



ارائه پیکره‌بندی جدید پروفیل‌های کرکره‌ای حاصل از منحنی‌های دایره‌ای مماس بر یکدیگر جهت افزایش قابلیت جذب انرژی

مهدی محمدی نوری^۱ و مصطفی طالبی توتی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی قم

^۲ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی قم

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶

چکیده

سازه‌های جدار نازک به طور گسترده برای جذب انرژی در تصادفات جاده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله، طرح جدیدی از پروفیل‌های کرکره‌ای مبتنی بر منحنی حاصل از کمان‌های دایره‌ای مماس بر یکدیگر برای افزایش قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک ارائه شده است. با توجه به اینکه برای ارزیابی قابلیت ضربه‌پذیری از کد اجزاء محدود LS-Dyna استفاده شده است، به قصد صحت سنجی مدل‌سازی و روش حل، ابتدا نتایج با نتایج تجربی مقایسه شده است که حاکی از آن است، شبیه‌سازی به خوبی می‌تواند رفتار سازه را پیش‌بینی نماید. این پروفیل‌ها تحت بار شبه‌استاتیکی و در بارگذاری‌های محوری، جانبی و مایل بررسی شده و نتایج با نتایج حاصل از پروفیل‌های معمول مربعی، دایره‌ای و مربعی چند سلول مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، پروفیل‌های کرکره‌ای ارائه شده می‌توانند پارامترهای جذب انرژی ویژه را تا ۲۶٪ و راندمان نیروی ضربه‌ای را تا ۱۰٪ نسبت به پروفیل‌های معمول چند سلول افزایش دهند. از طرفی استفاده از صفحات متقاطع داخل پروفیل‌های کرکره‌ای از ایجاد مود تغییر شکل کلی جلوگیری می‌نماید. در بارگذاری جانبی مقدار جذب انرژی موثر حدوداً ۲۰٪ کمتر از پروفیل چند سلول معمول است، اما راندمان نیروی ضربه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است.

کلمات کلیدی: قابلیت جذب انرژی؛ قابلیت ضربه‌پذیری در تصادفات؛ پروفیل کرکره‌ای؛ سازه جدار نازک.

Introducing a New Corrugated Profile Generated from Tangential Circular Curves to Increase Energy Absorption

M. Mohammadi Noori¹, M. Talebitooti^{2*}

¹ MSc. Student, Mech. Eng., Qom Univ. of Technology, Qom, Iran.

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Qom Univ. of Technology, Qom, Iran.

Abstract

Thin-walled tubes are widely used to absorb energy in road accidents. In this paper, a novel circumferentially corrugated tubes with a tangential circular profile is studied. The LS-Dyna finite element code is used to evaluate the crashworthiness. In order to verify the models and the solution method, the results are compared with the experimental results. These studies show that the simulation correctly predicts the behavior of the structure. These profiles are investigated under quasi-static, axial, lateral and oblique loads. Then, the results are compared with the results of the conventional square, circular and cellular square tubes. The results indicate that the present profiles under simultaneous axial and lateral loads, compared with the conventional cellular square tubes, increase the specific energy absorption and the crush force efficiency parameter by 26% and 10%, respectively. In addition, the results show that use of cross blades inside the corrugated profiles prevents the creation of a general deformation mode. Under lateral loading, compared with the conventional cellular square tubes, the amount of specific energy absorption is about 20% less, but the crushing force efficiency is significantly higher.

Keywords: Energy Absorption Capability; Crashworthiness; Circumferentially Corrugated Tubes; Thin-Wall Structure.

۱- مقدمه

دنیای مدرن حاوی انواع مختلفی از وسایل نقلیه است، تعداد این وسایل نقلیه طی قرن اخیر به طور مداوم در حال افزایش است. از طرفی با پیشرفت فن‌آوری علاوه بر تعداد وسایل نقلیه، سرعت و جرم آنها هم افزایش داشته است و این موضوع به این معنی است که خودرو هزینه تمام شده بالا داشته و از طرفی آسیب وارد شده به سرنشینان و محیط، موضوع بسیار مهم و جدی خواهد بود. تصادفات وسایل نقلیه موتوری، یکی از مهمترین دلایل مرگ و میر و همچنین خسارت‌های اقتصادی است [۱].

معمول‌ترین نوع جاذب‌های انرژی که به طور گسترده برای جذب انرژی جنبشی و بهبود قابلیت‌های ضربه‌پذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد، سازه‌های جدار نازک^۱ هستند. فاکتورهای اصلی که قابلیت‌های جذب انرژی اجزای جدار نازک را تحت تاثیر قرار می‌دهد، مواردی نظیر ماده، هندسه سازه و مودهای بارگذاری هستند [۲].

در سال‌های اخیر محققین، پروفیل‌های کرک‌های را که در آنها سطح به شکل تعدادی برجستگی، شیار یا فرورفتگی شکل گرفته یا به شکل خاصی تاخوردند، با تلاش در جهت کاهش نیروی ضربه‌ای اولیه، تغییر شکل کنترل‌شده، یکنواختی پاسخ نیرو-جابجایی و راندمان جذب انرژی بالاتر مورد توجه و بررسی قرار داده‌اند. محققان طرح‌های نوآورانه زیادی در سال‌های اخیر به عنوان پروفیل‌های کرک‌های ارائه داده‌اند. در شکل ۱ طبقه‌بندی مختلف پروفیل‌های کرک‌های، ارائه شده است [۳].

بررسی روی ضربه‌پذیری پروفیل‌های کرک‌های نشان می‌دهد که پروفیل‌های کرک‌های طولی راندمان بیشتری تحت نیروی جانبی دارند، از طرفی پروفیل‌های کرک‌های طولی پاسخ نیرو-جابجایی یکنواخت‌تر و افزایش ناگهانی نیروی ضربه‌ای^۲ کمتری تحت بار محوری دارند، اما این پروفیل‌ها تحت بارگذاری محوری کمتر موثر هستند [۳]، به عنوان مثال، معتمدی و همکاران (۱۳۸۵)، استهلاک انرژی در لوله‌های کرک‌های محوری را تحت نیروهای رفت و برگشتی محوری مطالعه کردند [۴]. با توجه به اهمیت جذب

انرژی تحت بارهای محوری در این مقاله به پروفیل‌های کرک‌های پرداخته شده است.

در زمینه بررسی پروفیل‌های کرک‌های ابدوی و همکاران در سال ۲۰۰۶ تاثیر کرک‌های شدن محیطی مقطع را در پروفیل‌های ساخته شده از مواد مرکب لایه‌ای بررسی کردند و نتایج را با پروفیل دایره‌ای ساده مقایسه کردند. نویسندگان نشان دادند، پروفیل کرک‌های جذب انرژی بیشتری نسبت به پروفیل دایره‌ای ساده دارد [۵]. همین نویسندگان در سال ۲۰۰۸ مجدداً بررسی‌هایی روی پروفیل‌های کرک‌های ساخته شده از مواد مرکب لایه‌ای انجام دادند و نتیجه گرفتند که در بارگذاری محوری، پروفیل‌های کرک‌های قابلیت‌های بهتری در جذب انرژی نسبت به پروفیل دایره‌ای ساده دارند، اما در بارگذاری جانبی کرک‌دار بودن پروفیل تفاوت و مزیتی ایجاد نمی‌کند [۶].

فان و همکاران (۲۰۱۳) چهار مقطع با گوشه‌های محدب به شکل‌های شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی و ستاره‌ای ۱۲ گوشه و ۱۶ گوشه را به صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی کردند. آنها نشان دادند، نتایج تجربی و شبیه‌سازی نزدیک به هم هستند. نتایج نشان داد، پروفیل ستاره‌ای ۱۲ گوشه بهترین عملکرد را در جذب انرژی دارد [۷].

لیو و همکاران (۲۰۱۵) با توجه به اینکه پروفیل‌های کرک‌های محدب می‌توانند دچار مود تغییر شکل انبساط کلی شوند و تاخوردگی‌های موثر در جذب انرژی ایجاد نشود، با گرفتن ایده از گره‌های ساقه گیاه بامبو از صفحات افقی درون پروفیل در فاصله‌های مشخص استفاده کردند. آنها با استفاده از شبیه‌سازی اجزا محدود نشان دادند، این پروفیل‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای ویژگی‌های جذب انرژی را بهبود می‌دهند. آنها نشان دادند، مزیت اصلی استفاده از این پروفیل‌ها این است که مود انبساطی کلی را به مود تاخوردگی متوالی تبدیل می‌کند. نویسندگان نشان دادند، هر چه تعداد صفحات افقی کمتر باشد، به طوری که مود تغییر شکل تاخوردگی متوالی حفظ شود، ویژگی‌های جذب انرژی بهتر است [۸].

عباسی و همکاران در سال ۲۰۱۵ ویژگی‌های ضربه-پذیری پروفیل‌های ۱۲ گوشه را بررسی کردند که روی اضلاع مقاطع مربعی، شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی شکل گرفته‌اند. نویسندگان نتیجه گرفتند که بیشترین پایداری در تاخوردگی

¹ Thin-Walled Structures

² Peak Crushing Force



شکل ۱- طبقه بندی پروفیل‌های کرکره‌ای (مواج) [۳]

وو و همکاران در سال ۲۰۱۷ با بکارگیری سری فوریه سطح مقطع‌های نوآورانه‌ای ارائه دادند. آنها نشان دادند، مودهای تاخوردگی به شکل سطح مقطع، ضخامت و محیط مقطع وابسته است. آنها توانستند به منحنی دست یابند که پارامتر SEA را تا $0.77/0.54$ نسبت به پروفیل دایره‌ای بهبود می‌دهد [۱۴].

در ادامه بررسی پروفیل‌های کرکره‌ای دنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ پروفیل‌های کرکره‌ای ستاره‌ای شکل شش- گوشه، هشت‌گوشه و ۱۲ گوشه را تحت بارگذاری محوری بررسی کردند. نتایج نشان داد، پروفیل ستاره‌ای هشت‌گوشه عملکرد بهتری در جذب انرژی دارد و پروفیل ۱۲ گوشه بدترین عملکرد را در جذب انرژی دارد. پارامتر نیروی ضربه-ای متوسط^۳ پروفیل هشت‌گوشه $0.7/0.94$ بیشتر از پروفیل شش‌گوشه و $0.15/0.75$ بیشتر از پروفیل ۱۲ گوشه به دست آمد. نویسندگان همچنین با استفاده از تئوری اجزای تاخورده ساده شده^۴ SSFE توانستند نیروی ضربه‌ای متوسط را برای این پروفیل‌ها محاسبه نمایند [۱۵]. همین نویسندگان (۲۰۱۸) سازه‌های کرکره‌ای ایجاد شده با منحنی سینوسی در پیرامون پروفیل دایره‌ای را بررسی کردند. آنها نشان دادند، وقتی تعداد کرکره‌ها به ۶ و ۸ کرکره می‌رسد، پارامتر SEA به میزان به ترتیب $0.27/0.91$ و $0.27/0.24$ نسبت به پروفیل دایره‌ای ساده افزایش می‌یابد. آنها با بهینه‌سازی پروفیل‌های

مقاطع، زمانی ایجاد می‌شود که زاویه گوشه‌ها ۹۰ درجه است. همچنین نشان دادند، تاثیر شکل مقطع پروفیل مانند جنس ماده دارای اهمیت است [۹].

لیو و همکاران (۲۰۱۶) پروفیل‌های ستاره‌شکل را تحت بار محوری بررسی کردند. آنها نشان دادند، نازکی پروفیل نقش مهمی در مود تغییر شکل دارد. نتایج نشان داد، پارامتر جذب انرژی ویژه^۱ SEA، در پروفیل‌های ستاره‌شکل بهتر از پروفیل‌های چندضلعی است. در نهایت آنها یک طراحی جدید با ترکیب پروفیل‌های ستاره‌شکل و چندضلعی ارائه دادند [۱۰]. همین‌طور وانگ و همکاران (۲۰۱۸)، بررسی مشابهی با تغییر در تعداد گوشه‌های پروفیل‌های ستاره‌شکل و ترکیب آنها با مقاطع چندضلعی انجام داده‌اند [۱۱].

سان و همکاران در سال ۲۰۱۷، پروفیل‌های کرکره‌ای متقاطع با منحنی مربعی را با پروفیل مربعی ساده مقایسه کردند و نشان دادند، پروفیل کرکره‌ای ویژگی بهتری در جذب انرژی دارد. سپس اضلاع پروفیل کرکره‌ای را به صورت منحنی‌های مقعر نواری^۲ تغییر دادند. نتایج نشان داد، قابلیت ضربه‌پذیری پروفیل کرکره‌ای متقاطع وقتی اضلاع آن با منحنی‌های مقعر نواری تعویض می‌شود، افزایش می‌یابد [۱۲]. همین‌طور تانگ و همکاران نیز در سال ۲۰۱۲ ویژگی-های جذب انرژی پروفیل‌های کرکره‌ای با کرکره‌های مربعی را بررسی کرده‌اند [۱۳].

³ Mean Crushing Force

⁴ Simplified Super Folding Element

¹ Specific Energy Absorption

² Spline

کرکره‌ای سینوسی توانستند پارامتر SEA را تا $53/65\%$ نسبت به پروفیل دایره‌ای ساده افزایش دهند [۱۶].

لی و یو در سال ۲۰۱۸ قابلیت جذب انرژی هنگام وارونه‌سازی پروفیل کرکره‌ای را با پروفیل دایره‌ای به صورت تجربی و شبیه‌سازی مقایسه کردند. نتایج نشان داد، در این نوع بارگذاری که برای وارونه‌سازی یک قالب نیاز است، در پروفیل‌های کرکره‌ای تغییر شکل روان‌تر و بدون نیاز به روانکار قالب، قابل انجام است و پروفیل‌های کرکره‌ای قابلیت‌های جذب انرژی بیشتری دارند [۱۷]. آنها در بررسی دیگری در سال ۲۰۱۹، پروفیل‌های به شکل اورینگ‌های محدب را بررسی کردند که از چندضلعی‌های به هم پیوسته تشکیل شده‌اند. آنها با بررسی تجربی، شبیه‌سازی و حل تحلیلی نشان دادند، پارامتر SEA برای پروفیل‌های اورینگ‌های معرفی شده، می‌تواند تا $3/3$ برابر بیشتر از پروفیل مربعی ساده باشد [۱۸].

در سال ۲۰۱۹ لی و همکاران یک پروفیل کرکره‌ای با منحنی کسینوسی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود را با نتایج تجربی صحت‌گذاری کردند. نویسندگان پنج مود تغییر شکل مختلف را برای این پروفیل‌ها شناسایی کردند. نتایج نشان داد، مودهای تغییر شکل ارتباط مستقیمی با شکل سطح مقطع و ضخامت پروفیل دارند. از طرفی نشان دادند، افزایش تعداد کرکره‌ها، یا ارتفاع کرکره‌ها یا ضخامت می‌تواند منجر به افزایش PCF شود. آنها نشان دادند، پارامتر SEA برای پروفیل کرکره‌ای کسینوسی می‌تواند تا بیش از 50% بهبود نسبت به پروفیل مربعی ساده وقتی هر دو پروفیل دارای وزن یکسان هستند، ایجاد نماید. از طرفی اگر ضخامت این دو پروفیل یکسان در نظر گرفته شود، این بهبود می‌تواند تا بیش از 69% ایجاد شود [۱۹].

لی و همکاران (۲۰۱۹) پروفیل‌های کرکره‌ای حاصل از منحنی‌های کسینوسی و مثلثی را با تیغه‌بندی مختلف داخلی مورد بررسی قرار دادند و نتایج را با پروفیل‌های مربعی تیغه‌بندی شده مقایسه کردند. نتایج نشان داد، پروفیل‌های حاصل از منحنی‌های مثلثی پاسخ به ضربه پایداری ندارند، بنابراین نویسندگان به ارزیابی بیشتر پروفیل‌های حاصل از منحنی کسینوسی پرداختند. آنها ۴ مود تغییرشکل مختلف را برای این پروفیل‌ها شناسایی کردند. در نهایت با استفاده از روش

تئوری SSFE به تحلیل نیروی ضربه‌ای متوسط پروفیل‌ها پرداختند و مقادیر نزدیک به نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی، بدست آوردند [۲۰]. همین نویسندگان (۲۰۲۰) در بررسی دیگری به ارزیابی تیغه‌بندی‌های متفاوت داخل پروفیل‌های کرکره‌ای حاصل از منحنی‌های مثلثی و کسینوسی پرداختند [۲۱].

پیرمحمد و اسماعیلی مرزدشتی در سال ۱۳۹۶ به مقایسه عملکرد جذب انرژی سازه‌های چند جداره مربعی و دایره‌ای با استفاده از روش کپراس و بهینه‌سازی سازه دایره‌ای با استفاده از روش سطح پاسخ پرداختند و نشان دادند، سازه با سطح مقطع دایره‌ای نسبت به سطح مقطع مربعی جذب انرژی بالاتری دارد [۲۲].

در این مقاله با توجه به اینکه محققان مختلف نشان دادند، پارامترهای SEA و PCF در پروفیل دایره‌ای نسبت به پروفیل مربعی به طور قابل ملاحظه‌ای بهتر است [۱، ۲۲، ۲۳ و ۲۴] و البته نتایج بدست آمده در همین مقاله نیز این موضوع را اثبات می‌کند، از یک ایده جدید در ایجاد پروفیل‌های کرکره‌ای بهره گرفته شده است. بر این اساس برای ایجاد کرکره‌های پروفیل از منحنی‌های دایره‌ای مماس بر یکدیگر استفاده شده است تا بتوان تا حد ممکن از ویژگی‌های برتر پروفیل‌های دایره‌ای بهره برد. پروفیل‌ها با این سطح مقطع در کار هیچ یک از محققان تاکنون مورد توجه نبوده است. شکل ۲ مقاطع مختلفی را نمایش داده است که در این کار پژوهشی مورد توجه قرار گرفته‌اند. ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی صحت‌گذاری شده و با توجه به انطباق مناسب نتایج با نتایج تجربی، در ادامه از طریق شبیه‌سازی المان محدود سایر مقاطع بررسی و مقایسه شده‌اند.

۲- روش حل و توصیف مسئله

۲-۱- شاخص‌های ضربه‌پذیری

پنج شاخص ضربه‌پذیری معمول به نام‌های جذب انرژی EA، جذب انرژی ویژه SEA، افزایش اولیه نیروی ضربه‌ای^۱ IPCF، نیروی ضربه‌ای متوسط MCF و راندمان نیروی ضربه‌ای CFE^۲ برای ارزیابی ضربه‌پذیری سازه‌ها در تصادفات مورد

^۱ Initial Peak Crushing Force

^۲ Crushing Force Efficiency

که m جرم سازه جاذب انرژی است. SEA راندمان جذب انرژی سازه را ارائه می‌دهد و اغلب دستیابی به SEA بیشتر هدف محققان مختلف است.

MCF به صورت نسبت EA به فاصله اعمال ضربه s تعریف می‌شود:

$$MCF = \frac{EA}{s} \quad (3)$$

IPCF اغلب حداکثر نیروی ضربه‌ای تحت بار ضربه‌ای سازه‌های جدار نازک است که معمولاً در ابتدای اعمال بار اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه زیاد بودن این پارامتر ریسک ایجاد جراحت برای سرنشینان وسیله نقلیه را به طور قابل ملاحظه افزایش می‌دهد، برای محققان مختلف معمولاً کم کردن این شاخص نیز هدف بوده است.

CFE به صورت نسبت MCF به IPCF تعریف می‌شود:

$$CFE = \frac{MCF}{IPCF} \quad (4)$$

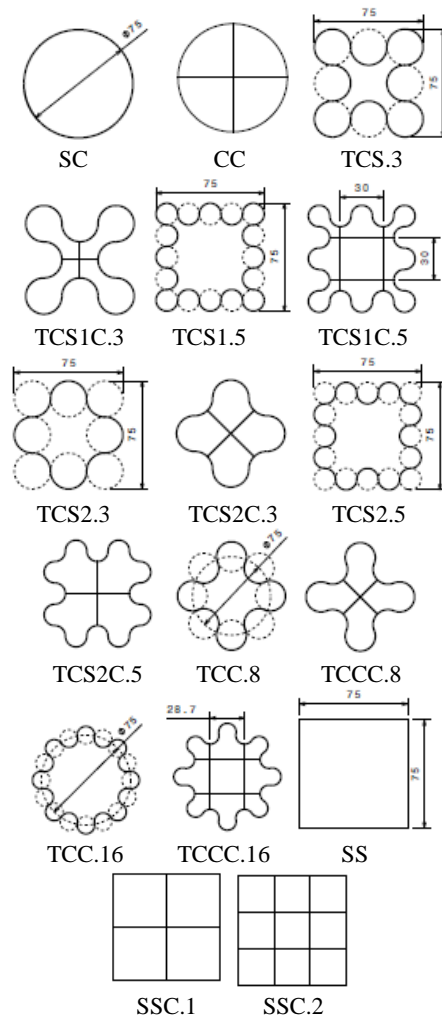
اغلب سازه‌های با CFE بزرگتر برای کاربرد جذب انرژی رقابتی‌تر و برای سازندگان وسایل نقلیه جذاب‌تر هستند.

۲-۲- توصیف هندسه مسئله

در شکل ۲ مقاطع مورد بررسی ارائه شده است. ارتفاع کلیه پروفیل‌ها ۱۶۰ mm و ضخامت آنها ۱/۵ mm مدل‌سازی شده است. همه پروفیل‌ها تحت بار شبه‌استاتیکی به فاصله ۱۲۰ فشرده می‌شوند.

۳-۲- مدل اجزاء محدود

تحلیل ضربه‌پذیری پروفیل‌ها با استفاده از کد اجزاء محدود حل صریح LS-Dyna انجام شده است. مدل، شامل دو قطعه پروفیل جاذب انرژی و صفحه فوقانی اعمال نیرو می‌شود. درجه‌های آزادی گره‌های تحتانی پروفیل در همه جهات محدود شده و صفحه فوقانی نیز تنها در جهت محوری اجازه حرکت دارد. صفحه فوقانی با سرعت ۱ m/s به سمت پروفیل حرکت می‌کند که برای تعریف حرکت آن از مدل اجزاء PRESCRIBED_MOTION_RIGID استفاده شده است. اجزاء پوسته‌ای مربعی با ابعاد ۲ mm از نوع Belytschko-Tsay با یک نقطه انتگرال‌گیری میانی و ۲ نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت برای پروفیل و اجزاء جامد برای صفحه فوقانی در نظر گرفته شده است. تماس بین صفحه فوقانی و



شکل ۲- مقاطع پروفیل‌های بررسی شده به همراه کدهای شناسایی

استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. این شاخص‌ها در ادامه شرح داده شده است.

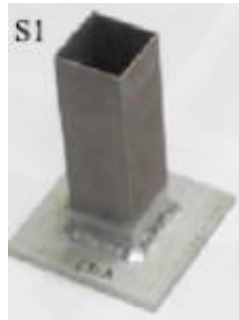
EA معرف مقدار انرژی جذب شده در خلال فروپاشی و تاخوردگی سازه است که از انتگرال‌گیری منحنی نیرو-جابجایی بدست می‌آید:

$$EA = \int_0^s F(s) ds \quad (1)$$

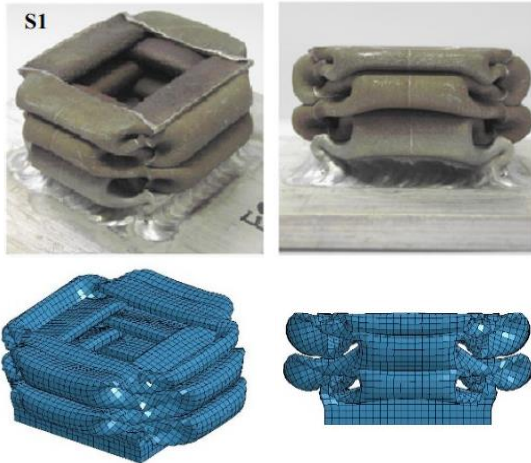
که F(s) تابع نیروی ضربه‌ای بر حسب متغیر جابجایی s است. SEA جذب انرژی در واحد جرم است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

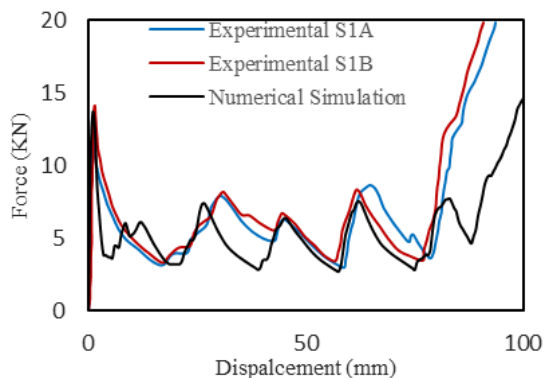
انجام شده این پارامتر ۵/۵۵ KN اندازه‌گیری شد. نسبت به نمونه‌های S1A و S2A به ترتیب ۰/۳۶٪ و ۳/۳٪ انحراف وجود دارد؛ بنابراین نتایج، انطباق قابل قبولی را نشان می‌دهد



شکل ۴- پروفیل مربعی مورد استفاده در آزمون تجربی



شکل ۵- مقایسه مود تغییر شکل در کار تجربی [۲۳] و شبیه‌سازی



شکل ۶- مقایسه پاسخ نیرو-جابجایی در کار تجربی [۲۳] و شبیه‌سازی

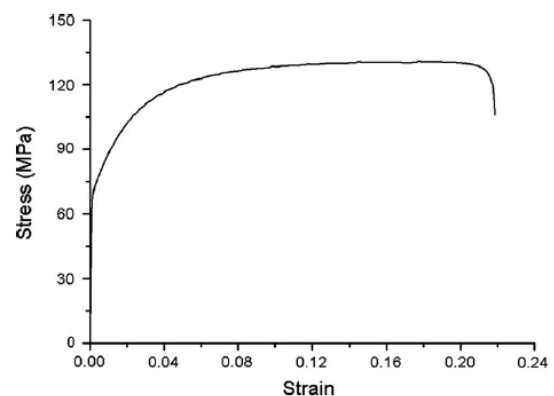
پروفیل از نوع AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE با ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۳ و ضریب اصطکاک دینامیکی ۰/۲ و تماس اجزاء پروفیل با یکدیگر از نوع AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE با ضریب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی ۰/۲ تعریف شده است. ماده مورد استفاده برای پروفیل آلایژ آلومینیوم 6061-O است و برای تعریف آن از مدل PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY استفاده شده و ماده مورد استفاده برای صفحه فوقانی، صلب تعریف شده است.

شکل ۳ نمودار تنش-کرنش مربوط به ماده تعریف شده برای پروفیل را نمایش داده است. مدول یانگ $E=68 \text{ GPa}$ ، تنش تسلیم اولیه $\sigma_y=71 \text{ MPa}$ ، تنش نهایی $\sigma_u=130.7 \text{ MPa}$ ، نسبت پواسان $\nu=0.33$ و $n=0.18$ است [۲۳].

۲-۴- صحنه‌گذاری مدل اجزاء محدود

برای صحنه‌گذاری مدل اجزاء محدود در این مقاله از نتایج تجربی ارائه شده توسط ژانگ و همکاران [۲۵] استفاده شده است. در این کار تجربی مطابق شکل ۴ یک پروفیل مربعی ساده به طول ضلع ۳۶ mm در حالی که ۵ mm پایینی پروفیل به یک صفحه جوش شده است، تحت بار محوری قرار گرفته است. شکل ۵ مود تغییر شکل به دست آمده را در نمونه تجربی و نتیجه حاصل از شبیه‌سازی مقایسه می‌کند. انطباق مناسبی در مدهای تغییر شکل وجود دارد.

شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی را برای کار تجربی و شبیه‌سازی مقایسه می‌کند. مقدار MCF برای نمونه تجربی S1A و S1B به ترتیب ۵/۵۳ KN و ۵/۷۴ KN و در شبیه‌سازی



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش آلایژ آلومینیوم 6061-O [۲۳]

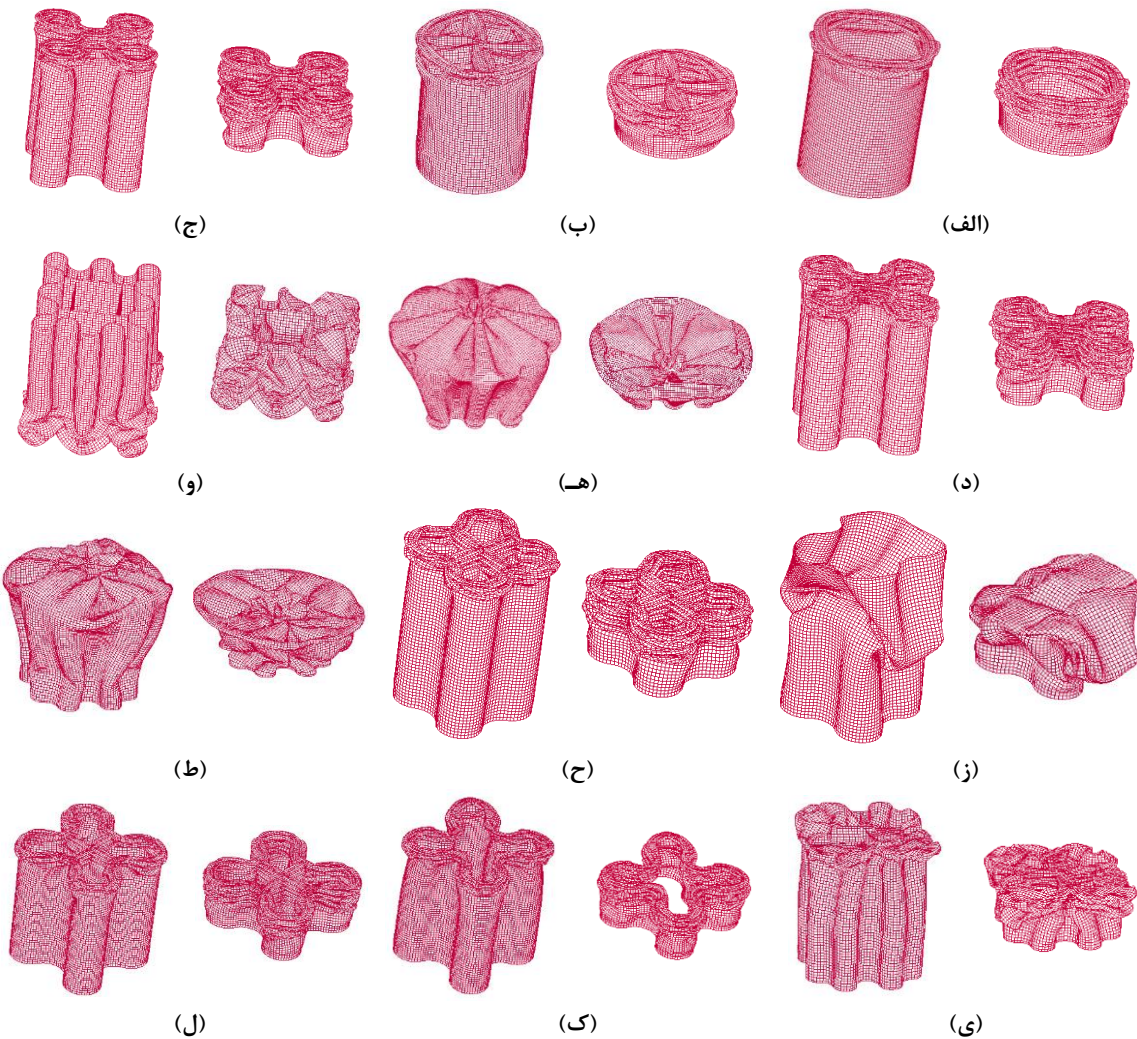
شد و در نتیجه تاخوردگی کلی ایجاد شده و مود تغییر شکل مناسبی حاصل از تاخوردگی‌های زیاد و پیوسته ایجاد نخواهد شد. پروفیل‌های TCS1.5، TCS2.3، TCS2.5 و TCC16 همانطور که در شکل ۷ نمایش داده شده است، دچار مود تغییر شکل کلی شده‌اند. مود تغییر شکل همین پروفیل‌ها وقتی داخل آنها از صفحات متقاطع استفاده شده است، به ترتیب با کدهای TCS1C.5، TCS2C.3، TCS2C.5 و TCCC16 در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد برای جلوگیری از این اشکال و بهبود مود تغییر شکل، استفاده از صفحات متقاطع داخلی به طور موثری عملکرد پروفیل را بهبود داده و از کمانش کلی سطوح جلوگیری می‌کند.

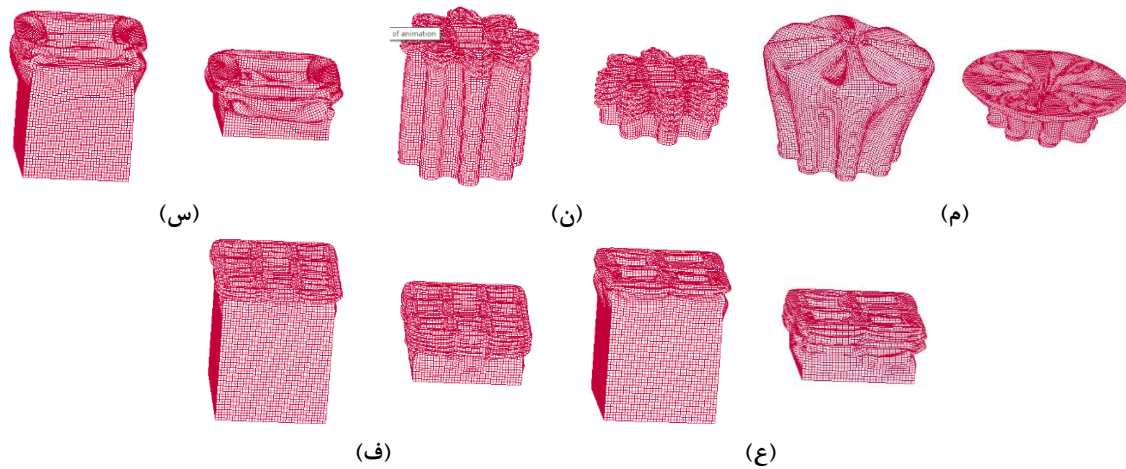
و تایید می‌شود که با استفاده از روش شبیه‌سازی به کار گرفته شده، می‌توان مود تغییر شکل و نمودار نیرو-جابجایی مقاطع مختلف در نظر گرفته شده در این پژوهش را به درستی استخراج کرد.

۳- تحلیل ضربه‌پذیری

۳-۱- بارگذاری محوری

شکل ۷ پروفیل‌های تغییر شکل یافته مورد نظر در این پژوهش را در فشردگی‌های ۶۰ mm و ۱۲۰ mm نمایش داده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، اگر سطوح کرکراهی با استفاده از دایره‌ها با قطر کمتر ایجاد شود، این موضوع باعث افزایش استحکام سطوح پروفیل مربعی و یا دایره ساده خواهد





شکل ۷- مود تغییر شکل در جابجایی ۶۰ mm و ۱۲۰ mm برای پروفیل‌های الف (SC، ب) CC، ج) TCS1.3، د) TCS1C.3، ه) TCS1.5، و) TCS1C.5، ز) TCS2.3، ح) TCS2C.3، ط) TCS2.5، ی) TCS2C.5، ک) TCC.8، ل) TCCC.8، م) TCC.16، ن) TCCC.16، س) SS، ع) SSC.1 و ف) SSC.2

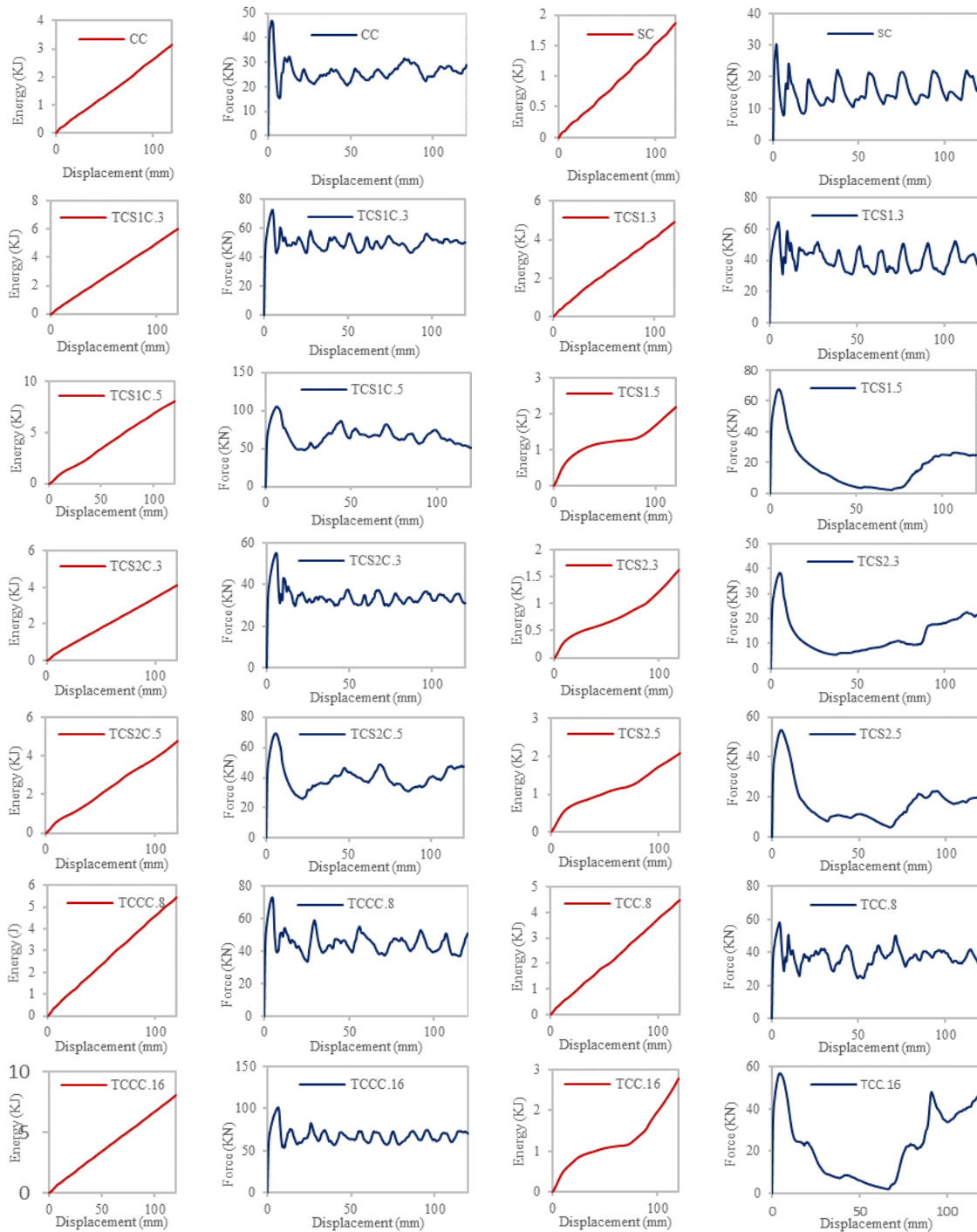
که روی محیط یک دایره بسط یافته‌اند و داخل آن از تیغه-های متقاطع استفاده شده است، نمونه TCCC.16، بیشترین میزان جذب انرژی به ازای واحد جرم را دارد. علت این است که در این نمونه با کوچکتر شدن قطر دایره‌های مماس بر یکدیگر، محیط کلی پروفیل به یک دایره نزدیک می‌شود و به طور همزمان از ویژگی کرکره‌ای بودن پروفیل نیز استفاده شده و از طرفی سطوح متقاطع داخلی نیز باعث بهبود عملکرد شده و از مود تغییر شکل کلی جلوگیری کرده است. با مقایسه مود تغییر شکل و نمودارهای نیرو-جابجایی پروفیل TCCC.16 با نمونه SSC.2 مشخص است که نمونه TCCC.16 دارای ۱۲ تاخوردگی و نمونه SSC.2 که تیغه‌های داخلی مشابه با نمونه TCCC.16 دارد، دارای ۷ تاخوردگی است؛ بنابراین نقش سطوح کرکره‌ای محیطی که روی محیط یک دایره شکل گرفته‌اند، در بهبود شرایط جذب انرژی مشخص است. با افزایش تعداد تاخوردگی‌ها در پروفیل TCCC.16 پاسخ نیرو-جابجایی در این پروفیل به یک خط افقی نزدیک شده است که این موضوع عاملی مطلوب محسوب می‌شود. پاسخ نیرو-جابجایی نزدیک به خط افقی را به طور مشابهی در پروفیل‌های TCS1C.3 و TCS2C.3 می‌توان مشاهده کرد.

با دقت در مود تغییر شکل پروفیل‌های TCS1C.5 و TCS2C.5 و مقایسه آنها با مود تغییر شکل پروفیل‌های

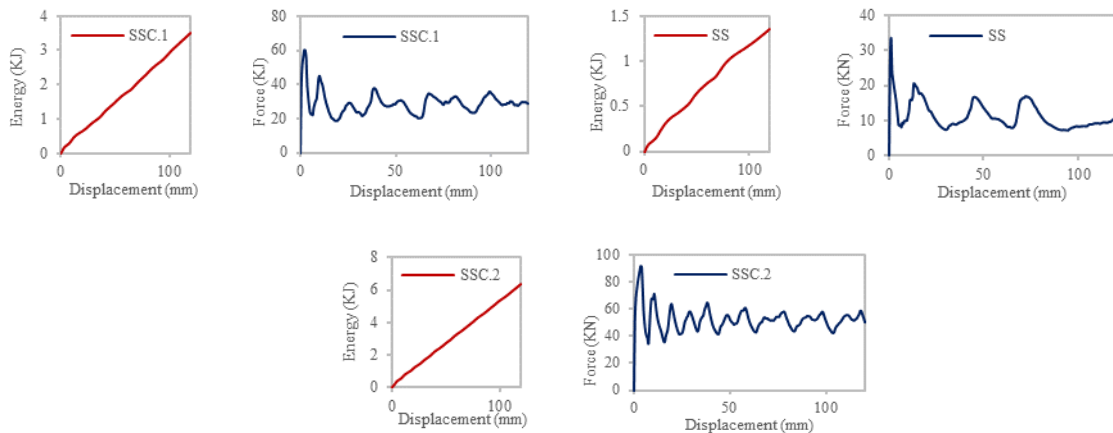
در شکل ۸ و شکل ۹ نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی برای همه پروفیل‌های مورد نظر در این پژوهش نمایش داده شده است. هر قله در نمودار نیرو-جابجایی معرف یک تاخوردگی است. در جدول ۱ مقادیر جذب انرژی ویژه، نیروی ضربه‌ای اولیه، نیروی ضربه‌ای متوسط و راندمان نیروی ضربه‌ای، برای مقاطع مختلف تحت بار محوری، ارائه شده است. مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی پروفیل دایره‌ای ساده SC و پروفیل با سه دایره مماس بر یکدیگر روی هر یک از اضلاع مربع نوع ۱ TCS1.3 نشان می‌دهد، استفاده از پروفیل‌های کرکره‌ای با دایره‌های مماس بر یکدیگر علاوه بر اینکه مود تغییر شکل مناسب پروفیل دایره‌ای را حفظ کرده، حتی یک تاخوردگی بیشتر نیز ایجاد کرده است. از طرفی مطابق نمودارهای ارائه شده در شکل ۸ و همچنین نتایج ارائه شده در جدول ۱ مقادیر جذب انرژی و جذب انرژی ویژه به طور قابل ملاحظه افزایش داشته، در حالی که اختلاف نیروی ضربه‌ای اولیه نسبت به نیروی ضربه‌ای متوسط در پروفیل TCS1.3 نسبت به پروفیل SC افزایش کمتری دارد و این موضوع باعث شده است، راندمان نیروی ضربه‌ای نیز در این پروفیل نسبت به پروفیل دایره‌ای ساده بهبود داشته باشد. در شکل ۱۰ مقادیر جذب انرژی ویژه در مقاطع مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، پروفیل کرکره‌ای حاصل از دایره‌های مماس بر یکدیگر

TCS2C.5 توالی تاخوردگی‌ها از بین رفته و تاخوردگی‌های بزرگتری نسبت به پروفیل‌های TCS1C.3 و TCS2C.3 ایجاد شده است.

TCS2C.3 و TCS1C.3 می‌توان به این نتیجه دست یافت که افزایش تعداد کرکره‌های محیطی لزوماً منجر به بهبود عملکرد ضربه‌پذیری نمی‌شود. در نمونه‌های TCS1C.5 و



شکل ۸- نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی تحت بار محوری برای مقاطع مختلف

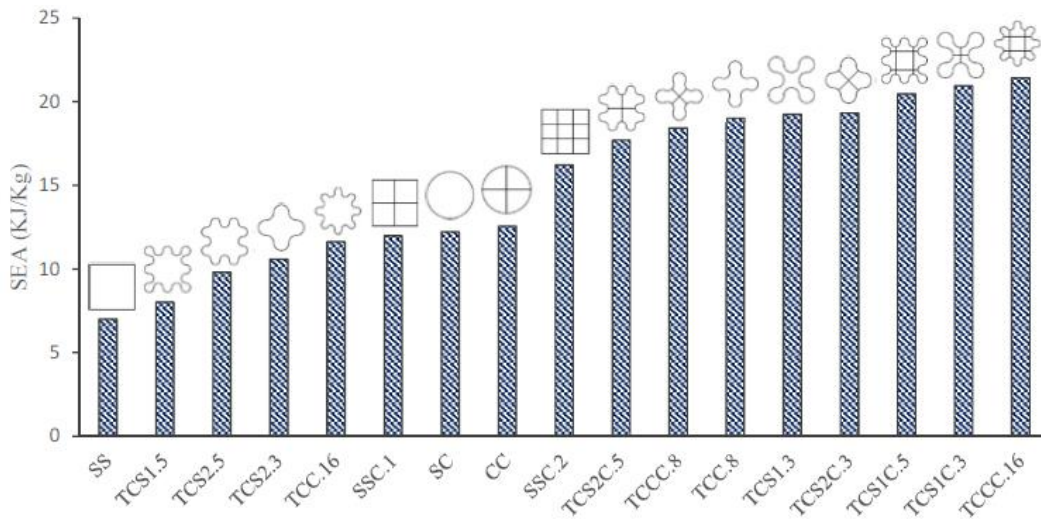


شکل ۹- نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی تحت بار محوری برای مقاطع SS، SSC.1 و SSC.2

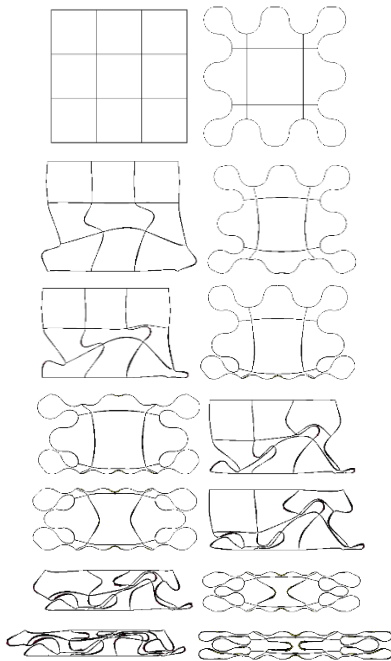
جدول ۱- مقادیر جذب انرژی ویژه، نیروی ضربه‌ای اولیه، نیروی ضربه‌ای متوسط و راندمان نیروی ضربه‌ای برای مقاطع مختلف

تحت بار محوری

کد نمونه	جرم (Kg)	انرژی جذب شده (KJ)	SEA (KJ/Kg)	PCF (KN)	MCF (KN)	CFE (%)
SC	۱۵۳	۱/۸۷	۱۲/۲۲	۳۰/۴	۱۵/۵	۵۱
CC	۲۵۰	۳/۱۴	۱۲/۵۶	۴۷/۲	۲۶/۱	۵۵/۳
TCS1.3	۲۵۴	۴/۸۹	۱۹/۲۵	۶۴/۵	۴۰/۷	۶۳/۱
TCS1C.3	۲۸۷	۶/۶۱	۲۰/۹۴	۷۲/۶	۴۹/۶	۶۸/۷
TCS1.5	۲۷۴	۲/۲	۸/۰۲	۶۷/۴	۱۸/۳	۲۷/۲
TCS1C.5	۳۹۱	۸/۰۱	۲۰/۴۸	۱۰۵	۶۶/۶	۶۳/۳
TCS2.3	۱۵۳	۱/۶۲	۱۰/۵۹	۳۸/۲	۱۳/۵	۳۵/۳
TCS2C.3	۲۱۲	۴/۱	۱۹/۳۳	۵۵/۳	۳۴/۱	۶۱/۷
TCS2.5	۲۱۳	۲/۰۹	۹/۸۱	۵۳/۸	۱۷/۴	۳۲/۳
TCS2C.5	۲۷۱	۴/۸	۱۷/۷۱	۶۹/۳	۴۰	۵۷/۷
TCC.8	۲۳۴	۴/۴۷	۱۹/۱	۵۸	۳۷/۲	۶۴/۱
TCCC.8	۲۹۴	۵/۴۲	۱۸/۴۳	۷۳	۴۵/۱	۶۱/۸
TCC.16	۲۳۸	۲/۷۷	۱۱/۶۴	۵۶/۹	۲۳/۱	۴۰/۶
TCCC.16	۳۷۹	۸/۱۲	۲۱/۴۲	۱۰۲	۶۷/۵	۶۶/۲
SS	۱۹۴	۱/۳۶	۷/۰۱	۳۳/۶	۱۱/۳	۳۲/۶
SSC.1	۲۹۲	۳/۵	۱۱/۹۹	۶۰/۱	۲۹/۱	۴۸/۴
SSC.2	۳۸۹	۶/۳۱	۱۶/۲۲	۹۲	۵۲/۵	۵۷/۱



شکل ۱۰- مقایسه پارامتر SEA برای مقاطع مختلف



شکل ۱۱- مراحل تغییر شکل نمونه‌های TCS1C.5 و SCC.2 تحت بار جانبی

نیروی ضربه‌ای متوسط و راندمان نیروی ضربه‌ای برای مقاطع TCS1C.5 و SCC.2 تحت بار جانبی، با یکدیگر مقایسه شده است.

جذب انرژی ویژه تحت بار جانبی در مقطع کرکره‌ای TCS1C.5 حدوداً ۱۸٪ کمتر از مقطع SCC.2 است، اما نیروی ضربه‌ای اولیه به طور قابل ملاحظه‌ای در مقطع کرکره‌ای

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۱ بیشترین راندمان نیروی ضربه‌ای مربوط به نمونه حاصل از سه دایره مماس بر یکدیگر است که روی ضلع مربع قرار گرفته و دارای دو ورق متقاطع داخلی است.

با توجه به اینکه در خودروها استفاده از مقاطع گرد به دلیل اینکه این مقاطع تحمل بار خمشی کمتری دارند و نصب تجهیزات مختلف روی آنها با دشواری همراه است، کاربرد کمتری دارد، در ادامه برای ارزیابی جذب انرژی تحت بارهای جانبی و مایل، نمونه TCS1C.5 که شکل مقطع شبیه‌تری به مربع دارد، با نمونه SSC.2 مقایسه شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد، نمونه TCS1C.5 تحت بار محوری به میزان ۲۶٪ نسبت به نمونه SSC.2 در پارامتر جذب انرژی ویژه برتری دارد.

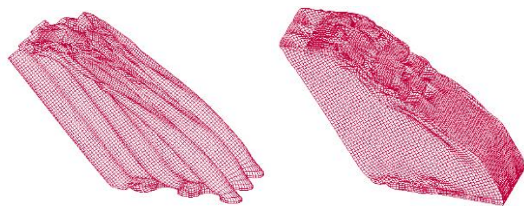
۲-۳- بارگذاری جانبی

شکل ۱۱ مراحل تغییر شکل نمونه‌های TCS1C.5 و SCC.2 را تحت بار جانبی در مقادیر مختلف جابجایی ارائه می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، مود تغییر شکل مقطع TCS1C.5 پیش‌بینی شده‌تر و منظم‌تر است. به دلیل وجود کرکره‌های جانبی تاخوردگی‌ها دقیقاً در محل دره و قله این کرکره‌ها اتفاق می‌افتد.

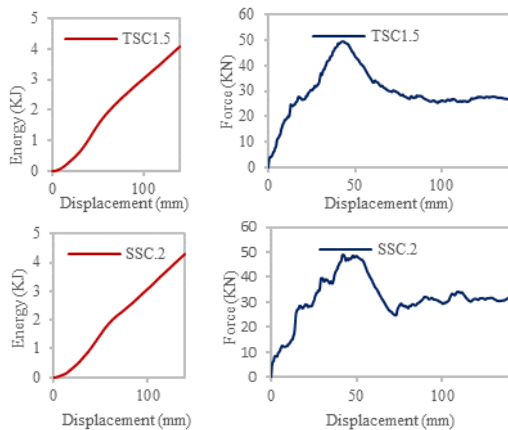
شکل ۱۲ نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی را تحت بار جانبی برای مقاطع TCS1C.5 و SCC.2 ارائه داده و در جدول ۲ مقادیر جذب انرژی موثر، نیروی ضربه‌ای اولیه،

جدول ۲- مقادیر جذب انرژی ویژه، نیروی ضربه‌ای اولیه، نیروی ضربه‌ای متوسط و راندمان نیروی ضربه‌ای برای مقاطع مختلف تحت بار جانبی

کد نمونه	جرم (Kg)	انرژی جذب شده (KJ)	SEA (KJ/Kg)	PCF (KN)	MCF (KN)	CFE (%)
TCS1C.5	۳۹۱	۱/۱۹	۳/۰۴	۱۵	۱۸/۹	۱۲۶
SSC.2	۳۸۹	۱/۴۴	۳/۷	۶۵/۴	۲۳/۴	۳۵/۸



شکل ۱۳- مقاطع TCS1C.5 و SSC.2 تغییر شکل یافته تحت بارگذاری مایل

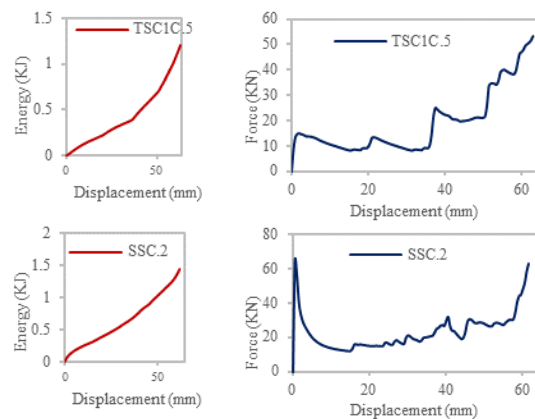


شکل ۱۴- نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی تحت بار مایل برای مقاطع TCS1C.5 و SSC.2

ضربه‌ای اولیه و راندمان نیروی ضربه‌ای در هر دو مقطع تقریباً مشابه است؛ اگر چه مقطع چند سلول مربعی تحت بار مایل به مقدار جزئی، عملکرد بهتری را در جذب انرژی نشان می‌دهد.

۴- تحلیل تئوری مقطع کرکره‌ای TCS1.3

مطابق فرضیه‌ای که در این پژوهش مطرح شد، به دلیل مزیت‌هایی که پروفیل‌های دایره‌ای دارند، پروفیل‌های کرکره‌ای



شکل ۱۲- نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی تحت بار جانبی برای مقاطع TCS1C.5 و SSC.2

TCS1C.5 کمتر و در نتیجه راندمان نیروی ضربه‌ای در پروفیل کرکره‌ای نسبت به مقطع چند سلول مربعی ۳/۵ برابر بیشتر است.

۳-۳- بارگذاری مایل

شکل ۱۳ مقاطع TCS1C.5 و SSC.2 تغییر شکل یافته را تحت بارگذاری مایل نمایش داده است. شکل ۱۴ نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی را تحت بار مایل ۳۰ درجه برای مقاطع TCS1C.5 و SSC.2 ارائه داده و در جدول ۳ مقادیر جذب انرژی ویژه، نیروی ضربه‌ای اولیه، نیروی ضربه‌ای متوسط و راندمان نیروی ضربه‌ای برای مقاطع TCS1C.5 و SSC.2 تحت بار مایل با یکدیگر مقایسه شده است.

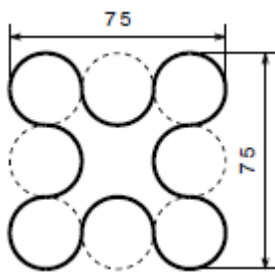
نتایج نشان می‌دهد، هر دو مقطع کرکره‌ای و مربعی چند سلول بررسی شده تحت بار مایل، عملکرد نسبتاً مشابهی دارند، هر دو پروفیل تقریباً در جابجایی برابر، دچار خمش کلی شده و پارامترهای جذب انرژی ویژه، نیروی

جدول ۳- مقادیر جذب انرژی ویژه، نیروی ضربه‌ای اولیه، نیروی ضربه‌ای متوسط و راندمان نیروی ضربه‌ای برای مقاطع مختلف تحت بار مایل

کد نمونه	جرم (Kg)	انرژی جذب شده (KJ)	SEA (KJ/Kg)	PCF (KN)	MCF (KN)	CFE(%)
TCS1C.5	۳۹۱	۴/۱۸	۱۰/۶۹	۴۹/۶	۲۹/۸	۶۰
SSC.2	۳۸۹	۴/۳۹	۱۱/۲۸	۴۸/۸	۳۱/۳	۶۴/۱



شکل ۱۵- مود تغییر شکل پروفیل TCS1.3 در دو صفحه عبور کننده از محور با اختلاف زاویه ۴۵ درجه به صورت متقارن محوری



$$4 \times 0.75 \times \text{Circle}_{D=25\text{mm}} + 4 \times 0.5 \times \text{Circle}_{D=25\text{mm}} = 5 \times \text{Circle}_{D=25\text{mm}}$$

شکل ۱۶- معادل سازی مقطع TCS1.3 با دایره‌های به قطر ۲۵ mm

بنابراین نیروی ضربه‌ای متوسط برای مقطع TCS1.3 معادل ۴۲۰۲۵ نیوتن خواهد بود. با توجه به اینکه نیروی ضربه‌ای متوسط بدست آمده از شبیه‌سازی معادل ۴۰۱۰۰ نیوتن است، نتایج تنها معادل ۵٪ متفاوت هستند.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق جهت بهبود ویژگی‌های ضربه‌پذیری و جذب انرژی در سازه‌های جدار نازک تحت بار محوری، جانبی و مایل، طرح جدیدی از پروفیل‌های کرکره‌ای مبتنی بر منحنی حاصل از کمان‌های دایره‌ای مماس بر یکدیگر ارائه شده است. جهت تبیین این موضوع، ابتدا روش شبیه‌سازی صحنه‌گذاری

با منحنی‌های دایره‌ای مماس بر یکدیگر پیشنهاد شد؛ چرا که فرض شد، به دلیل اینکه این منحنی‌ها بر هم مماس هستند، در نقطه مماس گوشه ایجاد نشده و پروفیل کرکره‌ای می‌تواند رفتاری مشابه پروفیل دایره‌ای ساده داشته باشد، اما در ادامه مشاهده شد، برخی ترکیب‌های پروفیل کرکره‌ای دچار مود تغییر شکل کلی می‌شوند، بنابراین این فرضیه تنها برای پروفیل‌های بدون سطوح متقاطع داخلی که دچار خمش کلی نمی‌شوند، بررسی شده است.

با توجه به اینکه مود تغییر شکل پروفیل TCS1.3 که در شکل ۱۵ نمایش داده شده است، به صورت متقارن محوری است، برای تحلیل تئوری نیروی ضربه‌ای متوسط پروفیل دایره‌ای، از رابطه جونز و آبراموویچ [۲۶] استفاده شده است. این تئوری علی‌رغم سادگی از انطباق مناسبی با نتایج تجربی برخوردار است. این رابطه به قرار ذیل است:

$$MCF = \sigma_0 t \frac{6\sqrt{Dt} + 2.44t}{0.86 - 0.57\sqrt{t/D}} \quad (5)$$

در این رابطه $\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sigma_y \times \sigma_u}{1+n}}$ که n توان کرنش سختی است. با توجه به اینکه از بارگذاری شبه استاتیکی استفاده شده است، n صفر در نظر گرفته می‌شود.

مطابق شکل ۱۶ این پروفیل را می‌توان معادل پنج پروفیل دایره‌ای ساده با قطر ۲۵ mm در نظر گرفت.

با جاگذاری مقادیر، مقدار نیروی ضربه‌ای متوسط برای مقطع دایره‌ای ساده با قطر ۲۵ میلی‌متر از رابطه (۶) به دست خواهد آمد.

$$MCF = \sqrt{71 \times 10^6 \times 130.7 \times 10^6} \times 0.0015 \frac{6\sqrt{0.025 \times 0.0015} + 3.44 \times 0.0015}{0.86 - 0.57\sqrt{\frac{0.0015}{0.025}}} = 8405 N \quad (6)$$

- [2] Baroutaji A, Sajjia M, Olabi A (2017) On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin Wall Struct* 118: 137-163.
- [3] Ha N S, Lu G (2020) Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics. *Thin Wall Struct* 157: 106995.
- [۴] معتمدی م، ناطقی‌الهی ف، ضیایی فر م، کریمی م (۱۳۸۵) مطالعه استهلاک انرژی در لوله‌های جدارنازک آکاردئونی تحت نیروی محوری رفت و برگشتی. مجله استقلال ۱۲۰-۱۰۱: ۲۵(۱).
- [5] Abdewi EF, Sulaiman S, Hamouda AMS, Mahdi E (2006) Effect of geometry on the crushing behaviour of laminated corrugated composite tubes. *J Mater Process Technol* 172: 394-399.
- [6] Abdewi E F, Sulaiman S, Hamouda A M S, Mahdi E (2008) Quasi-static axial and lateral crushing of radial corrugated composite tubes. *Thin-Walled Structures* 46: 320-332.
- [7] Fan Z, Lu G, Liu K (2013) Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes. *Eng Struct* 55: 80-89.
- [8] Liu S, Tong Z, Tang Z, Liu Y (2015) Bionic design modification of non-convex multi-corner thin-walled columns for improving energy absorption through adding bulkheads. *Thin Wall Struct* 88: 70-81.
- [9] Abbasi M, Reddy S, Ghafari Nazari A, Fard M (2015) Multiobjective crashworthiness optimization of multi-cornered thin-walled sheet metal members. *Thin Wall Struct* 89: 31-41.
- [10] Liu W, Lin Z, Wang N, Deng X (2016) Dynamic performances of thin-walled tubes with star-shaped cross section under axial impact. *Thin Wall Struct* 100: 25-37.
- [11] Wang J, Zhang Y, He N, Wang C H (2018) Crashworthiness behavior of Koch fractal structures. *Mater Design* 144: 229-244.
- [12] Sun G, Pang T, Fang J, Li G, Li Q (2017) Parameterization of criss-cross configurations for multiobjective crashworthiness optimization. *Int J Mech Sci* 124-125: 145-157.
- [13] Tang Z, Liu S, Zhang Z (2012) Energy absorption properties of non-convex multi-corner thin-walled columns. *Thin Wall Struct* 51: 112-120.
- [14] Wu S, Sun G, Wu X, Li G, Li Q (2017) Crashworthiness analysis and optimization of fourier varying section tubes. *Int J Nonlin Mech* 92:41-58.
- [15] Deng X, Liu W, Lin Z (2018) Experimental and theoretical study on crashworthiness of star-shaped

شده و سپس با استفاده از کد اجزاء محدود LS-Dyna مقایسه مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این کار پژوهشی نشان می‌دهد:

مقاطع کرکره‌ای تناوبی محیطی حاصل از دایره‌های مماس بر یکدیگر تحت بار محوری مود تغییر شکل مناسبی دارند، به طوری که مود تغییر شکل این مقاطع همراه با تاخوردگی‌های زیاد، مشابه مقاطع دایره‌ای است و از این حیث نسبت به مقاطع مربعی برتری دارند.

اگر پروفیل کرکره‌ای تناوبی محیطی حاصل از دایره‌های مماس بر یکدیگر به گونه‌ای طراحی شود که تحت بار محوری دچار مود تغییر شکل کلی نشود، نیروی ضربه‌ای متوسط با استفاده از روش‌های تئوری ارائه شده برای مقاطع دایره‌ای ساده و با معادل‌سازی تعداد دایره‌های هم قطر، قابل محاسبه است.

مقاطع کرکره‌ای تناوبی محیطی حاصل از دایره‌های مماس بر یکدیگر می‌توانند بیشتر از ۲۵٪ جذب انرژی ویژه را نسبت به پروفیل‌های چند سلول معمول بهبود بخشند، این در حالی است که راندمان نیروی ضربه‌ای نیز در این مقاطع افزایش دارد و تا میزان ۱۰٪ افزایش نسبت به پروفیل‌های معمول چند سلول نشان می‌دهد.

به دلیل یکسان بودن سطح مقطع در طول پروفیل، مقاطع کرکره‌ای تناوبی محیطی قابلیت ساخت بالایی دارند و برای مثال از این حیث نسبت به پروفیل‌ها با ضخامت متغیر یا پروفیل‌های کرکره‌ای تناوبی طولی برتری دارند.

در بارگذاری جانبی اگرچه مقدار جذب انرژی موثر حدوداً ۲۰٪ کمتر از پروفیل چند سلول معمول است، اما راندمان نیروی ضربه‌ای این مقاطع به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از پروفیل‌های چند سلول معمول است.

در بارگذاری مایل تفاوت قابل ملاحظه‌ای به لحاظ جذب انرژی ویژه و راندمان نیروی ضربه‌ای بین مقاطع کرکره‌ای تناوبی محیطی حاصل از دایره‌های مماس بر یکدیگر نسبت به پروفیل‌های چند سلول معمول وجود ندارد، هرچند برتری نسبی با پروفیل چند سلول است.

۶- مراجع

- [1] Lu G, Yu T X (2003) Energy absorption of structures and materials. Elsevier, Cambridge, England.

- [۲۲] پیرمحمد س، اسماعیلی مرزدشتی س (۱۳۹۶) مقایسه عملکرد جذب انرژی سازه‌های چندجداره مربعی و دایره‌ای با استفاده از روش کپراس و بهینه‌سازی سازه دایروی با استفاده از روش سطح پاسخ. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها ۱۴۷-۱۳۳: ۷(۳).
- [23] Tang Z, Liu S, Zhang Z (2013) Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns. *Thin Wall Struct* 62: 75-84.
- [۲۴] علوی‌نیا ع، فرشاد ع (۱۳۹۳) بررسی تجربی و عددی تاثیر هندسه مقطع و فوم فلزی بر روی تغییرشکل و ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های جدارنازک. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها ۶۳-۵۱: ۴(۱).
- [25] Zhang Z, Zhang H (2013) Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression. *Thin Wall Struct* 68: 156-163.
- [26] Jones N, Abramowicz W (1985) Static and dynamic axial crushing of circular and square tubes. Reid SR, Ed *Met Form impact Mech* 47: 225-247.
- tubes under axial compression. *Thin Wall Struct* 130: 321-331.
- [16] Deng X, Liu W, Lin J (2018) On the crashworthiness analysis and design of a lateral corrugated tube with a sinusoidal cross-section. *Int J Mech Sci* 141: 330-340.
- [17] Li Y, You Z (2018) External inversion of thin-walled corrugated tubes. *Int J Mech Sci* 144: 54-66.
- [18] Li Y, You Z (2019) Origami concave tubes for energy absorption. *Int J Solids Struct* 169: 21-40.
- [19] Li Z, Yao S, Ma W, Xu P, Che Q (2019) Energy-absorption characteristics of a circumferentially corrugated square tube with a cosine profile. *Thin Wall Struct* 135: 385-399.
- [20] Li Z, Ma W, Xu P, Yao S (2019) Crushing behavior of circumferentially corrugated square tube with different cross inner ribs. *Thin Wall Struct* 144: 106370.
- [21] Li Z, Ma W, Xu P, Yao S (2020) Crashworthiness of multi-cell circumferentially corrugated square tubes with cosine and triangular configurations. *Thin Wall Struct* 165: 105205.