراهم کرد.

با آغاز حرکت صفحه فشاری، نیروی وارد بر نمونه ابتدا افزایش یافت و نمونه وارد مرحله تغییر شکل الاستیک و سپس تسلیم موضعی شد. با رسیدن نیرو به بیشینه اولیه، اولین ناحیه کماتش موضعی در یکی از دیواره‌ها یا نزدیکی لبه نمونه تشکیل شد. پس



شکل ۵ مراحل مچالگی محوری نمونه‌های جوش‌شده در آزمایش فشار: (الف) نمونه مستطیلی دوطرف جوش پیش از بارگذاری؛ (ب) نمونه مستطیلی دوطرف جوش پس از مچالگی؛ (ج) نمونه مستطیلی چهارطرف جوش پیش از بارگذاری؛ (د) نمونه مستطیلی چهارطرف جوش پس از مچالگی؛ (ه) نمونه مربعی چهارطرف جوش پیش از بارگذاری؛ (و) نمونه مربعی چهارطرف جوش پس از مچالگی.

Fig. 5 Stages of axial crushing of the welded specimens during compression testing: (a) two-line-welded rectangular specimen before loading, (b) two-line-welded rectangular specimen after crushing, (c) four-line-welded rectangular specimen before loading, (d) four-line-welded rectangular specimen after crushing, (e) four-line-welded square specimen before loading, and (f) four-line-welded square specimen after crushing.

تعریف شد تا امکان بازتولید تسلیم، تشکیل لولاهای پلاستیک و گسترش چین‌خوردگی‌ها فراهم شود. خطوط جوش نیز متناسب با آرایش واقعی نمونه‌ها در امتداد طول مدل قرار گرفتند. در مدل‌های دوطرف جوش، دو خط جوش در دو سمت مقابل مقطع و در مدل‌های چهارطرف جوش، چهار خط جوش در اطراف مقطع تعریف شد. در مدل‌های بدون جوش، هندسه به‌صورت یکپارچه و بدون اعمال مرحله حرارتی مورد تحلیل قرار گرفت.

پس از تعریف هندسه و خواص ماده، مدل‌ها شبکه‌بندی شدند. تماس میان سطوح انتهایی نمونه و صفحات صلب و همچنین تماس دیواره‌های نمونه با یکدیگر در طول فرآیند مچالگی در نظر گرفته شد. صفحه پایینی در تمام درجات آزادی مقید شد و صفحه بالایی تنها در راستای محور طولی نمونه حرکت داده شد. این نحوه اعمال شرایط مرزی، وضعیت قرارگیری نمونه میان صفحات دستگاه آزمایش فشار را بازتولید می‌کند.

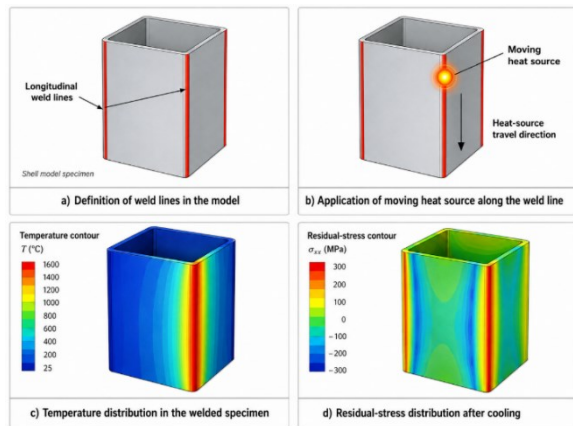
آن در زیربخش شاخص‌های ارزیابی پاسخ مچالگی ارائه خواهد شد. برای کاهش اثر شرایط اولیه بر نتایج، تمامی نمونه‌ها با جهت قرارگیری مشابه و تحت سرعت بارگذاری یکسان آزمایش شدند. مقایسه نتایج نیز به‌صورت هم‌گروه انجام شد؛ به این معنا که ابتدا نمونه‌های دارای هندسه یکسان و تعداد خطوط جوش متفاوت با یکدیگر مقایسه شدند و سپس اثر شکل مقطع در وضعیت جوشکاری مشابه مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب، پاسخ نمونه مربعی بدون جوش با نمونه‌های مربعی دوطرف و چهارطرف جوش و پاسخ نمونه مستطیلی بدون جوش با نمونه‌های مستطیلی دوطرف و چهارطرف جوش مقایسه شد. همچنین، نمونه‌های مربعی و مستطیلی در هریک از وضعیت‌های بدون جوش، دوطرف جوش و چهارطرف جوش در برابر یکدیگر قرار گرفتند. منحنی‌های حاصل از آزمایش فشار در بخش نتایج برای تحلیل کمی و کیفی رفتار نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر مقدار نیروی اولیه، شکل کلی منحنی، تعداد و دامنه نوسان‌ها، محل آغاز افت نیرو و نحوه افزایش نیرو در مراحل پایانی مچالگی بررسی می‌شود. تصاویر نمونه‌های تغییرشکل‌یافته نیز برای شناسایی مود مچالگی و مقایسه آن با الگوهای حاصل از شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. نتایج ثبت‌شده نشان می‌دهند که بارگذاری با سرعت ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه موجب مچالگی محوری نمونه‌ها و ایجاد منحنی‌های مشخص نیرو-جابجایی برای هر شش گروه شده است.

۴-۲- مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس

به‌منظور شبیه‌سازی رفتار مچالگی نمونه‌ها و بررسی اثر تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، مدل‌های عددی در محیط ABAQUS/CAE ایجاد شدند. شش مدل متناظر با نمونه‌های آزمایشگاهی شامل مقاطع مربعی و مستطیلی در حالت‌های بدون جوش، دوطرف جوش و چهارطرف جوش مورد بررسی قرار گرفتند. ابعاد هندسی مدل‌ها، ضخامت دیواره و ارتفاع آن‌ها مطابق مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی تعریف شد. برای نمونه‌های جوش‌شده، تحلیل عددی در دو مرحله انجام گرفت؛ ابتدا فرآیند حرارتی جوشکاری و تنش‌های پسماند حاصل از آن شبیه‌سازی شد و سپس میدان تنش باقی‌مانده به مدل مچالگی انتقال یافت.

۴-۲-۱- هندسه، خواص ماده و شرایط تماس

مدل‌های مربعی با ابعاد خارجی ۳۵ در ۳۵ میلی‌متر و مدل‌های مستطیلی با ابعاد خارجی ۵۵ در ۳۵ میلی‌متر ساخته شدند. ضخامت دیواره در تمامی مدل‌ها برابر با ۲ میلی‌متر و ارتفاع نمونه‌ها برابر با ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مقطع آلومینیومی به‌عنوان جسم تغییرشکل‌پذیر مدل شد و صفحات اعمال بار در بالا و پایین نمونه به‌صورت سطوح صلب تعریف شدند. رفتار مکانیکی آلومینیوم با در نظر گرفتن بخش الاستیک و تغییرشکل پلاستیک



شکل ۷ روند تحلیل عددی نمونه‌های جوش شده: الف) تعریف خطوط جوش، ب) اعمال حرارت در امتداد خطوط جوش، ج) توزیع دما پس از جوشکاری و د) میدان تنش پسماند پس از سرد شدن.

Fig. 7 Numerical analysis procedure for the welded specimens: (a) definition of the weld lines, (b) application of heat along the weld lines, (c) temperature distribution after welding, and (d) residual stress field after cooling.

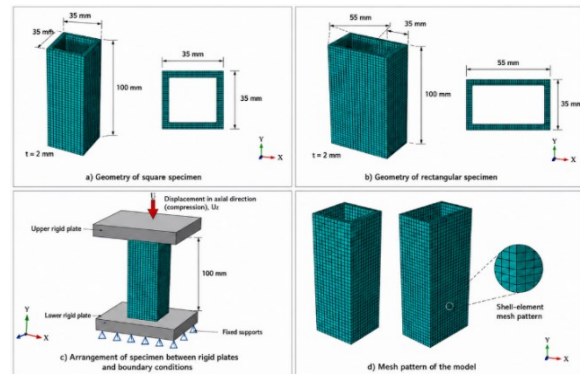
مقابل و در مدل چهارطرف جوش با ترتیب متقارن ۱-۳-۲-۴ اجرا شدند؛ پیش از پاس بعدی، نمونه تا دمای کمتر از ۵۰ درجه سلسیوس سرد شد.

۲-۴-۳- شبیه‌سازی مچالگی محوری

تحلیل مچالگی با استفاده از حل‌گر ABAQUS/Explicit انجام شد. این حل‌گر برای مسائل دارای تغییرشکل‌های بزرگ، تماس‌های متعدد و رفتار غیرخطی شدید مناسب است؛ زیرا پاسخ مدل را با استفاده از روش انتگرال‌گیری صریح در طول زمان محاسبه می‌کند. معادله تعادل دینامیکی مورد استفاده در روش صریح به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{F}_{ext} - \mathbf{F}_{int} \quad (5)$$

که در آن، $\mathbf{M}$ ماتریس جرم، $\ddot{\mathbf{u}}$ بردار شتاب گره‌ای، $\mathbf{F}_{ext}$ بردار نیروهای خارجی و $\mathbf{F}_{int}$ بردار نیروهای داخلی مدل است. در آغاز تحلیل مچالگی، میدان تنش پسماند حاصل از شبیه‌سازی جوشکاری به نمونه‌های جوش شده انتقال داده شد. سپس صفحه بالایی در راستای محور طولی به سمت پایین حرکت کرد و نمونه میان دو صفحه صلب فشرده شد. در طول تحلیل، نیروی عکس‌العمل صفحه و جابه‌جایی محوری ثبت شد تا منحنی نیرو-جابه‌جایی عددی استخراج شود. همچنین، شکل تغییرشکل نمونه در حالت اولیه، ۰.۲۵ و ۰.۵ باره تحلیل و انتهای فرآیند ذخیره شد تا روند تشکیل و گسترش چین‌خوردگی‌ها بررسی شود. همین مراحل برای هر شش مدل انجام گرفت.



شکل ۶ مدل اجزای محدود مورد استفاده برای شبیه‌سازی فشار محوری: الف) هندسه نمونه مربعی، ب) هندسه نمونه مستطیلی، ج) نحوه قرارگیری نمونه میان صفحات صلب و د) نمای شبکه‌بندی مدل.

Fig. 6 Finite element model used for the axial compression simulation: (a) square specimen geometry, (b) rectangular specimen geometry, (c) specimen placement between the rigid platens, and (d) mesh of the model.

۲-۴-۲- شبیه‌سازی حرارتی جوشکاری و تنش پسماند

برای نمونه‌های جوش شده، ابتدا تحلیل انتقال حرارت گذرا انجام شد. در این مرحله، ورود حرارت در امتداد خطوط جوش شبیه‌سازی و تغییرات دما در دیواره‌های نمونه محاسبه شد. معادله حاکم بر انتقال حرارت در جسم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (4)$$

که در آن، ρ چگالی ماده، c گرمای ویژه، T دما، t زمان، k ضریب هدایت حرارتی و Q نرخ تولید یا ورود حرارت حجمی است. در نمونه‌های دوطرف جوش، منبع حرارتی در امتداد دو خط جوش و در نمونه‌های چهارطرف جوش در امتداد چهار خط جوش اعمال شد. پس از پایان ورود حرارت، مرحله سرد شدن نمونه در نظر گرفته شد. انبساط موضعی در هنگام گرم شدن و انقباض غیریکنواخت در مرحله سرد شدن موجب ایجاد میدان تنش پسماند در دیواره‌های نمونه شد. توزیع تنش پسماند برای هر سطح نمونه استخراج شد و در ادامه به عنوان وضعیت اولیه مدل مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. بررسی‌های عددی این پژوهش شامل تحلیل حرارتی و استخراج تنش‌های پسماند برای نمونه‌های مربعی و مستطیلی دوطرف و چهارطرف جوش بوده است. در دامنه ماده، جمله تولید حرارت حجمی Q برابر صفر بود و گرمای جوشکاری از طریق شرط مرزی شار حرارتی سطحی متحرک اعمال شد. شار گاوسی به صورت منبع و $r_0=3$ mm شعاع مؤثر منبع است. با $I=75$ A و $V=13$ V و $\eta=0.70$ توان مؤثر منبع $W=682.5$ بود و مرکز آن با سرعت ۳/۰ میلی‌متر بر ثانیه در امتداد خط جوش حرکت کرد. انتگرال شار روی سطح با توان مؤثر منبع و ورودی حرارت خطی ۲۲۷/۵ ژول بر میلی‌متر سازگار بود. در مدل دوطرف جوش، پاس‌ها روی دو ضلع

افت محسوس نیرو و تشکیل نخستین چین‌خوردگی است و از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$F_{max} = \max(F(\delta)) \quad (6)$$

که در آن، F_{max} نیروی بیشینه اولیه و $F(\delta)$ نیروی فشاری متناظر با جابه‌جایی δ است. این شاخص بیانگر بیشترین نیروی منتقل شده در آغاز فرآیند مچالگی است. انرژی جذب شده تا جابه‌جایی مشخص δ_f ، برابر با مساحت زیر منحنی نیرو-جابه‌جایی است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$EA = \int_0^{\delta_f} F(\delta) d\delta \quad (7)$$

که در آن، EA انرژی جذب شده، $F(\delta)$ نیروی فشاری و δ_f جابه‌جایی نهایی مورد بررسی است. مقدار بیشتر مساحت زیر منحنی نشان‌دهنده اتلاف انرژی بیشتر از طریق تغییر شکل پلاستیک نمونه است. نیروی متوسط مچالگی از تقسیم انرژی جذب شده بر جابه‌جایی مؤثر مچالگی به دست می‌آید:

$$F_m = \frac{EA}{\delta_f} \quad (8)$$

که در آن، F_m نیروی متوسط مچالگی است. این شاخص برای مقایسه توان نمونه‌ها در حفظ مقاومت فشاری طی فرآیند لهیدگی استفاده می‌شود. انرژی جذب شده ویژه از تقسیم انرژی جذب شده بر جرم اولیه نمونه محاسبه می‌شود: $SEA = EA/m$ ، که در آن m جرم اولیه نمونه است. برای مقایسه همسان همه پیکربندی‌ها، شاخص‌ها در بازه جابه‌جایی ۰ تا ۵۰ میلی‌متر محاسبه شدند. انرژی جذب شده از انتگرال عددی منحنی نیرو-جابه‌جایی با قاعده دوزنقه‌ای به دست آمد. جرم نظری نمونه‌ها بر اساس سطح مقطع خالص، ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد و برای مقاطع مربعی و مستطیلی به ترتیب ۰/۰۷۱۳ و ۰/۰۹۲۹ کیلوگرم بود. برای بررسی میزان تطابق مدل عددی با آزمایش، درصد اختلاف پارامترهای اصلی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Error(\%) = \frac{|X_{num} - X_{exp}|}{X_{exp}} \times 100 \quad (9)$$

که در آن، X_{num} مقدار حاصل از شبیه‌سازی عددی و X_{exp} مقدار متناظر حاصل از آزمایش است. این رابطه برای مقایسه نیروی بیشینه اولیه و سایر مقادیر قابل استخراج از منحنی نیرو-جابه‌جایی قابل استفاده است. علاوه بر مقایسه کمی، مود تغییر شکل نمونه‌ها نیز به صورت کیفی بررسی شد. در این ارزیابی، محل تشکیل نخستین چین، نحوه گسترش چین‌خوردگی‌ها، تقارن یا نامتقارن بودن مچالگی و شکل نهایی نمونه عددی با نمونه آزمایشگاهی مقایسه شد. برای نمونه‌های جوش شده، محل تمرکز تنش پسماند نیز با ناحیه شروع تغییر شکل و افت نیروی اولیه تطبیق داده شد. بر این اساس، اعتبار مدل عددی تنها بر مبنای یک مقدار عددی ارزیابی نشد، بلکه تطابق منحنی نیرو-جابه‌جایی، مقدار نیروی بیشینه و شکل مچالگی به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به این معیارها در بخش بعدی ارائه و تحلیل می‌شوند.

جدول ۴ خلاصه مراحل مدل‌سازی عددی.

Table 4 Summary of the numerical modeling stages.

Analysis stage	Models investigated	Solution method	Main input	Main output
Geometry creation	All specimens	ABAQUS/CAE	Specimen dimensions, wall thickness, and height	Geometry and finite element mesh
Thermal analysis	Two-line- and four-line-welded specimens	Transient heat transfer analysis	Weld lines and heat input	Temperature field
Residual stress analysis	Two-line- and four-line-welded specimens	Thermomechanical analysis	Temperature history and cooling	Residual stress field
Crushing analysis	All specimens	ABAQUS/Explicit	Platen displacement and contact conditions	Force-displacement response and crushing mode
Comparison with experiments	All specimens	Results post-processing	Experimental and numerical data	Assessment of agreement between the results

مدل‌سازی عددی به گونه‌ای انجام شد که شرایط هندسی و بارگذاری آزمایش تا حد امکان بازتولید شود. نتایج عددی شامل الگوی مچالگی، منحنی نیرو-جابه‌جایی، توزیع دما و تنش پسماند بود که در ادامه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و تحلیل می‌شوند. دیواره نمونه‌ها با المان پوسته‌ای چهارگره‌ای S4R و اندازه اسمی ۲/۵ میلی‌متر شبکه‌بندی شد. این اندازه به ایجاد حدود ۲۲۴۰ و ۲۸۸۰ المان به ترتیب در نمونه‌های مربعی و مستطیلی منجر شد. صفحات بارگذاری به صورت صلب گسسته با المان R3D4 مدل شدند. تماس نمونه با صفحات و خودتماس دیواره‌ها با الگوریتم General Contact در ABAQUS/Explicit تعریف شد؛ رفتار نرمال از نوع Hard contact با امکان جدایش و رفتار مماسی بر پایه روش Penalty با ضریب اصطکاک ۰/۲۰ بود. آلیاژ مورد استفاده AA6061-T6 با چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته ۶۸/۹ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳۳، تنش تسلیم ۲۷۶ مگاپاسکال و استحکام نهایی ۳۱۰ مگاپاسکال در دمای محیط بود. در تحلیل حرارتی از المان DS4 استفاده و تغییرات مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، ضریب هدایت، گرمای ویژه و ضریب انبساط حرارتی با دما مطابق جدول جدید به مدل اختصاص داده شد.

۲-۵- معیارهای ارزیابی و روش مقایسه نتایج

برای ارزیابی رفتار مچالگی نمونه‌ها، منحنی نیرو-جابه‌جایی، مقدار نیروی بیشینه اولیه، انرژی جذب شده، نیروی متوسط مچالگی و شکل نهایی تغییر شکل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، در نمونه‌های جوش شده، توزیع دما و تنش پسماند حاصل از تحلیل عددی برای تفسیر تغییرات پاسخ فشاری استفاده شد. مقایسه نتایج تجربی و عددی نیز بر اساس تطابق منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی، مقدار نیروی بیشینه و شباهت مود مچالگی انجام گرفت. نیروی بیشینه اولیه، بیشترین نیروی ثبت شده پیش از آغاز

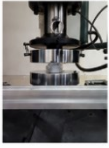
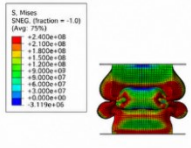
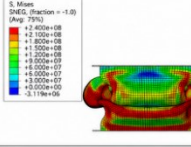
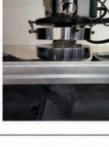
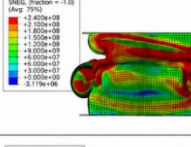
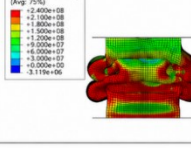
۳- نتایج و بحث

برای در این بخش، رفتار مچالگی نمونه‌های مربعی و مستطیلی در سه وضعیت بدون جوش، دوطرف جوش و چهارطرف جوش بررسی و نتایج حاصل از آزمایش فشار با پاسخ مدل‌های عددی مقایسه شده است. ارزیابی نتایج بر مبنای نحوه تشکیل چین‌خوردگی‌ها، منحنی‌های نیرو-جابجایی، نیروی بیشینه اولیه و توزیع تنش پسماند انجام شد. در بازه جابجایی ۰ تا ۵۰ میلی‌متر، بیشترین انرژی جذب‌شده در نمونه R-2W برابر ۱۴۲۰ ژول و بیشترین انرژی جذب‌شده ویژه در نمونه S-4W برابر ۱۸/۹۲ کیلوژول بر کیلوگرم مشاهده شد. در مقطع مربعی، افزودن دو و چهار خط جوش، EA، SEA و Fm را به ترتیب ۹/۵۲ و ۱۰/۶۶ درصد افزایش داد. در مقطع مستطیلی، دو خط جوش موجب افزایش ۱۳/۱۵ درصدی این شاخص‌ها شد. درحالی‌که چهار خط جوش آن‌ها را ۳۳/۵۵ درصد کاهش داد. بنابراین، آرایش دوخط جوش در مقطع مستطیلی مناسب‌ترین توازن را میان کاهش نیروی بیشینه اولیه و افزایش ظرفیت جذب انرژی ایجاد کرد؛ در مقابل، کاهش Fmax در نمونه R-4W با افت قابل‌توجه انرژی جذب‌شده همراه بود. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش نیروی بیشینه اولیه به‌تنهایی برای داوری درباره بهبود عملکرد کافی نیست و Fm، EA، Fmax و SEA باید هم‌زمان تفسیر شوند.

۳-۱- مود مچالگی و مقایسه نتایج تجربی و عددی

در نمونه‌های بدون جوش، با افزایش بار فشاری ابتدا کماتش موضعی در دیواره‌ها شکل گرفت و سپس چین‌خوردگی‌ها به‌صورت پیشرونده در امتداد ارتفاع نمونه گسترش یافتند. تشکیل هر چین موجب کاهش موقت مقاومت نمونه و ایجاد نوسان در منحنی نیرو-جابجایی شد. در مراحل پایانی نیز به دلیل تراکم چین‌های ایجادشده و تماس دیواره‌ها با یکدیگر، مقاومت فشاری مجدداً افزایش یافت.

در نمونه‌های جوش‌شده، محل شروع و نحوه گسترش مچالگی تحت تأثیر خطوط جوش قرار گرفت. در فریم‌های اولیه، تشکیل چین در نزدیکی لبه فوقانی مشاهده شد و با ادامه بارگذاری، تغییرشکل به قسمت‌های میانی و پایینی گسترش یافت. الگوی نهایی برخی نمونه‌ها نامتقارن بود که می‌توان آن را به برهم‌کنش تنش‌های پسماند ایجادشده در امتداد خطوط جوش و ناهمگنی موضعی سختی دیواره‌ها نسبت داد. مدل‌های عددی نیز روند تشکیل چین‌های متوالی و مچالگی تدریجی نمونه‌ها را به‌خوبی بازتولید کردند. تطابق قابل قبول میان شکل نهایی نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی نشان داد که شرایط تماس، بارگذاری و میدان تنش اولیه در مدل عددی توانسته‌اند رفتار کلی نمونه‌ها را شبیه‌سازی کنند. تطابق نسبی افت‌وخیز پیک‌های ثانویه در منحنی‌های عددی و تجربی نیز مؤید توانایی مدل در بازنمایی مراحل متوالی چین‌خوردگی است. به‌منظور ارزیابی توانایی مدل

	Experimental	Numerical
(a) Square unwelded		
(b) Rectangular unwelded		
(c) Rectangular two-side weld		
(d) Rectangular four-side weld		

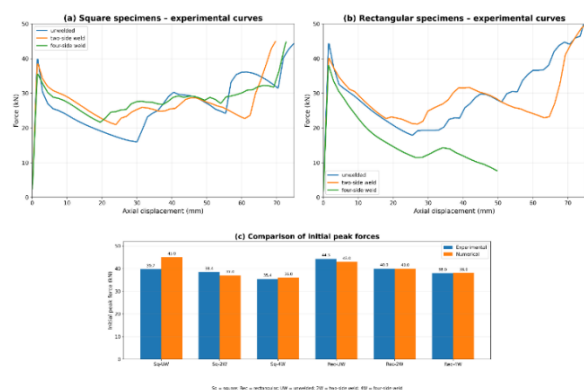
شکل ۸ مقایسه مود نهایی مچالگی مشاهده‌شده در آزمایش و پیش‌بینی‌شده در تحلیل عددی برای حالت‌های منتخب: (الف) نمونه مربعی بدون جوش، (ب) نمونه مستطیلی بدون جوش، (ج) نمونه مستطیلی دوطرف جوش و (د) نمونه مستطیلی چهارطرف جوش. در هر حالت، تصویر آزمایشگاهی در سمت چپ و نتیجه عددی متناظر در انتهای تحلیل در سمت راست ارائه شده است.

Fig. 8 Comparison of the final crushing modes observed experimentally and predicted numerically for selected cases: (a) unwelded square specimen, (b) unwelded rectangular specimen, (c) two-line-welded rectangular specimen, and (d) four-line-welded rectangular specimen. In each case, the experimental image is shown on the left and the corresponding numerical result at the end of the analysis is shown on the right.

عددی در بازتولید مود مچالگی، نتایج تجربی و عددی برای چهار حالت نماینده با یکدیگر مقایسه شدند. این حالت‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شدند که هم اثر شکل مقطع در نمونه‌های بدون جوش و هم اثر افزایش تعداد خطوط جوش در نمونه‌های مستطیلی بررسی شود. مطابق شکل ۸، مدل‌های عددی توانسته‌اند محل کلی تشکیل چین‌ها، نحوه گسترش مچالگی و شکل نهایی تغییرشکل نمونه‌ها را با تطابق قابل قبول بازتولید کنند. تفاوت‌های جزئی میان نتایج تجربی و عددی را می‌توان به ناهمگنی‌های ساخت، شرایط واقعی تماس، تغییرات موضعی خواص ماده و ساده‌سازی‌های اجتناب‌ناپذیر در مدل اجزای محدود نسبت داد.

۳-۲- پاسخ نیرو-جابجایی و اثر تعداد خطوط جوش

منحنی‌های نیرو-جابجایی نمونه‌ها دارای یک پیک اولیه و چند پیک ثانویه بودند. پیک اولیه با آغاز نخستین مچالگی مرتبط است و پیک‌های بعدی در اثر تشکیل متوالی چین‌ها ایجاد می‌شوند. پس از رسیدن نیرو به مقدار بیشینه، شروع کماتش موضعی باعث افت نیرو شد و سپس با تشکیل چین‌های بعدی، نوسان‌هایی در



شکل ۹ پاسخ نیرو-جابجایی تجربی و مقایسه نیروی بیشینه اولیه آزمایشگاهی و عددی: (الف) منحنی‌های تجربی نمونه‌های مربعی، (ب) منحنی‌های تجربی نمونه‌های مستطیلی و (ج) مقایسه نیروی بیشینه اولیه حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی عددی.

Fig. 9 Experimental force-displacement responses and comparison of the experimental and numerical initial peak forces: (a) experimental curves for the square specimens, (b) experimental curves for the rectangular specimens, and (c) comparison of the initial peak forces obtained from the experiments and numerical simulations.

در میان نمونه‌های بررسی‌شده، نمونه مستطیلی چهارطرف جوش دارای تنش پسماند بیشتری بود. وجود این تنش اولیه موجب کاهش مقاومت نمونه در آغاز بارگذاری فشاری و تسهیل شروع مچالگی شد. این نتیجه با کاهش نیروی بیشینه اولیه نمونه مستطیلی چهارطرف جوش نسبت به نمونه دوطرف جوش و نمونه بدون جوش هم‌هنگ است.

به‌طور کلی، نتایج نشان داد که جوشکاری طولی فقط نقش اتصال‌دهنده دیواره‌ها را ندارد، بلکه از طریق ایجاد میدان حرارتی و تنش پسماند، محل شروع چین‌خوردگی و سطح نیروی بیشینه اولیه را نیز تغییر می‌دهد. افزایش تعداد خطوط جوش، کاهش بیشتر پیک اولیه و تغییر محسوس‌تر مود مچالگی را در پی داشت. در عین حال، تطابق روند پاسخ‌های تجربی و عددی نشان داد که شبیه‌سازی حرارتی-مکانیکی و انتقال تنش پسماند به مدل مچالگی، روش مناسبی برای تحلیل رفتار مقاطع آلومینیومی جوش‌شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر شکل سطح مقطع و تعداد خطوط جوش طولی بر رفتار مچالگی محوری مقاطع آلومینیومی جدارنازک با استفاده از آزمایش فشار شبه‌استاتیکی و شبیه‌سازی عددی بررسی شد. نمونه‌های مربعی و مستطیلی در سه وضعیت بدون جوش، دوطرف جوش و چهارطرف جوش تحت شرایط بارگذاری یکسان قرار گرفتند. در مدل‌های عددی نمونه‌های جوش‌شده نیز میدان حرارتی و تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری محاسبه و پیش از تحلیل مچالگی به مدل مکانیکی منتقل شد. نتایج نشان داد که رفتار فشاری نمونه‌ها به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر هندسه مقطع، تعداد خطوط جوش و توزیع تنش‌های پسماند قرار دارد.

جدول ۵ نیروی بیشینه اولیه حاصل از شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها.

Table 5 Initial peak forces obtained from the numerical simulations.

Cross-sectional shape	Specimen condition	Initial peak force (kN)
Square	Unwelded	45
Square	Two-line welded	37
Square	Four-line welded	36
Rectangular	Unwelded	43
Rectangular	Two-line welded	40
Rectangular	Four-line welded	38

پاسخ مشاهده گردید. در نمونه مستطیلی، افزایش نیرو در مراحل پایانی بارگذاری به تراکم و انباشتگی دیواره‌ها، به‌ویژه در ضلع بزرگ‌تر مقطع، نسبت داده شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که ایجاد خطوط جوش طولی موجب کاهش پیک اولیه نسبت به نمونه‌های بدون جوش شده است. همچنین، نمونه‌های چهارطرف جوش در مقایسه با نمونه‌های دوطرف جوش پیک اولیه کمتری نشان دادند. در نمونه مستطیلی چهارطرف جوش، نیرو ابتدا تا حدود ۳۹ کیلو نیوتن افزایش یافت و پس از شروع مچالگی کاهش پیدا کرد. در نمونه مربعی دوطرف جوش نیز نیروی اولیه حدود ۴۰ کیلو نیوتن بود که پس از آغاز تغییر شکل تا حدود ۲۰ کیلو نیوتن افت کرد و سپس به دلیل تراکم دیواره‌ها و کارسختی ماده مجدداً افزایش یافت. در نتایج عددی نیز روند مشابهی مشاهده شد. مقادیر نیروی بیشینه اولیه برای نمونه‌های مربعی و مستطیلی بدون جوش به‌ترتیب حدود ۴۵ و ۴۳ کیلو نیوتن به دست آمد. با اعمال دو خط جوش، این مقدار در نمونه‌های مربعی و مستطیلی به‌ترتیب به ۳۷ و ۴۰ کیلو نیوتن کاهش یافت. در حالت چهارطرف جوش نیز نیروی بیشینه اولیه نمونه‌های مربعی و مستطیلی به‌ترتیب برابر با ۳۶ و ۳۸ کیلو نیوتن گزارش شد.

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که در هر دو هندسه، افزایش تعداد خطوط جوش با کاهش نیروی بیشینه اولیه همراه بوده است. کمترین پیک اولیه در نمونه مربعی چهارطرف جوش و بیشترین مقدار آن در نمونه مربعی بدون جوش مشاهده شد. کاهش پیک اولیه به معنای کاهش بیشترین نیروی انتقال‌یافته در شروع مچالگی است و در این مطالعه، همراه با تغییرات مشاهده‌شده در منحنی نیرو-جابجایی، به‌عنوان بهبود عملکرد نمونه در جذب و مستهلک کردن انرژی تفسیر شد. روند یکسان نتایج آزمایشگاهی و عددی نیز نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته توانسته است اثر تعداد خطوط جوش را به‌صورت مناسب پیش‌بینی کند.

۳-۳- اثر میدان حرارتی و تنش پسماند

تحلیل حرارتی نشان داد که اعمال خطوط جوش موجب ایجاد توزیع غیریکنواخت دما در دیواره‌های نمونه می‌شود. پس از سرد شدن، انقباض غیریکنواخت نواحی گرم‌شده، میدان تنش پسماند را در امتداد و اطراف خطوط جوش ایجاد کرد. با افزایش تعداد خطوط جوش از دو به چهار، بخش بیشتری از محیط مقطع تحت تأثیر چرخه حرارتی قرار گرفت و برهم‌کنش میدان‌های تنش در وجوه مختلف افزایش یافت.

مناسب هندسه مقطع و آرایش جوشکاری می‌تواند در طراحی جاذب‌های انرژی سبک با پاسخ فشاری کنترل شده مؤثر باشد. محدودیت بخش تجربی این پژوهش، انجام یک آزمون برای هر پیکربندی بود؛ از این رو، نتایج باید به عنوان روندهای مشاهده شده در نمونه‌های بررسی شده تفسیر شوند و نه برآورد آماری یک جامعه. انجام حداقل سه تکرار مستقل برای هر حالت و گزارش بازه اطمینان شاخص‌های مچالگی در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

تأییدیه اخلاقی

محتوای علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و پیش‌تر در هیچ نشریه ایرانی یا بین‌المللی منتشر نشده و هم‌زمان برای نشریه دیگری ارسال نشده است. این پژوهش شامل آزمودنی انسانی، حیوان آزمایشگاهی یا داده‌های شخصی حساس نبوده است؛ بنابراین اخذ کد کمیته اخلاق موضوعیت نداشته است.

تأمین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه گرنت مشخصی از آژانس‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

نقش و مسئولیت نویسندگان

شبیر زنگنه: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، آماده‌سازی و انجام آزمایش‌ها، مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی، تحلیل رسمی داده‌ها، مصورسازی نتایج و نگارش پیش‌نویس اولیه.

محمد رضا حبیبی: مفهوم‌سازی، توسعه روش‌شناسی، نظارت علمی، اعتبارسنجی نتایج، مدیریت پروژه و بازبینی و ویرایش مقاله.

هر دو نویسنده نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند هیچ‌گونه تعارض منافع مالی یا غیرمالی در ارتباط با این پژوهش، نگارش و انتشار مقاله ندارند.

منابع

- [1] W. Abramowicz, "Thin-walled structures as impact energy absorbers," *Thin-Walled Struct.*, vol. 41, no. 2-3, pp. 91-107, 2003, doi: 10.1016/S0263-8231(02)00082-4.
- [2] A. A. A. Alghamdi, "Collapsible impact energy absorbers: An overview," *Thin-Walled Struct.*, vol. 39, no. 2, pp. 189-213, 2001, doi: 10.1016/S0263-8231(00)00048-3.
- [3] G. Lu and T. X. Yu, *Energy Absorption of Structures and Materials*, 1st ed. Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing, 2003, doi: 10.1533/9781855738584.

در تمامی نمونه‌ها، پاسخ فشاری با افزایش سریع نیرو تا رسیدن به نیروی بیشینه اولیه آغاز شد. پس از شروع کمانش موضعی و تشکیل نخستین چین، مقدار نیرو کاهش یافت و با ادامه بارگذاری، چین‌خوردگی‌های متوالی در امتداد ارتفاع نمونه ایجاد شدند. تشکیل هر چین با افت و خیز در منحنی نیرو-جاب‌جایی همراه بود و در مراحل پایانی، تراکم چین‌ها و تماس دیواره‌ها موجب افزایش مجدد مقاومت فشاری شد. در نمونه‌های جوش شده، محل آغاز و نحوه گسترش مچالگی نسبت به نمونه‌های بدون جوش تغییر کرد و در برخی موارد الگوی نامتقارن‌تری مشاهده شد. این تغییر رفتار را می‌توان به ناهمگنی موضعی سختی دیواره‌ها و برهم‌کنش تنش‌های پسماند ایجاد شده در امتداد خطوط جوش نسبت داد.

نتایج عددی نشان داد که نیروی بیشینه اولیه نمونه‌های مربعی و مستطیلی بدون جوش به ترتیب حدود ۴۵ و ۴۳ کیلونیوتن بود. این مقدار در نمونه‌های مربعی و مستطیلی دوطرف جوش به ترتیب به حدود ۳۷ و ۴۰ کیلونیوتن و در نمونه‌های چهارطرف جوش به حدود ۳۶ و ۳۸ کیلونیوتن کاهش یافت. بنابراین، در هر دو هندسه، ایجاد خطوط جوش موجب کاهش نیروی بیشینه اولیه شد و افزایش تعداد خطوط جوش از دو به چهار خط، کاهش بیشتری در این شاخص ایجاد کرد. کمترین نیروی بیشینه اولیه در نمونه مربعی چهارطرف جوش مشاهده شد. این کاهش از دیدگاه محدود کردن بیشترین نیروی منتقل شده در آغاز مچالگی، ویژگی مطلوبی برای کاربردهای جاذب انرژی محسوب می‌شود.

مقایسه مقاطع مربعی و مستطیلی نشان داد که هندسه مقطع بر نحوه تشکیل چین‌ها و پاسخ نمونه پس از آغاز مچالگی اثرگذار است. در مقاطع مستطیلی، وجود ضلع بزرگ‌تر موجب تغییر در سختی نسبی دیواره‌ها و نحوه انباشتگی آن‌ها شد و افزایش نیروی انتهای بارگذاری را تحت تأثیر قرار داد. از سوی دیگر، تحلیل حرارتی-مکانیکی نشان داد که افزایش تعداد خطوط جوش، ناحیه بیشتری از محیط مقطع را در معرض چرخه گرم و سرد شدن قرار می‌دهد و موجب گسترش و برهم‌کنش میدان‌های تنش پسماند می‌شود. در میان نمونه‌های بررسی شده، نمونه مستطیلی چهارطرف جوش تنش پسماند بیشتری نشان داد که با کاهش مقاومت اولیه آن تحت بارگذاری فشاری هماهنگ بود.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که مدل اجزای محدود توانسته است روند کلی منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی، کاهش نیروی بیشینه اولیه در نمونه‌های جوش شده و نحوه تشکیل چین‌خوردگی‌های متوالی را با تطابق قابل قبول بازتولید کند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تعداد و آرایش خطوط جوش طولی می‌تواند به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر برای تنظیم رفتار مچالگی مقاطع آلومینیومی جدارنازک مورد استفاده قرار گیرد. افزایش تعداد خطوط جوش موجب کاهش نیروی اولیه و تغییر میدان تنش پسماند شد؛ از این رو، انتخاب

- [17] Y. Ghaderi Dehkordi, A. Pourkamali Anaraki, and A. R. Shahani, "Study of the effective parameters on welding residual stress relaxation in aluminum cylindrical shells under cyclic pressure," *Thin-Walled Structures*, vol. 143, 2019. doi: [10.1016/j.tws.2019.106235](https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106235).
- [18] Y. Lu, S. Zhu, Z. Zhao, T. Chen, and J. Zeng, "Numerical simulation of residual stresses in aluminum alloy welded joints," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 50, 2020. doi: [10.1016/j.jmapro.2019.12.056](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.056).
- [19] A. Khoshroyan and A. R. Darvazi, "Effects of welding parameters and welding sequence on residual stress and distortion in Al6061-T6 aluminum alloy for T-shaped welded joint," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 30, no. 1, pp. 76–89, 2020. doi: [10.1016/S1003-6326\(19\)65181-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65181-2).
- [4] A. G. Olabi, E. Morris, and M. S. J. Hashmi, "Metallic tube type energy absorbers: A synopsis," *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, no. 7–8, pp. 706–726, 2007, doi: [10.1016/j.tws.2007.05.003](https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.05.003).
- [5] K. Yamazaki and J. Han, "Maximization of the crushing energy absorption of tubes," *Struct. Optim.*, vol. 16, no. 1, pp. 37–46, 1998, doi: [10.1007/BF01213998](https://doi.org/10.1007/BF01213998).
- [6] E. A. Starke, Jr., "Aluminum alloys: Properties and applications," in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Oxford, U.K.: Elsevier, 2001, pp. 114–116, doi: [10.1016/B0-08-043152-6/00024-3](https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00024-3).
- [7] A. Alavi Nia, H. Badnava, and Kh. Fallah Nejad, "An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 6, pp. 3594–3607, 2011, doi: [10.1016/j.matdes.2011.02.029](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.029).
- [8] J. Ma, Y. Le, and Z. You, "Axial crushing tests of steel thin-walled square tubes with pyramid pattern," in *Proc. 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf.*, Orlando, FL, USA, 2010, paper AIAA 2010-2615, doi: [10.2514/6.2010-2615](https://doi.org/10.2514/6.2010-2615).
- [9] S. Salehghaffari, M. Rais-Rohani, and A. Najafi, "Analysis and optimization of externally stiffened crush tubes," *Thin-Walled Struct.*, vol. 49, no. 3, pp. 397–408, 2011, doi: [10.1016/j.tws.2010.11.010](https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.11.010).
- [10] S. E. Mirmohammadsadeghi, Kh. Khalili, S. Y. Ahmadi, and S. J. Hosseinipour, "Experimental and finite element simulation investigation of axial crushing of grooved thin-walled tubes," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 77, no. 9–12, pp. 1627–1643, 2015, doi: [10.1007/s00170-014-6502-3](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6502-3).
- [11] M. Elyasi, A. Moradpour, and S. Montazeri, "Axial crushing in a novel technique of thin-walled tube," *Key Eng. Mater.*, vols. 622–623, pp. 709–716, 2014, doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.709](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.709).
- [12] M. Elyasi, S. Montazeri, and A. Moradpour, "Investigating the effect of material type in the new design of thin-walled tubes under axial loading," *Adv. Mater. Process. Technol.*, vol. 1, no. 3–4, pp. 375–383, 2015, doi: [10.1080/2374068X.2015.1133759](https://doi.org/10.1080/2374068X.2015.1133759).
- [13] O. P. Khanna, *A Textbook of Welding Technology*. New Delhi, India: Dhanpat Rai Publications, 2005.
- [14] G. Mathers, *The Welding of Aluminium and Its Alloys*, 1st ed. Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing, 2002.
- [15] A. Kumar and S. Sundarrajan, "Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 aluminum alloy weldments," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 4, pp. 1288–1297, 2009, doi: [10.1016/j.matdes.2008.06.055](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.06.055).
- [16] Y. Xu, H. Liu, R. Bao, and X. Zhang, "Residual stress evaluation in welded large thin-walled structures based on eigenstrain analysis and small sample residual stress measurement," *Thin-Walled Structures*, vol. 131, pp. 782–791, 2018. doi: [10.1016/j.tws.2018.07.049](https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.049).