



تحلیل فروریزش محوری و مایل پوسته‌های مخروطی توخالی و تقویت‌شده با فوم تحت شرایط مرزی گیردار

سجاد آذرخش^{۱*}، علی قمریان^۲ و حسین خدارحمی^۳

^۱ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

^۲ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

یادداشت پژوهشی؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱۱

چکیده

در این تحقیق، به بررسی تجربی و عددی جذب انرژی و تغییر شکل لوله‌های جدارنازک مخروطی تحت بارگذاری محوری و مایل پرداخته شده است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر تغییر شکل هندسی برای لوله‌های مخروطی گیردار بر میزان جذب انرژی و بررسی اثر فوم درون آن، برای جذب انرژی بیشتر ناشی از برخورد محوری و مایل است. در بخش تجربی، ابتدا لوله‌هایی از جنس آلومینیوم به صورت توخالی و توپر با فوم پلی‌یورتان تهیه شد و سپس آزمایش‌های شبه‌استاتیکی با نرخ بارگذاری ثابت روی نمونه‌ها انجام گرفت و نمودار نیرو- جابه‌جایی در هر آزمایش مشخص گردید. در بخش عددی، شبیه‌سازی پدیده فروریزش محوری و مایل بر مقاطع جدارنازک با نرم-افزار اباکوس صورت گرفت. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد، مدل ارائه شده روش مناسبی برای تعیین پاسخ فروریزش و تعیین نمودار نیرو- جابه‌جایی فراهم می‌کند. تأثیر پارامترهای موثر بر عملکرد جذب انرژی مخروطی توخالی و تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان با استفاده از مدل عددی بررسی می‌شود که پارامترهای مهم شامل، ضخامت دیواره و زاویه نیم‌رأس است. در ادامه تحقیق برای بررسی اثر سرعت بر پاسخ دینامیکی، از نسبت انرژی جذب شده در بارگذاری دینامیکی به انرژی جذب شده در بارگذاری شبه‌استاتیک استفاده می‌شود.

کلمات کلیدی: لوله‌های مخروطی گیردار؛ برخورد محوری و مایل؛ جذب انرژی؛ روش اجزاء محدود.

Investigation of Axial and Oblique Crushing of Empty and Foam-Filled Conical Tubes under Clamped Boundary Condition

S. Azarakhsh^{1,*}, A. Ghamarian², H. Khodarahmi³

¹ Young Researchers and Elite Club, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

² Young Researchers and Elite Club, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

³ Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Abstract

In this study, the numerical and experimental study of energy absorption and deformation of thin-walled conical tubes under axial and oblique loading is studied. The purpose of this study was to investigate the effect of geometry on the energy absorption of clamped conical tubes and effect of foam-filled tubes to absorb more energy under axial and oblique crushing. In the experimental part, empty aluminum tubes filled with solid polyurethane foam were prepared and then the quasi-static tests with static loading rates were performed on samples and the load-compression diagrams in each test were obtained. In the last part of this study simulation of the phenomenon of axial and oblique on thin sections was carried out with the ABAQUS software. The comparison of numerical and experimental results showed that the present model provides an appropriate procedure to determine the collapse mechanism and load-compression curve. The model is used to evaluate the effects of important parameters defined in empty and foam-filled clamped samples such as wall thickness and semi-apical angle of conical samples. A dynamic amplification factor is considered to relate the quasi-static results to dynamic response of conical shock absorber.

Keywords: Clamped Conical Tubes; Axial and Oblique Crushing; Energy Absorption; Finite Element Method.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۳۴۱۲۲۵۲-۰۸۶؛ فکس: ۰۲۳۴۱۳۰۵۷۸-۰۸۶

آدرس پست الکترونیک: Sajad_Azarakhsh@yahoo.com

۱- مقدمه

امروزه افزایش تعداد وسائل نقلیه و همچنین تنوع و افزایش سرعت آن‌ها، سبب انجام تصادفاتی شده است که صدماتی جدی‌تر از گذشته به انسان وارد می‌کند. از اینرو طراحی سازه‌هایی که بتوانند انرژی‌های آزاد ناخواسته را به صورت برگشت‌ناپذیر و بدون تأثیر مخرب روی محیط زیست اتلاف کنند، از اهمیت ویژه برخوردار است. سیستم‌های جاذب انرژی، می‌توانند انرژی را از طریق روش‌های مختلف تغییر شکل به پاسخ‌های جذب انرژی متفاوت تبدیل کنند. مکانیزم‌های تغییر شکل شامل، شکافتگی، خرد کردن محوری، تورفتگی جانبی، فشرده‌سازی جانبی و وارونگی است. ضربه‌پذیری سیستم جذب انرژی به‌خاطر محدودیت در مقدار نیروی قابل تحمل و میزان تغییر شکل سیستم، دارای حالت بهینه‌ای است که باید برای هر سیستم جذب انرژی ضربه، بررسی و تعیین شود [۱].

از رایج‌ترین انواع جاذب انرژی، می‌توان به سازه‌های جدار نازک اشاره کرد. سازه‌های جدارنازک، یکی از انواع جاذب‌های انرژی هستند که کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. این نوع سازه‌ها تحت بار اعمالی تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگی تحمل نموده، در نتیجه انرژی بسیاری جذب می‌کنند. رفتار این نوع سازه‌ها تحت انواع مختلف بارگذاری در سال‌های متمادی، مورد بررسی قرار گرفته است. وزن و حجم کم، در دسترس بودن و صرفه اقتصادی، مزیتی است که سبب شده تا تحقیقات برای استفاده از سازه‌های جدارنازک و در جهت بهینه آن‌ها، همچنان مستمر باشد. در این میان طراحی، محاسبه و انجام آزمایش روی قطعات سبک و جاذب انرژی در هواپیما و بالگرد [۲]، زنده‌های بزرگراه‌ها، اتومبیل [۳] و ... موضوع بسیاری از مطالعات انجام شده در دو دهه بوده است.

به‌جز فلزات، مواد دیگر مانند، چوب، پلاستیک، مواد مرکب و پلیمرها نیز در ساخت جاذب‌های انرژی کاربرد دارند. پیشرفت تکنولوژی، منجر به ساخت مواد جدیدی شده است که تأثیرات بزرگی بر تولیدات صنعتی داشته‌اند. فوم‌ها یکی از این مواد هستند که ویژگی اصلی آن‌ها شامل، خواص جذب انرژی، عایق صوتی و خواص مکانیکی است. با توجه به گستردگی مواد فوم، تحقیقات در زمینه کاربردهای آن‌ها در سال‌های اخیر رو به گسترش بوده است [۴].

آذرخش و همکارانش [۵] به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لهیدگی پوسته‌های استوانه‌ای تک‌جداره برنجی پرداختند. در این تحقیق اثر پارامترهای مهم مانند عیوب هندسی (گرادپان ضخامت، تغییرشکل موجی)، شرایط مرزی، زاویه‌ی نیم‌رأس، زاویه‌ی برخورد، تقویت‌کننده‌های چند سلولی ستونی و سرعت برخورد مورد بررسی قرار گرفت. آذرخش و همکارانش [۶] به مطالعه‌ی رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای دوجداره برنجی تحت بارگذاری محوری پرداختند. در این تحقیق اثر عوامل هندسی نظیر ضخامت، زاویه‌ی نیم‌رأس و همچنین سرعت و جرم برخورد کننده بر نسبت انرژی جذب شده دینامیکی به استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت.

آذرخش و همکارانش [۷] به بررسی تجربی و عددی جذب انرژی لوله‌های جدارنازک مخروطی تک‌جداره تحت بارگذاری محوری و مایل پرداختند. در این تحقیق بارگذاری مایل در زوایای مختلف بر روی نمونه‌های استوانه‌ای و مخروطی صورت گرفت و همچنین اثر سرعت برخوردکننده بر میزان جذب انرژی لوله‌های توخالی و پر شده با فوم در بارگذاری محوری و مایل مورد بررسی قرار گرفت.

آکتای^۱ و همکارانش [۸]، بر مقاطع جدار نازک و فوم پلی‌استایرن تحقیق کردند و نشان دادند که مقاطع پر شده از فوم در جذب انرژی، رفتار بهتری از خود نشان می‌دهند. هانسن^۲ و همکارانش [۹]، اثر چگالی فوم را در جذب انرژی مقاطع جدار نازک پر شده از فوم آلومینیومی بررسی کردند. ژانگ^۳ و همکارانش [۱۰]، مقاطع مربعی پر شده از فوم را مورد بررسی قرار داده، نشان دادند که مقاطع مربع جدارنازک پر شده با فوم فلزی نسبت به لوله‌های بدون فوم از نظر جذب انرژی، رفتار بهتری از خود نشان می‌دهند.

قمریان و ابدی^۴ [۱۱]، به بررسی عددی و آزمایشگاهی لوله‌های استوانه‌ای سر بسته تحت بارگذاری محوری پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیشینه نیروی اولیه لوله‌های سر بسته توخالی و تقویت شده با فوم، ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر از لوله‌های سر باز است.

¹ L. Aktay

² A.G. Hanssen

³ Z. Chun-ji.

⁴ A. ghamarian and M.T. Abadi

با سطح مقطع مستطیلی تحت بارگذاری شبه‌استاتیک و دینامیکی پرداختند. در این مقاله، شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی و تئوری مقالات پیشین مقایسه شد. نتایج نشان داد، تطابق خوبی بین حل عددی، تئوری و آزمایشگاهی فروریزش پوسته‌های مخروطی وجود دارد؛ بنابراین در مرحله بعد مطالعه‌ی اثر پارامترهای هندسی، شرایط مرزی و ماده بر فروریزش پوسته‌های مخروطی تحت بارگذاری محوری بررسی شد.

نداف اسکویی^۶ و همکارانش [۱۸]، به مطالعه رفتار فروریزشی و جذب انرژی پوسته مخروطی سربسته به صورت عددی و تجربی پرداختند. در این مقاله، اثر سرعت برخورد و جرم ضربه‌زن بر رفتار نمونه‌ها بررسی گردید. علاوه بر آن با معکوس قرار دادن نمونه‌های مخروطی در برابر ضربه‌زن، اثر اعمال نیرو بر رفتار فروریزش آن‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها با مود الماسی و الگوی چهارگوش فروریزش می‌کند که مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارند. همچنین این محققان نشان دادند که تأثیر ضخامت، بیشترین اثرگذاری را روی رفتار فروریزشی دارد. محمد شریف^۷ و همکارانش [۱۹]، مقاله‌ای با عنوان بهینه‌سازی پوسته مخروط ناقص جدارنازک برحسب میزان انرژی جذب شده تحت اثر برخورد محوری ارائه دادند. در این مقاله، تأثیر تنش جریان^۸ مواد روی انرژی جذب‌شده برای نمونه‌های مخروطی از جنس روی، آلومینیوم و فولاد نرم نیز بررسی شده است.

با توجه به مقدمه پژوهش، تحقیقات زیادی بر روی میزان جذب انرژی و فروریزش لوله‌های مخروطی یکسرگیردار صورت گرفته است [۱۲ و ۱۴]، اما تاکنون تحقیقی راجع به فروریزش لوله‌های مخروطی دوسرگیردار تحت بارگذاری محوری و مایل ارائه نشده است. بنابراین در ادامه تحقیقات پیشین، این پژوهش نیز انجام می‌شود که هدف آن، بررسی اثر تغییرشکل هندسی برای لوله‌های مخروطی گیردار بر میزان جذب انرژی و بررسی اثر فوم درون آن برای جذب انرژی بیشتر ناشی از برخورد محوری و مایل است.

قمریان و همکاران [۱۲]، به‌طور عددی و تجربی کماتش پوسته‌های مخروطی سربسته با و بدون فوم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که انرژی جذب‌شده لوله‌های تقویت شده با فوم، بیشتر از مجموع انرژی‌های لوله توخالی و فوم پر شده در آن است. آن‌ها مشاهده کردند که در مقایسه مخروط و استوانه در تست له‌شوندگی، جذب انرژی پوسته استوانه‌ای بدون فوم به مقدار ۱۸/۴ درصد، کمتر از پوسته مخروطی است و پوسته مخروطی دارای فوم در مقایسه با پوسته استوانه‌ای، بازده جذب انرژی بیشتری را به‌همراه دارد.

تیب‌وون پیتوک و چومکوا^۱ [۱۳]، مطالعه تجربی و عددی بر رفتار پوسته‌های استوانه‌ای و مخروطی با ضخامت متغییر در طول پوسته تحت بار محوری را انجام دادند. آن‌ها دریافته‌اند که تغییر شکل پوسته استوانه‌ای با ضخامت متغییر در طول آن با افزایش جذب انرژی و در پوسته مخروطی با کاهش جذب انرژی همراه است.

قمریان و زارعی^۲ [۱۴]، رفتار فروریزش لوله‌های استوانه‌ای و مخروطی سربسته را به‌منظور یافتن هندسه‌ای با بیشینه انرژی ویژه جذب شده بررسی کردند. دادرسی^۳ [۱۵]، تغییرشکل پوسته‌های مخروطی ترک‌دار و بدون ترک را تحت بار فشاری با استفاده از نرم افزار آباکوس مورد تحلیل قرار داد و دریافت که پس از ایجاد پدیده کماتش، ظرفیت تحمل بار پوسته، به شدت کاهش می‌یابد و نتایج عددی و تجربی به دلیل عیوب ساخت در قطعه، فاصله نسبتاً زیادی با یکدیگر داشتند.

تاجداری^۴ و همکاران [۱۶] نیز، به بررسی عددی و تجربی کماتش پوسته‌های جدارنازک استوانه‌ای فولادی با گشودگی‌های مثلثی تحت فشار محوری پرداختند. مشاهدات آن‌ها نشان داد که تطابق قابل توجهی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد.

میرفندسکی^۵ و همکارانش [۱۷]، در مقاله‌ای به بررسی رفتار فروریزش پوسته‌های مخروطی توخالی و پر شده از فوم

¹ C. Thinvongpituk and V. Chomkwah

² H. R. Zarei

³ A. Dadrasi

⁴ M. Tajdari

⁵ L. Mirfendereski

⁶ A. Naddaf Oskouei

⁷ N. Mohamed Sheriff

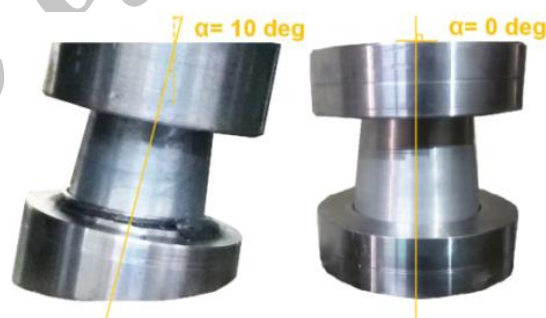
⁸ Flow Stress

۲- روش آزمایش

۲-۱- معرفی نمونه

نمونه‌های مخروطی آزمایشگاهی مطابق شکل ۱، از جنس آلومینیوم سری ۱۰۵۰ (با خلوص ۹۹/۵ درصد آلومینیوم) با زاویه نیم‌رأس ۵ درجه انتخاب شده است که به روش چرخ‌کاری دستی^۱ ساخته شده‌اند. میانگین ابعاد هندسی نمونه‌ها، در جدول ۱ آورده شده است.

چرخ‌کاری روش اقتصادی برای تولید تعداد محدود و نمونه‌سازی قطعات فلزی متقارن محوری است. در این فرآیند، ورق مسطح در اثر تماس ابزار روی سطح قالب شکل داده می‌شود؛ به طوری که ورق همراه با قالب دوران می‌کند. ابزار که به شکل اهرم یا غلتک است، به صورت محوری و یا شعاعی حرکت داده می‌شود و تغییر شکل پلاستیک در اثر تماس نقطه‌ای و با اعمال نیرو به ورق ایجاد می‌شود. در این تحقیق، حرکت ابزار روی ورق در فرآیند چرخ‌کاری به روش دستی انجام می‌شود. به طوری‌که نیروی لازم برای تغییر شکل ورق، توسط اپراتور تأمین می‌شود.



شکل ۱- شمایی از پوسته‌ی مخروطی و شرایط مرزی آن

جدول ۱- ابعاد هندسی پوسته‌ی مخروطی مورد مطالعه

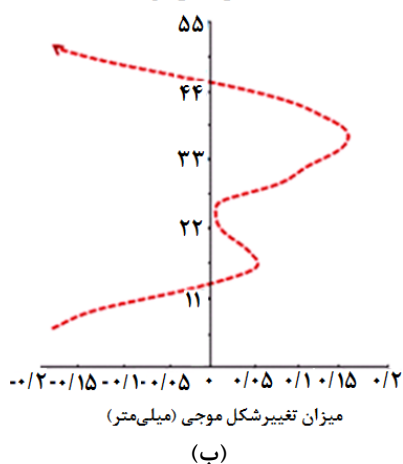
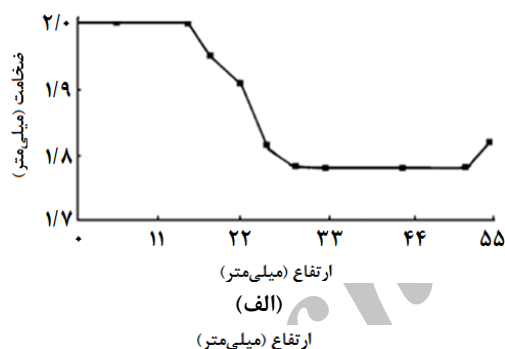
ارتفاع	قطر بخش فوقانی	قطر بخش تحتانی	ضخامت بخش فوقانی	ضخامت بخش تحتانی
۵۵	۶۰	۵۰	۲/۰	۱/۸

از جمله معایب ساخت نمونه مخروطی روش چرخ‌کاری دستی، تغییر شکل سطحی (برآمدگی یا تغییر شکل موجی) و تغییر ضخامت دیواره نمونه مخروطی است. نتایج

^۱ Manual Spinning

اندازه‌گیری ابعاد به کمک دستگاه تعیین مختصات دقیق نشان می‌دهد که فرآیند چرخ‌کاری ورق آلومینیوم، باعث کاهش ضخامت دیواره پوسته‌های مخروطی می‌شود. نحوه اندازه‌گیری ضخامت توسط دستگاه اندازه‌گیری، به این صورت است که در اثر برخورد حسگر در چند راستا، نقاطی از سطح داخلی و خارجی پوسته مخروطی ذخیره می‌شود که میانگین اختلاف آن‌ها، بیان‌گر ضخامت در طول دیواره مخروط است. شکل ۲-الف، تغییر ضخامت سطح دیواره پوسته مخروطی را نشان می‌دهد.

شکل ۲-ب نیز، منحنی نقاط ثبت شده توسط حسگر را در طول نمونه مخروطی نشان می‌دهد که بیان‌گر میزان برآمدگی دیواره نمونه مخروطی است. در این شکل محور افقی بیان‌گر، میزان تغییر شکل موجی سطح دیواره مخروطی است. در تحقیق حاضر در دیواره تمامی نمونه‌های چرخ‌کاری شده دو موج مشاهده شد، به طوری که محل تشکیل این موج‌ها در هر نمونه متفاوت است.



شکل ۲- عیوب هندسی ناشی از فرآیند ساخت الف) تغییر ضخامت و ب) میزان برآمدگی سطح پوسته‌ی مخروطی

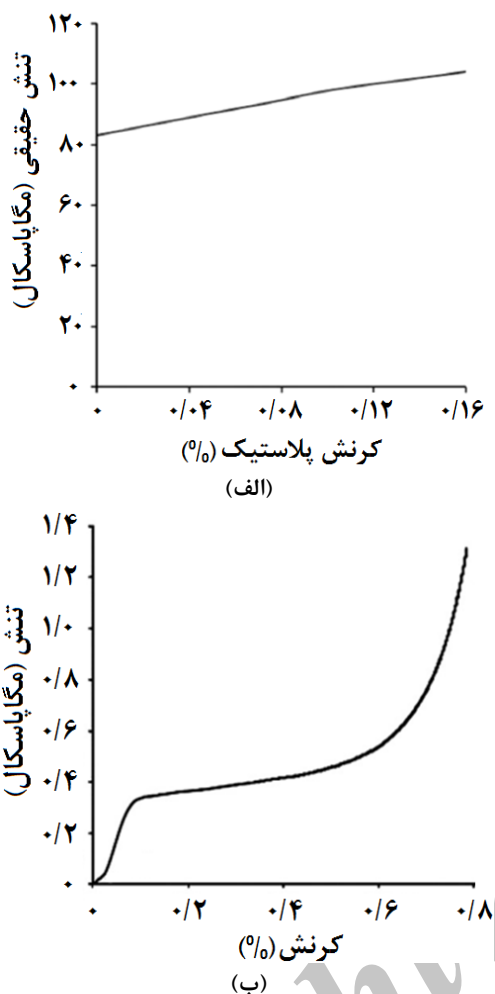
۲-۲- خواص مکانیکی

برای شناسایی خواص مکانیکی، ابتدا یکی از نمونه‌ها با روش وایرکات و طبق استاندارد JANAF برش داده شده، تعداد سه نمونه استاندارد برای انجام تست کشش آماده‌سازی شد. شکل ۳-الف، منحنی تنش حقیقی-کرنش پلاستیک یکی از نمونه‌ها را بعد از تست کشش نشان می‌دهد. با میانگین گرفتن از نتایج آزمایش‌های انجام شده، مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب برابر، ۸۳ و ۱۰۵ مگاپاسکال به دست آمد.

خواص مکانیکی فوم پلی‌یورتان، با استفاده از آزمایش فشار براساس استاندارد ASTM D1621/69 تعیین شد. طول، عرض و ارتفاع این نمونه‌های فوم براساس این استاندارد به ترتیب، ۵۰، ۵۰ و ۳۰ میلی‌متر تعیین شد. در این تحقیق، از فوم پلی‌یورتان سخت با دانسیته‌های ۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است. چگالی فوم‌های پلی‌یورتان به صورت نسبی تعیین شده‌اند که برابر جرم مکعب فوم بر حجم آن است. مطابق شکل ۳-ب، نمودار تنش-کرنش فوم مورد استفاده، دارای بخش الاستیک خطی اولیه، مسطح و متراکم است. در ناحیه مسطح با افزایش مقدار بار تا زمانی ادامه دارد که دیواره سلول‌ها با هم تماس پیدا می‌کند. در این ناحیه، افزایش کرنش و تخریب سلول‌ها تقریباً در یک تنش ثابت صورت می‌گیرد. با افزایش بار و تماس دیواره‌های سلول‌ها وارد ناحیه متراکم شده می‌شود که این ناحیه با رشد سریع تنش همراه است و در نتیجه منحنی در این ناحیه با شیب تند افزایشی خواهد شد.

۳-۲- شرایط مرزی

در تحقیق حاضر، از شرایط تکیه‌گاهی برای مقید کردن پوسته‌های مخروطی استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، حرکت شعاعی در جهت افزایش قطر قاعده کوچک و بزرگ نمونه‌ها، کاملاً مقید می‌شود که اصطلاحاً شرط مرزی دوسرگیردار خوانده می‌شود. برای برقراری این شرایط مرزی، از قطعه‌ای فولادی برای مقید کردن قاعده‌های نمونه‌های مخروطی استفاده شده است. در سطح این قطعه، شیاری هم‌قطر با قاعده‌های نمونه‌های مخروطی به عمق ۳ میلی‌متر تراشیده شده است تا از حرکت افقی و عمودی قاعده‌ها در طی فروریزش آن جلوگیری شود.



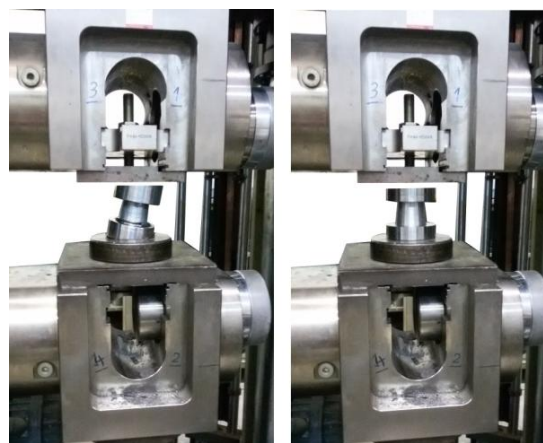
شکل ۳- خواص مکانیکی بدست آمده از آزمایش الف) کشش پوسته‌ای آلومینیومی و ب) فشار فوم پلی‌یورتان

هدف اصلی این پژوهش، مطالعه اثر زاویه برخورد و پرکننده فوم پلی‌یورتان بر رفتار مکانیکی پوسته‌های مخروطی جاذب است؛ بنابراین مطابق شکل ۱، دو زاویه برخورد ۰ و ۱۰ درجه مورد توجه قرار گرفته است. آزمایش برای دو حالت با و بدون فوم انجام گرفته است. به منظور ساده‌سازی شرایط، برای هر حالت، یک کد تعریف شده است. حرف CT، مربوط به نمونه‌های توخالی و حرف FCT، مربوط به نمونه‌های تقویت شده با فوم است. حروف $\alpha 0$ و $\alpha 10$ نیز به ترتیب، بیانگر زاویه برخورد ۰ و ۱۰ درجه است. لازم به یادآوری است که تمام ابعاد هندسی نمونه‌ها در تمامی شرایط، یکسان در نظر گرفته شده است.

۴-۲- شیوه بارگذاری

برای اعمال بارگذاری شبه‌استاتیکی مطابق شکل ۴، از دستگاه زوئیک مدل HCT60 دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شده است. این دستگاه، مجهز به نرم‌افزار اعمال بار استاتیکی و شبه‌استاتیکی، جابه‌جایی و اخذ نتایج خروجی دستگاه است. کنترل دستگاه، توسط نرم‌افزار مربوط به آن صورت می‌گیرد. این نرم‌افزار قادر به تهیه گزارش کاملی از آزمایش‌های انجام شده است و توانایی ثبت داده‌های حاصل از آزمایش به صورت نمودار را دارد. عرض، عمق و ارتفاع این مدل دستگاه بدون در نظر گرفتن لوازم جانبی به ترتیب، ۷۰۰، ۵۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌متر است که دارای دو فک فوقانی و تحتانی است. فک تحتانی دستگاه ثابت و فک فوقانی متحرک است و می‌تواند با سرعت ثابت یا متغیر، مسافت تعریف شده را طی کند. اعمال نیروی فشاری تا سقف ۶۰ تن در این دستگاه توسط سیستم هیدرولیک با سرعت ۰/۵ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه میسر است.

در این مطالعه، نمونه مورد نظر به همراه شرایط تکیه‌گاهی بین دو فک قرار گرفته، نمودار نیرو- جابه‌جایی در حین تغییر شکل توسط نرم‌افزار دستگاه استخراج می‌شود. در این مطالعه، به منظور بررسی فروریزش شبه‌استاتیک پوسته‌های مخروطی سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و مسافت که فک طی می‌کند، ۳۳ میلی‌متر معادل ۶۰ درصد ارتفاع اولیه نمونه‌ها انتخاب شده است.



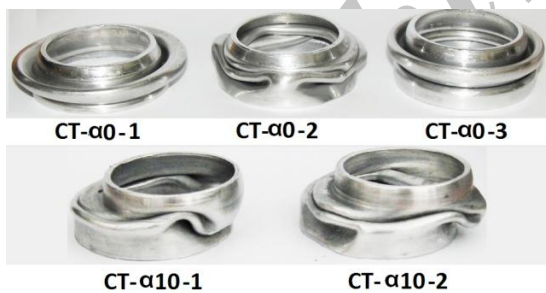
شکل ۴- شمایی از نحوه بارگذاری پوسته‌های مخروطی با زاویه برخورد متفاوت

۳- نتایج آزمایش

برای اطمینان از صحت نتایج، برای هر یک از حالت‌های مطرح شده، دو آزمایش انجام شده است و مقادیر میانگین کمیت‌های مورد نظر (انرژی جذب‌شده، نیروی میانگین لهدیگی، نیروی بیشینه لهدیگی) ثبت شده است.

۳-۱- نتایج آزمایش نمونه‌های بدون فوم

شکل ۵ فروریزش نهایی نمونه‌های مخروطی بدون فوم را تحت بارگذاری محوری و مایل ۱۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فروریزش نمونه‌های مخروطی CT-α0-1 و CT-α0-3، از طرف قاعده کوچک آن به صورت تاخوردن یا چین ۱ موضعی متقارن محوری آغاز شده و تعداد چین خوردگی با افزایش جابه‌جایی افزایش می‌یابد، به طوری که در جابه‌جایی ۳۳ میلی‌متر، تعداد چین‌ها به ۲ چین می‌رسد. آنچه به وضوح مشخص است، تغییر شکل غیرمتقارن نمونه مخروطی CT-α0-3 است. شیوه فروریزش این نمونه مخروطی الماسی، سه گوش است. همان‌طور که در ابتدا بیان شد، ساخت نمونه‌های مخروطی به روش چرخ‌کاری دستی، سبب عیوب هندسی (برآمدگی‌های سطحی و موج‌دار) در برخی نمونه‌ها می‌شود که در آزمایش به صورت تغییر شکل غیرمتقارن در نمونه‌های مخروطی ظاهر می‌شود.



شکل ۵- فروریزش نهایی پوسته‌های مخروطی بدون فوم تحت بارگذاری محوری و مایل

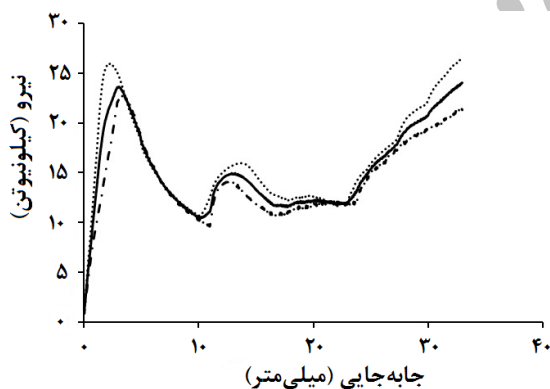
شکل ۶ نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی را تحت اثر بارگذاری محوری نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شروع بارگذاری، نیرو

^۱ Fold

میزان جذب انرژی همراه است. بدین علت طراحان همواره سعی می‌کنند با اصلاح طرح یا فرایند ساخت، از طراحی جاذب انرژی در محدوده واژگونی یا خمیدگی نمونه به شدت خودداری کنند.

شکل ۵ همچنین فروریزش نهایی نمونه‌های مخروطی را تحت بارگذاری شبه‌استاتیک مایل نشان می‌دهد. آنچه به وضوح مشخص است، تغییر شکل مایل پوسته مخروطی حول محور زاویه‌ی برخورد است. از آنجا که شرایط مرزی برای هر دو حالت نمونه‌ها، دو سرگیردار انتخاب شده است، بنابراین بدیهی است که لبه‌های هر دو قاعده کوچک نمونه‌های مخروطی، بدون تغییر شکل باقی بماند.

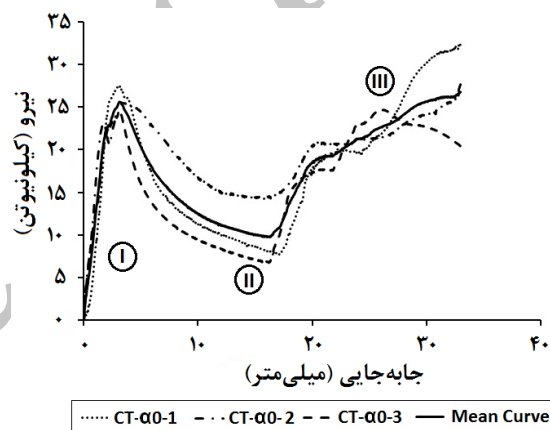
نکته قابل توجه دیگر، افزایش طول چین‌های تشکیل شده در این نوع بارگذاری نسبت به بارگذاری محوری است. از آنجا که نمونه‌های مخروطی به صورت مایل تغییر شکل می‌دهند، بنابراین با افزایش میزان جابه‌جایی، مطابق شکل ۷، مقدار بیشینه نیروی‌های نسبی ایجاد شده نسبت به اولین بیشینه نیرو به شدت کاهش می‌یابد. در نهایت با تشکیل چین داخلی نیرو و خود تماسی نمونه مخروطی، نیرو دوباره روند صعودی به خود می‌گیرد.



شکل ۷- نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی تحت اثر بارگذاری مایل ۱۰ درجه

شکل ۸ نمودارهای نیرو- جابه‌جایی فروریزش میانگین نمونه‌های مخروطی را تحت اثر بارگذاری محوری و مایل نشان می‌دهد. به‌طور کلی، اولین بیشینه نیروی فروریزش و انرژی جذب شده، وابستگی زیادی به جهت اعمال نیروی

به‌طور تقریباً خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد (ناحیه ۱). این روند تغییر نیرو، ناشی از رفتار الاستیک نمونه مخروطی تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کماتش است. در این تحقیق، فروریزش نمونه مخروطی با شرایط تکیه‌گاهی دوسرگیردار از سطح جانبی و در نزدیک به قاعده‌ی کوچک آغاز می‌شود (ناحیه ۲) که با تشکیل تغییر شکل داخلی و تماس پوسته با خودش، نیرو دوباره افزایش می‌یابد (ناحیه ۳). در حین فرآیند فروریزش، نیرو با تشکیل چین خارجی و داخلی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از سه نمودار فوق نمودار میانگینی استخراج شده است که برای مقایسه با نمودار دیگر نتایج استفاده می‌شود.

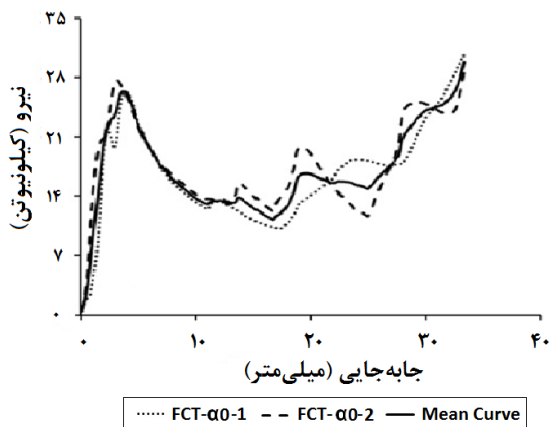


شکل ۶- نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی دو سرگیردار تحت اثر بارگذاری محوری

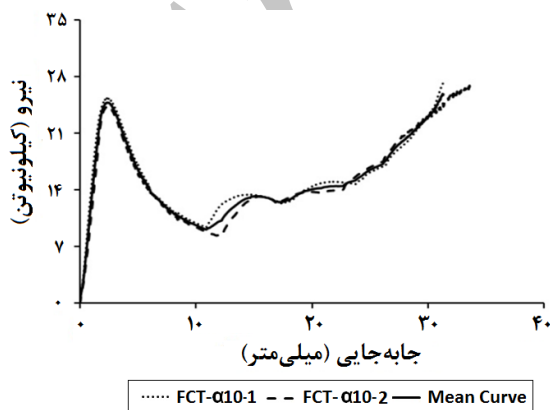
نکته قابل توجه این که در ناحیه ۲ شکل ۶ مشاهده می‌شود که روند کاهش نیرو با شیب کم و با طول جابه‌جایی زیادی اتفاق افتاده است. مشاهدات نشان می‌دهد که برآمدگی‌های سطحی مربوط به عیوب هندسی نمونه‌های توخالی سبب شده است، اولین چین در این ناحیه تشکیل شود. بعد از تشکیل چین خارجی با افزایش جابه‌جایی، نمونه مخروطی به سمت داخل واژگون می‌شود (انتهای ناحیه‌ی دوم). به‌طور کلی، می‌توان دریافت که واژگونی یا اصطلاحاً خمیدگی نمونه‌ها تحت بارگذاری محوری، سبب کاهش تعداد چین‌های متقارن محوری می‌شود. این شیوه فروریزش نسبت به فروریزش متقارن محوری و منشوری غیرمتقارن، با کمترین



شکل ۹- فروریزش نهایی پوسته‌های مخروطی با فوم تحت بارگذاری محوری و مایل

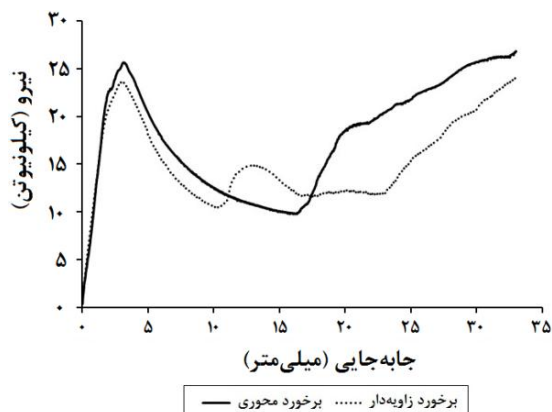


شکل ۱۰- نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی با فوم تحت اثر بارگذاری محوری



شکل ۱۱- نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی با فوم تحت اثر بارگذاری مایل ۱۰ درجه

فروریزش دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برخورد مایل سبب کاهش اولین بیشینه نیرو و انرژی جذب شده می‌شود. در این مطالعه، این مقدار کاهش نیروی فروریزش و انرژی جذب شده به ترتیب، در حدود ۵ و ۱۶ درصد است.



شکل ۸- مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی تحت اثر بارگذاری محوری و مایل

۳-۲- نتایج آزمایش نمونه‌های با فوم

شکل ۹ فروریزش نهایی نمونه‌های مخروطی تقویت شده با فوم پلی‌یورتان را تحت بارگذاری محوری و مایل نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که وجود فوم، سبب تغییر شیوه فروریزش نمونه‌های مخروطی تحت بارگذاری محوری شده است و دیگر اثری از واژگونی به داخل در نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. این درحالی است که نمونه‌های مخروطی (شکل ۵) تحت این بارگذاری به دلیل وجود عیوب هندسی، دچار این نوع شیوه فروریزش شدند.

نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های مخروطی با فوم تحت بارگذاری محوری و مایل در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. آنچه به وضوح روشن است، همگرایی نتایج هر حالت آزمایش است که این امر بیانگر، تزریق صحیح فوم و صحت نتایج تجربی است. بدیهی است که افزایش پله‌ای نمودار شکل ۱۰-الف، به دلیل شیوه فروریزش آن است. این نمونه مخروطی برخلاف دیگر نمونه‌های مخروطی، به صورت متقارن محوری یا اصلاً چین‌دار فشرده شده است. در نمودار نیرو- جابه‌جایی این نوع تغییر شکل، به دلیل تشکیل چین‌های داخلی و خارجی پوسته مخروطی نیروی فروریزش به ترتیب، افزایش و کاهش می‌یابد.

برای نیرو تعیین می‌شود که نیروی بیشینه ضربه‌گیرها باید کوچک‌تر یا مساوی با آن باشد.

جدول ۲، نتایج تجربی فروریزش نمونه‌های مخروطی با و بدون فوم تحت بارگذاری محوری و مایل آورده شده است. در این جدول، اولین بیشینه نیرو، بیشینه نیروی فروریزش، متوسط نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب شده در اثر کاهش ۶۰ درصد ارتفاع نمونه‌های مخروطی محاسبه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، وجود فوم پلی‌یورتان با چگالی ۶۵ کیلوگرم بر متر مکعب، سبب افزایش انرژی جذب‌شده می‌شود. هر چند که در این مطالعه، به دلیل استفاده از فوم با دانسیته‌ی کم، این میزان افزایش چشم‌گیر نیست. در این مطالعه، میزان افزایش جذب انرژی در نمونه‌های تقویت شده نسبت به بدون فوم برای بارگذاری محوری و مایل به ترتیب در حدود ۱۵ و ۵ درصد است. نکته جالب آنکه به علت عدم مقاومت فوم در برابر بارگذاری مایل، اثر این پارامتر بر انرژی جذب نمونه‌های مخروطی تحت بارگذاری مایل بسیار ناچیز است.

به‌طور کلی برای بررسی و کارایی ضربه‌گیرها چند تعریف عمومی وجود دارد که بدین صورت بیان می‌شود:

انرژی جذب شده: که با انتگرال‌گیری منحنی نیرو-جابه‌جایی فروریزش ضربه‌گیرها محاسبه می‌شود.

متوسط نیروی فروریزش: نیروی فروریزش ضربه‌گیر، از مشخصه‌های ضربه‌گیر است و عکس‌العمل آن موجب ایجاد شتاب‌کاهنده در وسیله‌ای می‌شود که ضربه‌گیر به آن متصل است؛ در صورتی که ضربه‌گیری به سطح صلب برخورد کند، نیروی فروریزش ضربه‌گیر، تعیین‌کننده شتاب مرکز جرم آن است. حداکثر شتاب توقف وسیله‌ای که سرعت آن توسط ضربه‌گیر کاهش می‌یابد، توسط نیروی فروریزش تعیین کرد. ضربه‌گیری ایده‌آل است که مقدار متوسط نیروی فروریزشی آن در زمان ضربه، ثابت و کوچکتر یا مساوی مقدار مجاز آن باشد.

نیروی بیشینه: حداکثر نیرو در ضربه‌گیرهای فروریزشی است. در طراحی جنس ضربه‌گیرها، یک مقدار بیشینه مجاز

جدول ۲- نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های مخروطی با و بدون فوم تحت بارگذاری محوری و مایل ۱۰ درجه

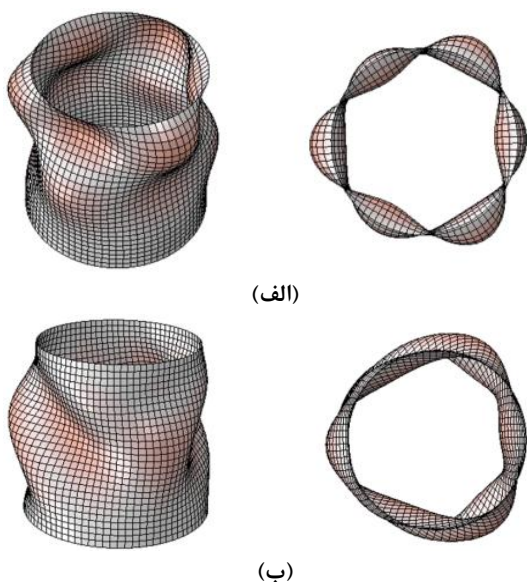
نمونه	اولین بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	نیروی بیشینه (کیلو نیوتن)	نیروی متوسط (کیلو نیوتن)	انرژی جذب شده (ژول)
CT-a0-1	۲۶/۹	۳۱/۵	۱۷/۸	۵۸۶
CT-a0-2	۲۵/۴	۲۷/۱	۱۹/۸	۶۵۳
CT-a0-3	۲۴/۶	۲۴/۷	۱۶/۱	۵۳۲
CT-a10-1	۲۵/۸	۲۶/۳	۱۶/۳	۵۳۷
CT-a10-2	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۴/۴	۴۷۶
FCT-a0-1	۲۷/۶	۳۱/۲	۲۰/۱	۶۶۴
FCT-a0-2	۲۹/۹	۳۱/۰	۲۱/۱	۶۹۶
FCT-a10-1	۲۵/۱	۲۶/۵	۱۶/۰	۵۲۸
FCT-a10-2	۲۴/۸	۲۵/۰	۱۶/۳	۵۳۸

از آنجا که فروریزش غیرممتقارن محوری نمونه‌های مخروطی ناشی از عیوب هندسی است، لازم است در نرم-افزار المان محدود این عیوب هندسی تعریف شود. بدین منظور در نرم‌افزار المان محدود، از مقادیر ویژه بارگذاری کماتش نمونه مخروطی استفاده می‌شود. برای دیدن موده‌های کماتش و استخراج مقادیر ویژه مربوط به این موده‌ها لازم است، یک بارگذاری فرضی (از نظر هندسی

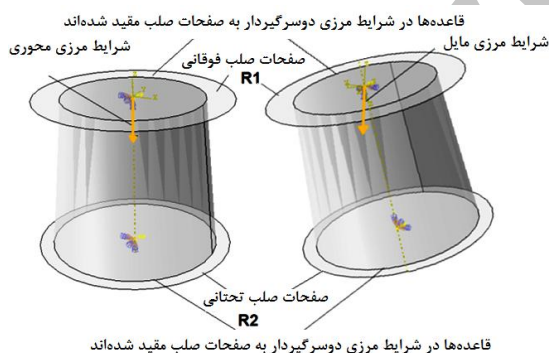
۴- شبیه‌سازی عددی

فروریزش پوسته‌های جدار نازک، بسیار پیچیده و غیرخطی است که منشأ آن رفتار غیرخطی مواد، تغییر شکل بزرگ مواد و مدل تماس بین سطوح مختلف است. فرآیند فروریزش با استفاده از نرم‌افزار اباکوس شبیه‌سازی عددی می‌شود و اثر رفتار غیرخطی مواد، تماس و تغییر شکل بزرگ در این شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

فشار یونیورسال فشرده می‌شود که این قطعات در مقایسه با نمونه اصلی، صلبیت بیشتری دارند؛ بنابراین فرض می‌شود که این قطعات (R1 و R2) در مقایسه با آن صلب است.



شکل ۱۲- مود کمانشی نمونه‌ی مخروطی دوسرگیردار تحت بارگذاری (الف) محوری و (ب) مایل ۱۰ درجه



شکل ۱۳- هندسه پوسته‌ی مخروطی سه‌بعدی تحت شرایط مرزی دوسرگیردار و بارگذاری مختلف

۲-۴- خواص مکانیکی

برای تحلیل فروریزش پوسته‌های مخروطی تقویت شده با فوم، شناسایی دقیق خواص مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده پوسته‌های مخروطی و فوم‌های تقویت‌شده در آنها ضروری است. این بخش از تحقیق حاضر به شناخت خواص

مشابه با بارگذاری اصلی) روی مدل اعمال شود؛ در صورتی که این بار فرضی (که در این مطالعه، واحد در نظر گرفته شده است) در مقدار ویژه هر مود کمانشی ضرب شود، مقدار بار لازم برای رخ دادن آن مود کمانش بدست می‌آید. از آنجا که کمانش به صورت ناگهانی رخ می‌دهد، پاسخ جسم به بارگذاری در لحظه‌ای کمانش رخ داده پیوسته نیست، این مسئله آنالیز جسم را پس از کمانش در نرم‌افزار اجزای محدود غیرممکن می‌سازد. برای حل این مشکل، پیش از آنکه بار به حد بحرانی برسد و باعث ایجاد کمانش ناگهانی شود، روی جسم یک تغییر شکل جزئی (درصدی از تغییرشکلی که قرار است پس از کمانش به صورت ناگهانی ایجاد شود) بوجود آورده می‌شود. این تغییر شکل، یک نقص هندسی در جسم ایجاد کرده، باعث می‌شود که پاسخ به بار از حالت ناپیوسته (در لحظه‌ی کمانش) به صورت پیوسته تبدیل شود. روشن است که مود کمانشی که به نتایج تجربی پوسته مخروطی نزدیک است، بایستی مورد توجه قرار گیرد. شکل ۱۲، مود دوم کمانش مورد استفاده برای فروریزش پوسته‌های مخروطی را نشان می‌دهد که انتخاب این مود کمانش، براساس شیوه فروریزش پوسته‌های مخروطی در حالت تجربی است.

همان‌طور که بیان شد، در تحلیل پس از کمانش، بایستی جزئی از تغییر شکل را که قرار است در آن رخ دهد، روی مدل اعمال کرد. در این مطالعه، برای مود کمانش شکل ۱۲، دو درصد کوچکترین بعد مشخصه که ضخامت پوسته است، به عنوان نقص اولیه در نظر گرفته می‌شود [۶]. براین اساس نرم‌افزار اجزای محدود تغییر شکل‌های مربوط به مود مورد نظر را در ضریب دو درصد ضرب کرده، این مقدار را روی پوسته مخروطی اعمال می‌کند. بدیهی است که اعمال این عیوب، سبب تغییر شکل نامتقارن آنها در نرم‌افزار اجزای محدود می‌شود. حال پس از تعریف عیوب هندسی در نرم‌افزار اجزای محدود، می‌توان مسئله فروریزش نمونه‌های مخروطی را بررسی کرد.

۱-۴- هندسه

شکل ۱۳ هندسه و بارگذاری پوسته‌های مخروطی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پوسته مخروطی بین دو قطعه مسطح متصل به فک‌های متحرک و ثابت دستگاه

مدل دوم نسبت تنش تسلیم، $\bar{\sigma}$ به صورت تابعی از نرخ تغییرات کرنش پلاستیک معادل تعریف می‌شود.

ب: معیار تسلیم فون میزز برای مواد ایزوتروپ مانند فلز آلومینیوم و معیار تسلیم هیل برای مواد غیرایزوتروپ مانند فوم‌ها، استفاده می‌شود.

ج: کرنش سختی ایزوتروپیک به این معنی که سطح تسلیم با وارد شدن ماده به ناحیه پلاستیک و افزایش کرنش پلاستیک بزرگ می‌شود، برای این مدل تابع تسلیم به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$f(\sigma) = \sigma^0 (\bar{\epsilon}^{pl}, \theta) \quad (4-1)$$

کرنش پلاستیک معادل، $\bar{\epsilon}^{pl}$ با مساوی قرار دادن کار پلاستیک در حالت کشش تک محوری با حالت کلی طبق رابطه‌ی زیر، به دست می‌آید:

$$\sigma^0 \bar{\epsilon}^{pl} = \sigma : \epsilon^{pl} \quad (5-1)$$

مشاهده شده است که در فلزات وقتی تنش بیش از مقدار تسلیم باشد، سطح تسلیم در یک جهت گسترش می‌یابد و از سمت مقابل کوچک می‌شود. این پدیده اثر باشینگر^۱ نام دارد، در این پدیده فرض می‌شود که مرکز سطح تسلیم جابجا شده است و مدلی که بر این مبنا پیشنهاد شده، مدل کرنش سختی بی‌نهایت است.

۴-۲-۲-۲-۴ فوم پلی‌یورتان

رفتار الاستیک و پلاستیک فوم پلی‌یورتان در نرم‌افزار المان محدود به صورت زیر تشریح می‌شود:

رفتار الاستیک: رفتار الاستیک برای فوم پلی‌یورتان طبق رابطه‌ی زیر به صورت خطی تعریف می‌شود:

$$\sigma = 2G(\epsilon_{dev} - \epsilon_{pl,dev}) - K(\epsilon_{vol} - \epsilon_{pl,vol})I \quad (6-1)$$

به طوری که $\epsilon_{pl,dev}$ ، ϵ_{vol} ، $\epsilon_{pl,dev}$ ، ϵ_{dev} ، $\epsilon_{pl,vol}$ به ترتیب بیانگر تانسور کرنش انحرافی، تانسور کرنش پلاستیک انحرافی، تانسور کرنش حجمی و تانسور کرنش پلاستیک حجمی هستند و σ ، G ، K به ترتیب تانسورهای تنش مرتبه دوم و مدول برشی و مدول حجم فوم هستند. در این رابطه I تانسور همانی است.

مکانیکی مواد استفاده شده در پوسته و فوم تقویت‌شده در آن می‌پردازد.

۴-۲-۱-۲-۴ پوسته‌ی آلومینیومی

برای یک پوسته‌ی آلومینیومی که در بارگذاری دچار تغییرشکل و کرنش بزرگ می‌شود، نرخ کرنش مجموع نرخ کرنش الاستیک و نرخ کرنش پلاستیک است.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^{el} + \dot{\epsilon}^{pl} \quad (1-1)$$

به این ترتیب می‌توان رفتار ماده را در دو حالت الاستیک و پلاستیک به طور جداگانه بررسی کرد.

رفتار در ناحیه الاستیک: رفتار فلز آلومینیوم در ناحیه‌ی الاستیک به صورت خطی است:

$$\sigma = D^{el} : \epsilon \quad (2-1)$$

در رابطه‌ی فوق D^{el} تانسور مرتبه‌ی چهار الاستیسیته و σ ، ϵ به ترتیب تانسور مرتبه‌ی دوم تنش و کرنش هستند، برای این مواد همسانگرد ماتریس الاستیسیته با دو ثابت ماده، به طور کامل مشخص می‌شود.

رفتار در ناحیه‌ی پلاستیک: با تعیین سه خاصیت زیر رفتار فلز آلومینیوم در ناحیه‌ی پلاستیک مشخص می‌شود:

الف- وابستگی به نرخ تغییرات کرنش

ب- معیار تسلیم (فون میزز- هیل^۱)

ج- قانون کرنش سختی ایزوتروپیک^۲ - سینماتیک^۳

الف: برای اعمال وابستگی رفتار ماده به نرخ تغییرات کرنش دو مدل ارائه می‌شود، در مدل اول استحکام تسلیم وابسته به نرخ تغییرات کرنش است. یکی از اشکال ریاضی این مدل به صورت زیر است:

$$\dot{\epsilon}^{pl} = D \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma^0} - 1 \right)^n \quad \text{for } \bar{\sigma} > \sigma^0 \quad (3-1)$$

که $\dot{\epsilon}^{pl}$ نرخ تغییرات کرنش پلاستیک معادل، $\bar{\sigma}$ تنش تسلیم در نرخ تغییرات کرنش پلاستیک غیر صفر، $\sigma^0(\bar{\epsilon}^{pl}, \theta, f_i)$ تنش تسلیم استاتیکی (که می‌تواند به کرنش پلاستیک معادل $\bar{\epsilon}^{pl}$ ، کرنش سختی ایزوتروپیک به دما θ و دیگر متغیرهای حالت f_i وابسته باشد) هستند. در

¹ Hill

² Isotropic Strain Hardening

³ Kinematic Strain Hardening

⁴ Bauchinger

مدل فوم تغییر شکل یافته همراه کارسختی ایزوتروپیک: مدل کارسختی ایزوتروپیک توسط داشپند و فلک [۲۰] ارائه شد. همان‌طور که قبلاً بیان شد در مدل کارسختی ایزوتروپیک فرض می‌شود رفتار مواد در کشش و فشار مشابه یکدیگرند و صفحه‌ی تسلیم بیضی است که در مرکز صفحه‌ی تنش $p-q$ تحت تابع کرنش پلاستیک محوری شکل می‌گیرد. در این حالت پارمتر B به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$B = \alpha p^c = \sigma^c \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2} \quad (10-1)$$

ضریب α با استفاده از تنش تسلیم اولیه در آزمون فشار محوری σ_0^c و فشار هیدرواستاتیک p_0^c به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{9-k}} \quad (11-1)$$

به طوری که k نسبت تنش بحرانی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k = \frac{\sigma_0^c}{p_0^c} \quad (12-1)$$

این نسبت برای صفحه تسلیم بین ۰-۳ واقع است. برای بسیاری از فوم‌های دانسیته پایین مانند فوم پلی‌یورتان صفحه تسلیم اولیه به صورت دایره‌ای در صفحه تنش $p-q$ واقع است در این صورت مقدار ضریب شکل بیضی (α) نزدیک به واحد است.

پارامتر β در معادله برای کارسختی ایزوتروپیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1+v_{pl}f}{1+v_{pl}f}} \quad (13-1)$$

نسبت پواسون پلاستیک v_{pl} نسبت کرنش پلاستیک به طول تحت فشار است. محدوده‌ی $v_{pl} > 0.5$ مربوط به جریان پلاستیک^۱ تراکم‌ناپذیر است.

به طور کلی، نرخ کرنش پلاستیک تابعی از پارامترهای پتانسیل سیلان است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{\epsilon}_{pl} = \dot{\lambda} \frac{\delta g}{\delta \sigma} \quad (14-1)$$

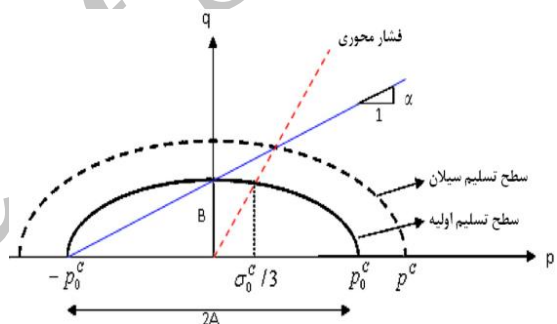
که در آن $\dot{\lambda}$ ضریب پلاستیک سیلان است. کار سختی فوم به صورت، $\sigma_c = \sigma_c(\bar{\epsilon}_{pl})$ تعریف می‌شود که در آن $\bar{\epsilon}_{pl}$

رفتار پلاستیک: به طور کلی سطح تسلیم و پتانسیل سیلان برای مدل فوم تغییر شکل یافته به صورت زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$f = \sqrt{q^2 + \alpha^2 p^2} - B \quad (7-1)$$

$$g = \sqrt{q^2 + \beta^2 p^2} \quad (8-1)$$

که در آن p و q به ترتیب فشار و تنش فون میز است. همان‌طور که مشخص است در این روابط f و g هر یک نمایش‌دهنده‌ی بیضی در صفحه‌ی تنش $p-q$ هستند، به طوری که α و β به ترتیب بیانگر ضریب شکل بیضی تسلیم و پتانسیل سیلان و B طول محور تنش بیضی تسلیم است. شماتیک سطح تسلیم و پتانسیل سیلان در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، بیضی پتانسیل سیلان در مبدأ مختصات واقع شده است.



شکل ۱۴- سطح تسلیم و پتانسیل سیلان برای مدل کارسختی ایزوتروپیک فوم تغییر شکل یافته

در شکل (۱۴) p^c و B پارامترهای بیضی تسلیم مربوط به استحکام تسلیم در فشار هیدرواستاتیک است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$B = \alpha A = \alpha p^c \quad (9-1)$$

در این رابطه p^c کمیتی مثبت و A طول محور فشار بیضی تسلیم است. نکته‌ی مهم این است که ضریب شکل بیضی (α) در فرآیند تغییر شکل پلاستیک ثابت است و بیضی تسلیم توسط اندازه‌ی کرنش پلاستیک، $\bar{\epsilon}_{pl}$ ، کنترل می‌شود. $\bar{\epsilon}_{pl}$ کرنش پلاستیک معادل برای مدل کارسختی ایزوتروپیک است. بنابراین برای تعریف کارسختی فوم، قسمتی از منحنی تنش محوری- کرنش پلاستیک آزمون فشار تک‌محوری لازم است.

¹ Incompressible Plastic Flow

۴-۳- تعریف المان بندی

برای شبیه‌سازی سه‌بعدی پوسته مخروطی، از المان‌های پوسته‌ای چهارگوش (S4R) به اندازه 0.8×0.8 میلی‌متر مربع استفاده می‌شود. به طوری که المان‌های چهارگوش پوسته‌ای، دارای چهار گره هستند؛ همچنین در این شبیه‌سازی برای صفحات صلب از المان صلب (R3D4) استفاده شده است. فوم پلی‌یورتان نیز در مدل سه‌بعدی با المان آجری هشت گره‌ای (C3D8R) به اندازه 1×1 میلی‌متر مربع مدل‌سازی می‌شود. در شبیه‌سازی حاضر، از انتگرال‌گیری با مرتبه کم و قابلیت ساعت شنی^۲ نیز استفاده شده است.

۴-۴- تماس

الف- تماس دو سطح مختلف^۳: بین سطح بیرونی نمونه مخروطی با صفحه صلب فوقانی و همچنین بین سطح درونی پوسته مخروطی با سطح بیرونی فوم، تماس صفحه به صفحه تعریف شده است. ضریب اصطکاک برای این نوع تماس به ترتیب، 0.15 و 0.2 در نظر گرفته شده است [۱۴]. همچنین بین سطح فوقانی و تحتانی فوم پلی‌یورتان با سطوح صلب مجاورشان، تماس تعریف شده است. ضریب اصطکاک نیز مطابق نتایج شبیه‌سازی دیگر محققان، 0.15 در نظر گرفته شده است [۱۴].

ب- خود تماسی^۴: در این شبیه‌سازی، احتمال تماس یافتن سطوح پوسته مخروطی و همچنین فوم پلی‌یورتان با خودش پیش‌بینی شده است. برای این نوع تماس، ضریب اصطکاک در نظر گرفته نشده است [۱۴].

۴-۵- شرایط مرزی و بارگذاری

هر صفحه صلب ممکن است شش درجه آزادی شامل، سه مولفه جابه‌جایی و سه مولفه دوران داشته باشند. در تحلیل فروریزش پوسته مخروطی، سطح صلب تحتانی به فک ثابت دستگاه متصل است. پس کلیه درجات آزادی آن مقید می‌شود. از طرف دیگر، سطح صلب فوقانی به فک متحرک متصل است که کلیه درجات آزادی آن غیر از جابه‌جایی در

کرنش پلاستیک معادل است. به طور کلی فرض می‌شود، نرخ کرنش پلاستیک معادل تابعی از کار پلاستیک معادل است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_c \overline{\dot{\epsilon}}_{pl} = \sigma : \dot{\epsilon}_{pl} \quad (15-1)$$

کرنش پلاستیک معادل برابر مقدار کرنش پلاستیک محوری در آزمون کشش و فشار است.

پلاستیک سیلان زمانی در نظر گرفته می‌شود که مقدار β برابر α شود. به طور کلی پلاستیک سیلان در زمانی که ضریب شکل سطح تسلیم مستقل از نسبت ضریب پواسون باشد، در نظر گرفته نمی‌شود. برای بیشتر فوم‌های با دانسیته‌ی پایین مانند فوم پلی‌یورتان ضریب نسبت پواسون نزدیک به صفر است که در این حالت $\beta = \frac{9}{2}$ است.

با توجه به موارد ذکر شده درباره خواص مکانیکی مواد (پوسته آلومینیومی و فوم)، رفتار الاستیک خطی ماده آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان با استفاده از مدول الاستیسیته و ضریب پواسون تعریف می‌شوند. مدول الاستیسیته برای آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان با دانسیته ۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب بر اساس نتایج آزمایشگاهی به ترتیب برابر 70 و $5/5$ مگاپاسکال گزارش شده است؛ همچنین در تحقیق حاضر، ضریب پواسون در ناحیه خطی برای آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان به ترتیب، 0.3 و 0 در لحاظ شده است. ضریب پواسون برای فوم پلی‌یورتان به معنی، عدم تغییر ابعاد فوم در منطقه‌ی الاستیک است [۱۴]. در نرم‌افزار المان محدود برای معرفی ناحیه پلاستیک آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان به ترتیب، منحنی تنش حقیقی- کرنش پلاستیک نمونه‌های کشش (شکل ۳-الف) و فشار ساده (شکل ۳-ب) استفاده می‌شود. برای محاسبه کرنش پلاستیک هر نقطه کفایت، کرنش واقعی از کرنش الاستیک آن نقطه کم شود. همچنین در نرم‌افزار المان محدود مدل‌های پلاستیسیته و فوم تغییر شکل یافته^۱ به ترتیب برای نمونه‌های آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر برای مدل فوم تغییر شکل یافته با توجه به دانسیته کم فوم پلی‌یورتان، نسبت تنش تسلیم و نسبت ضریب پواسون پلاستیک، صفر [۱۴] در نظر گرفته شده است.

² Hour Glass

³ Surface to Surface

⁴ Self Contacting

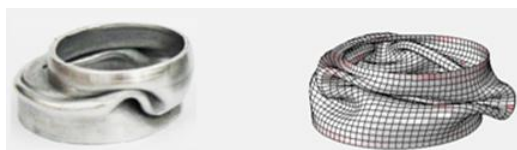
¹ Crushable Foam

الف- وجود عیوب و نقص اولیه: همانطور که بیان شد، نمونه‌های مخروطی ساخته شده به روش چرخ‌کاری، دارای نقص اولیه (شامل تغییر غیرخطی ضخامت، برآمدگی سطح و غیره) است. در این شبیه‌سازی، نقص‌های اولیه به صورت دو درصد ضخامت در تغییر شکل مود کم‌انرژی به نرم‌افزار المان محدود اعمال شده است.

ب- تماس بین پوسته مخروطی و فوم پلی‌یورتان: در شبیه‌سازی حاضر، تماس بین پوسته مخروطی و فوم با تعریف ضریب اصطکاک و نیروی برشی مدل شده است، در صورتی که در حالت واقعی، به هنگام تشکیل فوم، نیروی فشاری به پوسته مخروطی وارد می‌شود که سبب عدم جدایش فوم از پوسته مخروطی می‌شود.

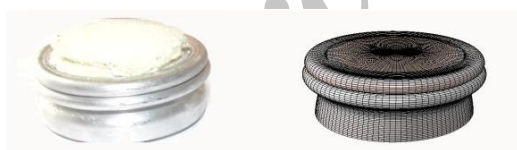


(الف)

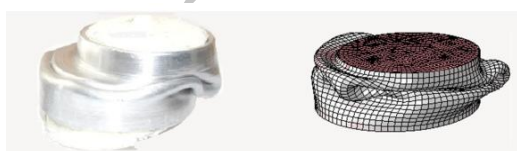


(ب)

شکل ۱۵- مقایسه فروریزش نهایی نمونه مخروطی بدون فوم تحت بارگذاری (الف) محوری و (ب) مایل ۱۰ درجه



(الف)



(ب)

شکل ۱۶- مقایسه فروریزش نهایی نمونه مخروطی با فوم تحت بارگذاری (الف) محوری و (ب) مایل ۱۰ درجه

راستای محوری و راستای مایل مقید شده است. همانطور که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود، بارگذاری به صورت جابه‌جایی معین صفحه صلب فوقانی (R1) است. برای تغییر مقدار جابه‌جایی در زمان‌های مختلف، دامنه^۱ آن در حین تحلیل تغییر داده می‌شود. این دامنه در واقع ضریبی است که در جابه‌جایی نهایی ضرب می‌شود. این ضریب می‌تواند به هر شکل دلخواهی در طول زمان بارگذاری تغییر کند. با توجه به اینکه سرعت فک متحرک دستگاه یونیورسال ثابت است، در این شبیه‌سازی از دامنه‌ای استفاده شده است که نحوه افزایش ضرایب در آن به صورت خطی است؛ به طوری که از مقدار صفر در زمان شروع حرکت تا مقدار نهایی حرکت محوری سطح صلب فوقانی در پایان زمان بارگذاری افزایش داده می‌شود.

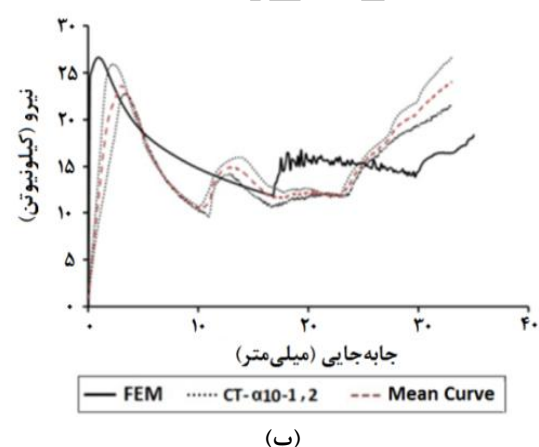
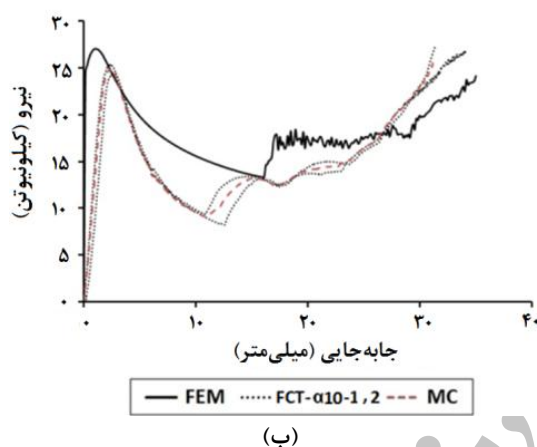
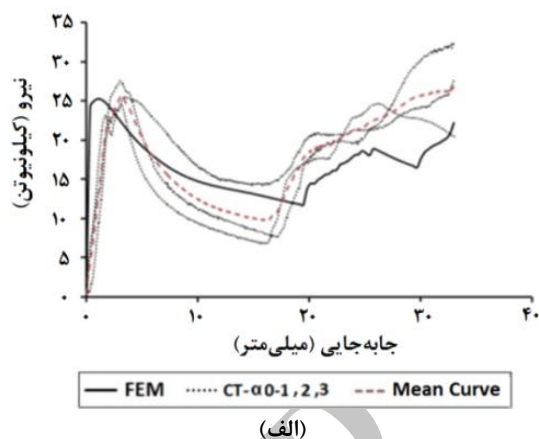
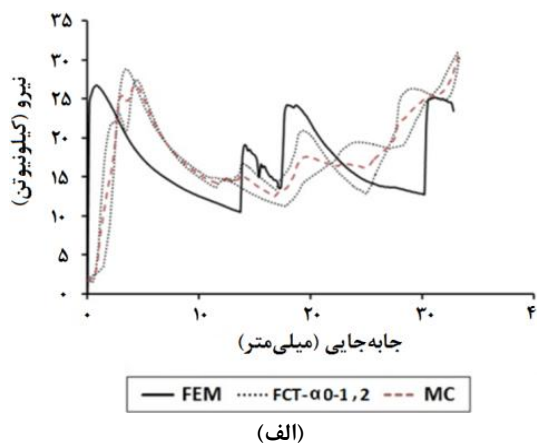
۵- مقایسه نتایج

همانطوری که بیان شد، برای شبیه‌سازی فرآیند فروریزش، از مدل اجزای محدود استفاده شده است؛ بنابراین نیاز است که از صحت عملکرد آنها اطمینان حاصل شود. برای این منظور، نتایج عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه می‌شود تا از عملکرد روش تحلیل ارزیابی شود. شکل ۱۵ و ۱۶، فروریزش نهایی نمونه مخروطی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بدون و با فوم پلی‌یورتان را تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری و مایل نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در طی جابه‌جایی برابر تغییر شکل نمونه‌های شبیه‌سازی با حالت آزمایشگاهی مشابه هستند.

شکل ۱۷ و شکل ۱۸ نیز به ترتیب، نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش سه‌بعدی نمونه مخروطی بدون و با فوم پلی‌یورتان را براساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی با شرایط مرزی دوسرگیردار تحت بارگذاری محوری و مایل نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، روند تغییر نیرو نیز، در هر نمودار مشابه است.

به‌طور کلی اختلافی که در نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های مخروطی با و بدون فوم پلی‌یورتان مشاهده می‌شود را می‌توان به صورت زیر تشریح کرد:

¹ Amplitude



شکل ۱۸- مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته مخروطی با فوم در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تحت بارگذاری الف) محوری و ب) مایل ۱۰ درجه

شکل ۱۷- مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته مخروطی بدون فوم در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تحت بارگذاری الف) محوری و ب) مایل ۱۰

۶- بررسی پارامتری

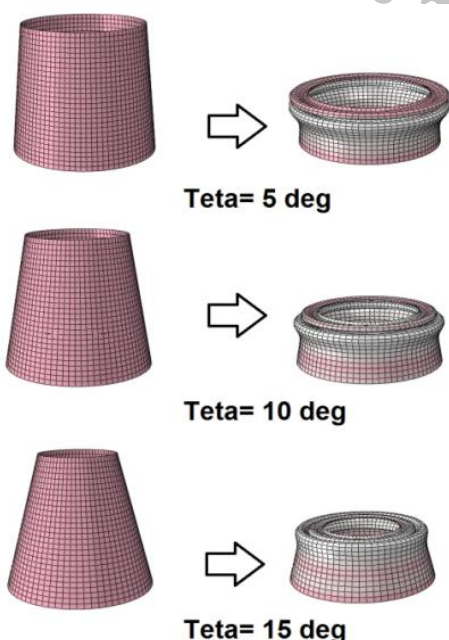
در بخش قبل، مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داد، مدل اجزای محدود ارائه‌شده می‌تواند پدیده فروریزش پوسته‌های مخروطی با و بدون فوم پلی‌یورتان را تحت اثر بارگذاری محوری و مایل مدل‌سازی کند. اکنون می‌توان از این مدل‌ها، برای فروریزش نمونه مخروطی در تحقیق حاضر استفاده شود و اثر پارامترهای فروریزش این نمونه‌ها را تحت اثر بارگذاری مختلف بررسی کرد. لازم به‌ذکر است که در بررسی پارامتری به‌منظور مقایسه پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار فروریزش نمونه‌های مخروطی، اثر عیوب هندسی لحاظ نشده است.

ج- خطا در ساخت فوم: وجود خطا در نسبت یک به یک فوم‌های دو جزئی فوم پلی‌یورتان، سبب ایجاد خطا در چگالی نسبی فوم پلی‌یورتان و تعیین خواص مکانیکی این فوم‌ها می‌شود. در نرم‌افزار، ساختار همگن برای ماده پلی‌یورتان تعریف شده است.

د- عدم مطابقت دقیق بین شرایط مرزی اعمال شده در آزمایش و نرم‌افزار المان محدود: در آزمایش، سطح قاعده‌های نمونه‌های مخروطی توسط شیار قطعه فولادی گیردار شده است؛ این شرایط مرزی اجازه حرکت افقی بسیار اندکی را برای نمونه‌های مخروطی فراهم می‌کرد؛ در حالی که این امر در نرم‌افزار المان محدود لحاظ نشده است.

پایین بودن سطح انرژی جذب شده پوسته‌های مخروطی توخالی، نسبت به پوسته‌های مخروطی تقویت شده برای زاویه‌ی نیم‌رأس و ضخامت‌های متفاوت است. این در حالیست که زاویه‌ی نیم‌رأس، اثر افزایشی-کاهشی بر انرژی جذب شده پوسته‌های مخروطی دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انرژی جذب شده با افزایش زاویه‌ی از ۵ تا ۱۰ درجه، روند صعودی و از زاویه‌ی ۱۰ تا ۱۵ درجه، روند نزولی دارد. علت این امر را می‌توان در نحوه فروریزش این پوسته‌های مخروطی جستجو کرد.

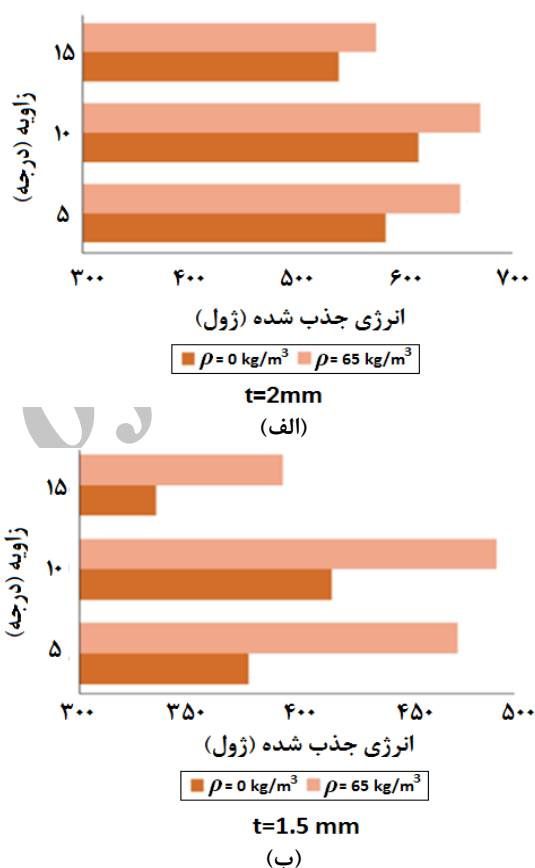
همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، چین‌های تشکیل شده برای زاویه‌ی ۱۵ درجه برخلاف زاویای دیگر به صورت افقی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی، نیروی لازم برای تشکیل چین‌هایی که به صورت عمودی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، بیشتر از نیرویی است که برای تشکیل چین‌های افقی لازم است؛ بنابراین بدیهی است که انرژی جذب شده (سطح زیر نمودار نیرو-جابه‌جایی) این زاویه، کمتر از زاویای دیگر باشد. براساس آنچه مطرح شد، حداکثر زاویه‌ای که در آن چین‌های پوسته مخروطی به صورت عمودی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، دارای بیشترین انرژی جذب شده است.



شکل ۲۰- هندسه فروریزش پوسته‌ی مخروطی برای زاویای مختلف و ضخامت ۲ میلی‌متر

۶-۱- اثر ضخامت، زاویه نیم‌رأس و فوم پلی‌یورتان بر انرژی جذب شده

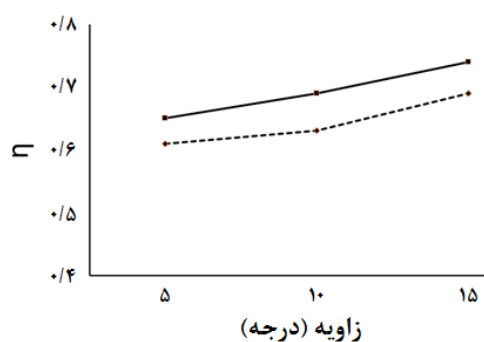
شکل ۱۹، انرژی جذب شده فروریزش پوسته‌های مخروطی را به‌عنوان تابعی از زاویه نیم‌رأس و دانسیته فوم با ضخامت‌های ۱/۵ و ۲ میلی‌متری نشان می‌دهد. انرژی جذب شده فروریزش این تحلیل‌ها، برای جابه‌جایی ۳۳ میلی‌متر (۶۰ درصد طول اولیه) مقایسه شده است.



شکل ۱۹- اثر ضخامت، زاویه‌ی نیم‌رأس و فوم بر انرژی جذب شده‌ی پوسته‌ی مخروطی برای ضخامت (الف) ۲ و (ب) ۱/۵ میلی‌متر

به‌طور کلی، ضخامت و زاویه نیم‌رأس، تأثیر قابل توجهی بر انرژی جذب شده فروریزش پوسته‌های مخروطی با و بدون فوم دارد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، انرژی جذب شده با افزایش ضخامت و دانسیته فوم طی روند مشخصی افزایش می‌یابد. آنچه به وضوح مشخص است،

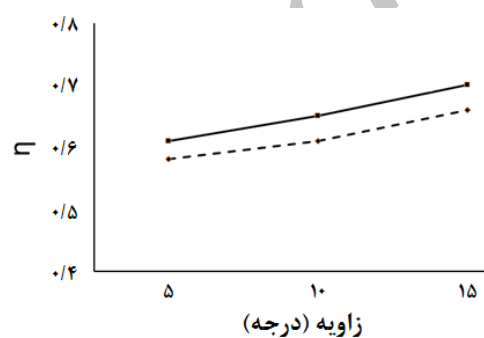
فوم بر ضریب نیروی فروریزش بررسی می‌شود. شکل ۲۲، اثر پارامترهای هندسی و وجود فوم را بر ضریب نیروی فروریزش برای جابه‌جایی ۶۰ درصد طول اولیه پوسته نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، وجود فوم اثر قابل‌توجهی بر ضریب نیروی فروریزش پوسته‌های مخروطی ندارد. بررسی پارامتر زاویه نیم‌رأس پوسته‌های مخروطی نیز نشان می‌دهد که با افزایش این پارامتر، ضریب نیروی فروریزش افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، متوسط نیروی فروریزش پوسته‌های مخروطی تقویت شده با فوم برای زاویه نیم‌رأس ۱۵ درجه، بیشتر به بیشینه نیروی فروریزش نزدیک‌تر است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، اگر ضریب نیروی فروریزش پوسته‌های مخروطی تقویت شده با فوم بیشتر از واحد شود، برای جذب انرژی مناسب نیستند.



-- $\rho = 0 \text{ kg/m}^3$ -- $\rho = 65 \text{ kg/m}^3$

t=2 mm

(الف)

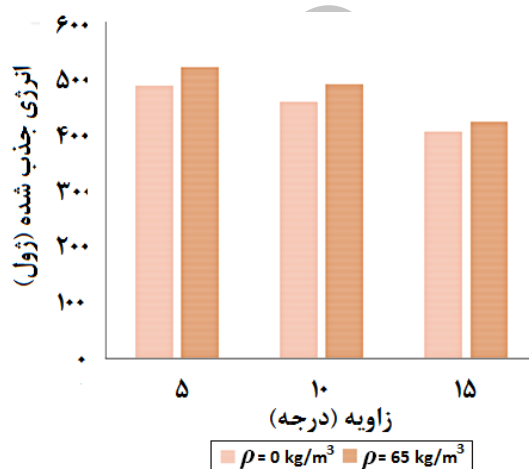


-- $\rho = 0 \text{ kg/m}^3$ -- $\rho = 65 \text{ kg/m}^3$

(ب)

شکل ۲۲- اثر ضخامت، زاویه‌ی نیم‌رأس و فوم بر ضریب نیروی فروریزش پوسته‌ی مخروطی برای ضخامت ۲ و ۱/۵ میلی‌متر

نکته قابل توجه این است که روند تغییرات انرژی برای پوسته‌های مخروطی با زاویه‌ی نیم‌رأس ۵ تا ۱۵ درجه تحت بارگذاری مایل مطابق شکل ۲۱، همواره به صورت نزولی است. به عبارت دیگر با افزایش زاویه نیم‌رأس، انرژی جذب شده تحت بارگذاری مایل، برخلاف بارگذاری محوری همواره کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در کاهش پایداری پوسته مخروطی با افزایش زاویه نیم‌رأس در برابر بارگذاری مایل دانست.



شکل ۲۱- اثر زاویه‌ی نیم‌رأس و فوم بر پوسته‌های مخروطی تحت بارگذاری مایل

۶-۲- اثر ضخامت، زاویه‌ی نیم‌رأس و فوم پلی‌یورتان بر ضریب نیروی فروریزش

همان‌طور که در بخش آزمایشگاهی توضیح داده شد، وجود فوم سبب افزایش انرژی جذب شده و بیشینه نیروهای فروریزش پوسته‌های مخروطی می‌شود. از طرفی دیگر افزایش بیشینه نیروی فروریزش، سبب افزایش شوک ضربه‌گیرهای فروریزشی در برخورد با اجسام صلب می‌شود. به‌طور کلی ضربه‌گیر یا جاذب انرژی‌ای مناسب است که بیشینه نیروی فروریزش آن، کمتر از متوسط نیروی فروریزش ضربه‌گیر باشد؛ بنابراین در این بخش، به مطالعه ضریب نیروی فروریزش (۱۱) پرداخته می‌شود.

ضریب نیروی فروریزش، برابر نسبت متوسط نیروی فروریزش به بیشینه نیروی فروریزش پوسته‌های مخروطی است. در این بخش، تأثیر ضخامت، زاویه نیم‌رأس مخروط و

مخروطی و فوم پلی‌یورتان با نقاط تنش- کرنش پلاستیک شکل ۳ و ثابت‌های رابطه ۱ به نرم‌افزار معرفی می‌شود. در این شبیه‌سازی، ثابت‌های D و q برای ماده‌ی آلومینیوم [۲۲] به ترتیب برابر، ۴ و ۲۸۸۰۰۰ بر ثانیه و برای فوم پلی‌یورتان [۱۹] به ترتیب برابر، ۲/۲۸۵ و ۴۶۳۸ بر ثانیه است.

از طرفی دیگر، سرعت بارگذاری تنها در راستای حرکت محوری و برای نقطه مرجع صفحه صلب فوقانی (R1) تعریف می‌شود و از حرکت آن در راستاهای دیگر جلوگیری می‌شود؛ همچنین تمامی درجات آزادی نقطه مرجع صفحه صلب تحتانی، مشابه شبیه‌سازی شبه‌استاتیکی مقید شده است.

همچنین یک جرم مشخص برای جسم صلب فوقانی در حال حرکت در نظر گرفته می‌شود تا جرم جسم ضربه‌زننده را شبیه‌سازی کند؛ این در حالی است که برای شبیه‌سازی شبه‌استاتیکی، جرمی برای جسم صلب فوقانی در حال حرکت در نظر گرفته نمی‌شود. در این مطالعه، مقدار جرم برای تمامی شبیه‌سازی‌های دینامیکی، ۱۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است.

از آنجا که اثر برخورد و فوم تقویتی بر ضریب افزایش دینامیکی پوسته‌های مخروطی تحت بارگذاری مایل و محوری مشابه است، بنابراین تنها نتایج بارگذاری محوری ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، در هر مورد افزایش سرعت برخورد، باعث افزایش ضریب افزایشی دینامیکی می‌شود. یکی از دلایل افزایش ضریب افزایشی دینامیکی تحت تأثیر سرعت برخورد، اثر نرخ کرنش ماده آلومینیوم بر پاسخ دینامیکی فروریزش پوسته‌های مخروطی است.

با رجوع به شکل ۲۳ می‌توان دریافت، ضریب افزایشی دینامیکی برای پوسته‌های مخروطی با کاهش ارتفاع مخروط کمتر می‌شود. به عبارت دیگر، اختلاف بین انرژی جذب شده در حالت دینامیکی و شبه‌استاتیکی در ابتدای بارگذاری، نسبت به انتهای آن بیشتر است. بیشترین افزایش ضریب افزایشی دینامیکی در جابه‌جایی ۷ میلی‌متر پوسته‌های مخروطی با و بدون فوم تحت اثر سرعت‌های متفاوت به ترتیب در حدود، ۱/۲۳ و ۱/۲۶ است. این روند تغییر ضریب افزایش دینامیکی، مشابه تحقیقاتی است که

با رجوع به شکل ۲۲ می‌توان دریافت که افزایش ضخامت پوسته‌های مخروطی، تأثیر چندانی بر ضریب نیروی فروریزش ندارد؛ بنابراین می‌توان گفت، ضریب نیروی فروریزش پوسته‌های مخروطی بدون و با فوم تا حدودی وابسته به ضخامت نیست. لازم به توضیح است، تمامی روند تغییرات مشاهده شده برای پوسته‌های مخروطی با و بدون فوم تحت بارگذاری مایل نیز، مشاهده شده است که از تکرار آن خودداری شده است.

۶-۳- ضریب افزایش دینامیکی

برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر پاسخ دینامیکی و مقایسه آن‌ها با پاسخ شبه‌استاتیکی فروریزش پوسته‌های مخروطی، از ضریب افزایشی دینامیکی^۱ استفاده می‌شود. این ضریب که در طراحی ضربه‌گیرهای فروریزشی بسیار اهمیت دارد، برای بررسی اثر دینامیکی بر آنالیزهای استاتیکی بدون نیاز به انجام آزمایش‌های دینامیکی استفاده می‌شود. ضریب افزایشی دینامیکی، برابر نسبت انرژی جذب شده تحت اثر بارگذاری دینامیکی، بر انرژی جذب‌شده تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی است.

در بارگذاری دینامیکی، جرم ضربه‌زننده و سرعت برخورد، پارامترهایی هستند که انرژی جنبشی را تشکیل می‌دهند. در نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی دینامیکی فروریزش پوسته‌های مخروطی، مشابه شبه‌استاتیکی است. تنها تفاوت آن، اعمال نرخ کرنش، سرعت بارگذاری و جرم برخوردکننده است.

به طور کلی، اثر نرخ کرنش پوسته مخروطی با استفاده از مدل کوپر- سایموند، به صورت رابطه (۱-۱۶) تعریف می‌شود [۲۱]:

$$\dot{\varepsilon}_{pl} = D \left(\frac{\dot{\sigma}_0}{\sigma_0} - 1 \right)^q \quad \dot{\sigma}_0 \geq \sigma_0 \quad (16-1)$$

در آن $\dot{\sigma}_0$ نرخ تنش سیلان دینامیکی^۲ $\dot{\varepsilon}_{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک محوری، σ_0 تنش سیلان استاتیکی^۳ و D و q پارامترهای ماده هستند؛ بنابراین در شبیه‌سازی دینامیکی فروریزش پوسته‌های مخروطی، خواص مکانیکی پوسته

¹ Dynamic Amplification Factor

² Dynamic Flow Stress

³ Static Flow Stress

به دلیل حضور فوم است. نکته مهم این است که دانسیته فوم پلی‌پورتان می‌تواند به عنوان پارامتر کنترل ضریب افزایش دینامیکی در بارگذاری دینامیکی در نظر گرفته شود. از طرفی دیگر، در صورتی که حداقل اثر اینرسی و بیشینه نیروی فروریزش تحت اثر بارگذاری دینامیکی مورد نظر باشد، پوسته‌های مخروطی تقویت شده با فوم نسبت به پوسته‌های توخالی مناسب‌تر می‌باشند.

۷- نتیجه‌گیری

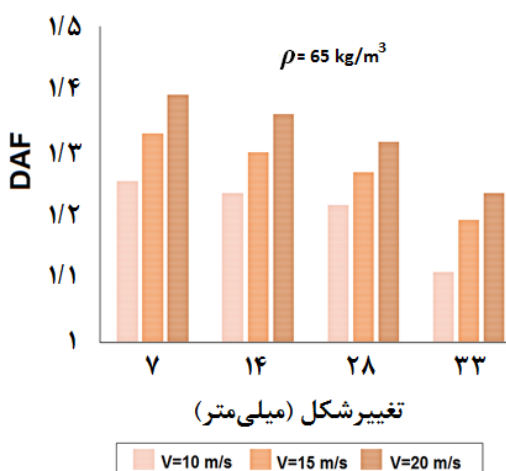
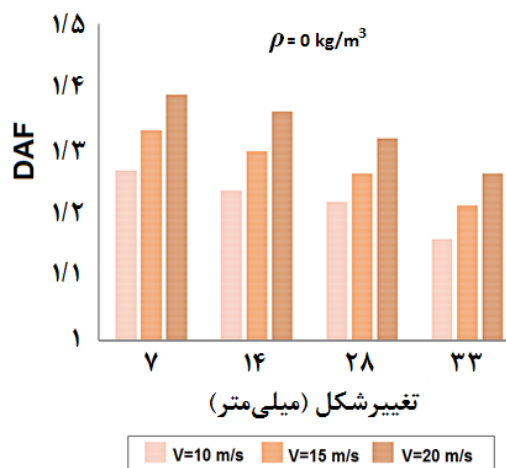
در این مقاله، لوله‌های مخروطی ساخته شده از آلومینیوم در دو حالت توخالی و پر شده با فوم تحت بارگذاری فشار محوری و مایل و شرایط مرزی دوسرگیردار قرار گرفته، رفتار فروریزشی آن‌ها مقایسه شدند. علاوه بر آزمایش‌ها، این فرایند به روش شبیه‌سازی نیز بررسی شد. با توجه به تحلیل‌های تجربی و عددی نتایج زیر به دست آمد:

۱. اولین بیشینه نیروی فروریزش و انرژی جذب شده، وابستگی زیادی به جهت اعمال نیروی فروریزش دارد. برخورد مایل سبب کاهش اولین بیشینه نیرو و انرژی جذب شده می‌شود. در این مطالعه، این مقدار کاهش نیروی فروریزش و انرژی جذب شده به ترتیب، در حدود ۵ و ۱۶ درصد است.

۲. وجود فوم پلی‌پورتان با چگالی ۶۵ کیلوگرم بر متر مکعب، سبب افزایش سطح زیر نمودار یا اصطلاحاً انرژی جذب شده می‌شود. هر چند که در این مطالعه، به دلیل استفاده از فوم با دانسیته کم، این میزان افزایش چشم‌گیر نیست. در این مطالعه، میزان افزایش جذب انرژی در نمونه‌های تقویت شده نسبت به بدون فوم برای بارگذاری محوری و مایل به ترتیب در حدود ۱۵ و ۵ درصد است. نکته جالب آنکه به علت عدم مقاومت فوم در برابر بارگذاری مایل، اثر این پارامتر بر انرژی جذب نمونه‌های مخروطی تحت بارگذاری مایل بسیار ناچیز است. از طرفی دیگر، وجود فوم می‌تواند سبب تغییر شیوه فروریزش نمونه‌های مخروطی تحت بارگذاری محوری شود.

۳. انرژی جذب شده با افزایش ضخامت و دانسیته فوم، طی روند مشخصی افزایش می‌یابد؛ این در حالیست که زاویه نیم‌رأس، اثر افزایشی-کاهشی بر انرژی

توسط ناگل و تامبیراتنام [۲۳] بر فروریزش پوسته‌های مخروطی با سطح مقطع مستطیلی انجام دادند. از طرفی دیگر، ضریب افزایش دینامیکی پوسته‌های مخروطی با و بدون فوم با افزایش سرعت به صورت صعودی است. بنابراین به نظر می‌رسد، اثر اینرسی در میزان جذب انرژی پوسته‌های مخروطی بسیار تأثیرگذار است.



شکل ۲۳- اثر سرعت برخورد بر ضریب شدت دینامیکی برای پوسته‌های مخروطی با و بدون فوم

یکی دیگر از نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر، پایین بودن ضریب افزایشی دینامیکی پوسته‌های مخروطی با فوم نسبت به بدون فوم است. این امر، نشان‌دهنده کاهش اثر اینرسی در پوسته‌های مخروطی تقویت شده با فوم نسبت به پوسته‌های مخروطی توخالی با ابعاد یکسان

- [2] Gupta NK, Mohamed Sheriff N, Velmurugan R (2008) Analysis of collapse behaviour of combined geometry metallic shells under axial impact. *Int J Impact Eng* 35: 731-741
- [3] Ahmad Z, Thambiratnam DP, Tan ACC (2010) Dynamic energy absorption characteristics of foam filled conical tubes under oblique impact loading. *Int J Impact Eng* 37(5): 475-488.
- [4] Victor IR (2006) Elastic-plastic response of structural foams subjected to localized static loads. *Mater Design* 27: 947-954.
- [5] Azarakhsh S, Rahi A, Ghamarian A (2016) Experimental and numerical investigation of crushing of brass cylindrical tubes. *J Fluids Struct Mech* 6(2): 181-196. (In Persian)
- [6] Azarakhsh S, Rahi A, Ghamarian A, Motamedi H (2015) Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes. *Thin Wall Struct* 95(3): 60-72.
- [7] Azarakhsh S, Ghamarian A (2017) Collapse behavior of thin-walled conical tube clamped at both ends subjected to axial and oblique loads. *Thin Wall Struct* 112: 1-11.
- [8] Aktay L, Toksoy AK, Guden M (2006) Quasi-static axial crushing of extruded polystyrene foam-filled thin-walled aluminum tubes: Experimental and numerical analysis. *Mater Design* 27: 556-65.
- [9] Hanssen AG, Langseth M, Hopperstad OS (2000) Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *Int J Impact Eng* 24: 475-507.
- [10] Chun-ji Z, Yi F, Xue-bin Z (2010) Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes. *Trans Nonferrous Met Soc China* 20: 1380-1386.
- [11] Ghamarian A, Abadi MT (2011) Axial crushing analysis of end-capped circular tubes. *Thin Wall Struct* 49: 743-752.
- [12] Ghamarian A, Zarei HR, Abadi MT (2011) Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes. *Thin Wall Struct* 49: 1312-1319.
- [13] Thinvongpituk C, Chomkwah V (2010) Experimental and numerical studies on the behavior of cylindrical and conical shells with varying thickness along the length subjected to axial compression. *10(4)*: 92-100.
- [14] Ghamarian A, Zarei HR (2012) Crashworthiness investigation of conical and cylindrical end-capped tubes under quasi static crash loading. *Int J Crashworthiness* 17: 19-28.
- [15] Dadrasi A (2008) Numerical and experimental study on effect of rectangular cutout on buckling جذب شده پوسته‌های مخروطی دارد. انرژی جذب شده با افزایش زاویه از ۵ تا ۱۰ درجه، روند صعودی و از زاویه ۱۰ تا ۱۵ درجه، روند نزولی دارد.
۴. حداکثر زاویه‌ای که در آن چین‌های پوسته مخروطی به صورت عمودی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، دارای بیشترین انرژی جذب شده است.
۵. با افزایش زاویه نیم‌رأس، انرژی جذب شده تحت بارگذاری مایل برخلاف بارگذاری محوری همواره کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در کاهش پایداری پوسته مخروطی با افزایش زاویه نیم‌رأس در برابر بارگذاری مایل دانست.
۶. وجود فوم، اثر قابل توجهی بر ضریب نیروی فروریزش پوسته‌های مخروطی دارد. بررسی پارامتر زاویه‌ی نیم‌رأس پوسته‌های مخروطی نیز، نشان می‌دهد که با افزایش این پارامتر، ضریب نیروی فروریزش افزایش می‌یابد. افزایش ضخامت پوسته‌های مخروطی نیز، تأثیر چندانی بر ضریب نیروی فروریزش ندارد؛ بنابراین می‌توان گفت، ضریب نیروی فروریزش پوسته‌های مخروطی بدون و با فوم تا حدودی وابسته به ضخامت نیست.
۷. ضریب افزایشی دینامیکی برای پوسته‌های مخروطی با کاهش ارتفاع مخروط کمتر می‌شود. به عبارت دیگر، اختلاف بین انرژی جذب شده در حالت دینامیکی و شبه‌استاتیکی در ابتدای بارگذاری نسبت به انتهای آن بیشتر است.
۸. دانسیته فوم پلی‌یورتان می‌تواند به عنوان پارامتر کنترل ضریب افزایشی دینامیکی در بارگذاری دینامیکی در نظر گرفته شود. از طرفی دیگر، در صورتی که حداقل اثر اینرسی و بیشینه نیروی فروریزش تحت اثر بارگذاری دینامیکی مورد نظر باشد، پوسته‌های مخروطی تقویت شده با فوم نسبت به پوسته‌های توخالی مناسب‌تر می‌باشند.

۸- مراجع

- [1] Shakeri M, Mirzaeifar R, Salehghaffari S (2007) New insights into the collapsing of cylindrical thin-walled tubes under axial impact load. *P I Mech Eng C-J Mec* 221(8): 869-885.

- and foam-filled thin-walled tubes under static and dynamic loadings. *Int J Mech Sci* 50(6): 1042-1057.
- [20] VS Deshpandeh, NA Fleck (2001) Multi-axial yield behavior of polymer foams. *Acta Materialia* 49: 859-66.
- [21] Symonds PS (1965) Viscoplastic behavior in response of structures to dynamic loading. In: Huffington NJ, editor. *Behaviour of Materials under Dynamic Loading*, SME, New York.
- [22] Aljawi AAN, Alghamdi AAA, Abu-Mansour TMN, Akyurt M (2005) Inward inversion of capped-end frusta as impact energy absorbers. *Thin Wall Struct* 43: 647-664.
- [23] Nagel GM, Thambiratnam DP (2004) Dynamic simulation and energy absorption of tapered tubes under impact loading. *Int J Crashworthiness* 9(4): 389-99.
- load of steel conical shells. 17th ISME conference, Tehran. (In Persian)
- [16] Tajdari M, Azimi M, Khoram M, Eskandari Jam J (2011) Experimental and numerical studies on the behavior of cylindrical shells with triangular cutout subjected to axial compression. *Modare Mech Eng* 13(1): 24-37. (In Persian)
- [17] Mohamed Sheriff N, Gupta NK, Velmurugan R, Shanmugapriyan N (2008) Optimization of thin conical frusta for impact energy absorption. *Thin Wall Struct* 46: 653-666.
- [18] Naddaf Oskouei A, Khodarahmi H, Sohrabi M (2015) Experimental and numerical study of conical thin shells collapse under dynamic axial loadings. *Modares Mech Eng* 15(7): 392-402. (In Persian)
- [19] Mirfendereski L, Salimi M, Ziaei-Rad S (2008) Parametric study and numerical analysis of empty

Archive of SID