

بررسی عملکرد جذب انرژی سازه‌های اس-ریل تحت بار ضربه‌ای با استفاده از روش کپراس و طراحی آزمایشات

سبحان اسماعیلی^۱، ساره اسماعیلی^۲

۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران، sobhanesmaeili@gmail.com

۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه مونترال، کانادا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۲

چکیده

در این تحقیق خصوصیات جذب انرژی و رفتار لهیدگی سازه‌های تیوبی تک و چندجداره‌ای اس-ریل^۱ با سه سطح مقطع مثلثی، مربعی و شش ضلعی تحت بارگذاری دینامیکی -محوری مورد تحلیل قرار گرفته است. گام اول صحت‌سنجی درست نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود صورت پذیرفته در نرم‌افزار ال.اس. داینا در مقایسه با نتایج به‌دست آمده از آزمایشات تجربی روی تیوب ساده مربعی و تیوب چندجداره‌ای دایروی بوده است. جنس سازه‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق و نمونه‌های آزمایشگاهی از آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا می‌باشد. سه شاخص جذب انرژی^۲، بیشینه نیروی لهیدگی^۳ و ضریب بازدهی نیروی لهیدگی^۴ در عملکرد فروریزش سازه‌ها مطرح می‌شوند. گام دوم به‌کارگیری روش رتبه‌بندی کپراس جهت پیدا کردن بهترین سازه از منظر جذب انرژی است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد اضلاع و کنج‌های سطح مقطع تماسی میزان عملکرد جذب انرژی افزایش می‌یابد. در انتها، با استفاده از روش رویه پاسخ^۵ و طراحی آزمایشات^۶ به بهینه‌سازی و بررسی آثار پارامترهای طراحی همچون ضخامت و فاصله انحرافی بر عملکرد جذب انرژی سازه بهینه پرداخته شده است.

واژگان کلیدی

سازه‌های اس-ریل، جذب انرژی، بارگذاری دینامیکی، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کپراس، طراحی آزمایشات

۱. مقدمه

تأثیر بارگذاری دینامیکی و شبه‌استاتیکی قرار می‌گیرند، جذب انرژی و تعیین واکنش این قطعات در برابر ضربات وارده از جمله مباحث مهمی است که در این حوزه مورد مطالعه و بررسی قرار

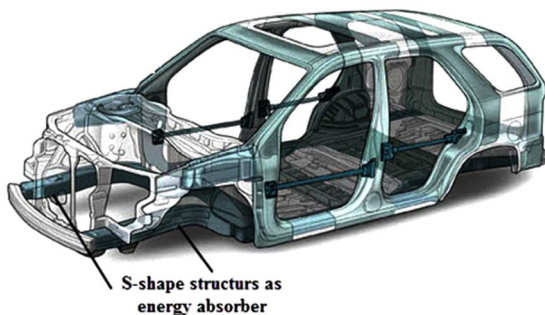
تصادف یا ضربه رخدادی بسیار کوتاه است که طی آن نیروی ضربه وارده به سرنشینان موجب صدمات جانی و مالی جبران ناپذیری می‌شود. جهت کاهش آسیب آورده بر قطعاتی که تحت

می‌گیرد. ضربه‌گیرها در مباحث مکانیک ضربه جهت جلوگیری از شوک، نقش مهمی را در صنایع هواپیماسازی، خودروسازی، ریلی، هوافضا و جز این‌ها ایفا می‌کنند. قطعات، انرژی جنبشی ناشی از ضربه را از طریق تغییر شکل الاستوپلاستیک جذب می‌نمایند. میزان جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی از جمله پارامترهای مهم و اساسی در سازه‌های جاذب انرژی می‌باشند که در بسیاری از پژوهش‌ها تلاش شده است این پارامترها پیش‌بینی و محاسبه شوند. در بدنه خودرو، برخی از این ضربه‌گیرها از نوع اس. شکل وجود دارند (شکل ۱). این ساختارها یک طول انحرافی درون سازه‌های دارند که مانع تداخل با بقیه اجزاها مانند چرخ‌ها، موتور و تانک سوخت می‌شوند. از اینرو رفتار لهیدگی سازه‌های اس. شکل مورد مطالعه توسط محققان گوناگون قرار گرفته است.

احکامی و همکاران (۱۹۹۰) مطالعات عددی و تجربی به‌صورت شبه‌استاتیکی و دینامیکی روی رفتار لهیدگی تیوب‌های اس. شکل انجام داده‌اند. تقویت سطح مقطع سازه‌ها جهت افزایش جذب انرژی در هنگام فرایند ضربه نیز نشان داده شده است [۱]. یک مطالعه آزمایشگاهی توسط کیم و وایرزیکی (۲۰۰۱) روی ساختارهای اس. شکل صورت پذیرفت. آنها در تحقیق‌شان به طرح‌هایی از سازه‌های به‌کار رفته در بدنه خودرو اشاره و همچنین تحقیقاتی روی چندین استحکام دهنده داخلی جهت افزایش عملکرد جذب انرژی تحت بارگذاری محوری انجام داده‌اند [۲]. ژنگ و سیگال (۲۰۰۷) مطالعاتی از تأثیر تقویتی‌های به‌کار رفته در سطح مقاطع مختلف در طول فرایند لهیدگی انجام داده‌اند و دریافته‌اند که حضور تقویتی‌ها نسبت به عدم حضور آنها میزان انرژی ناشی از ضربه را بیشتر جذب می‌کند [۳]. حسینی تهرانی و نیک احد (۲۰۰۶) به بررسی بارگذاری محوری و مایل روی تیوب‌های اس. شکل همراه با صفحات تقویت‌کننده جهت کنترل فروریزش خمشی و طولی پرداخته‌اند [۴-۵]. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تعویض جنس مواد به‌کار رفته در سازه‌ها، عموماً دارای تأثیرگذاری بیشتری نسبت به تغییر ساختاری سازه‌ها در افزایش عملکرد جذب انرژی دارد. کیم و وایرزیکی (۲۰۰۰) به مطالعه راه‌حلی تحلیلی از استحکام لهیدگی تیوب‌های جدارنازک اس. شکل با سطح مقطع مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی و استاتیکی پرداخته‌اند و سپس نتایج آن را با راه‌حل‌های عددی مقایسه کرده‌اند [۶]. در تحقیقی دیگر خلخالی و همکاران (۲۰۱۱) مطالعه آزمایشگاهی و عددی روی تیوب‌های جدارنازک اس.

شکل تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری را نشان داده‌اند [۷]. در ادامه، الماراکبی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی سازه‌های اس. شکل با سطح مقطع مربعی، مستطیلی، شش ضلعی و هشت ضلعی با دو جنس استیل و آلومینیوم پرداخته‌اند [۸]. نتایج آنها نشان داد که سازه تک‌جداره شش ضلعی و سازه چند جداره هشت ضلعی بهترین جاذب‌های انرژی می‌باشند. آنها همچنین در تحقیق‌شان عملکرد جذب انرژی در حضور صفحات تقویتی مختلف را نیز بررسی کرده‌اند.

در تحقیق حاضر رفتار جذب انرژی طرح جدید سازه‌های چندجداره‌ای اس. شکل با مقاطع مثلثی، مربعی و شش ضلعی، که تحت بارگذاری دینامیکی محوری قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار گرفته است. جهت شبیه‌سازی این سازه‌ها از نرم‌افزار ال. اس. داین استفاده می‌شود. همچنین از روش رتبه‌بندی کپراس جهت پیدا کردن بهترین سازه از منظر عملکرد جذب انرژی استفاده شده است. در انتها مقادیر بهینه ضخامت و طول انحرافی بهترین لوله به‌دست آمده از منظر قابلیت جذب انرژی، با استفاده از روش بهینه‌سازی رویه پاسخ محاسبه می‌گردد.



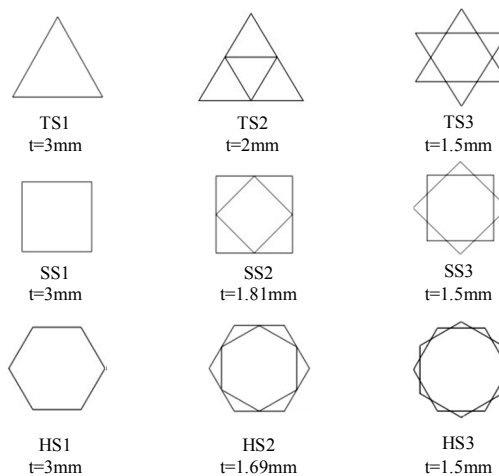
شکل ۱. سازه‌های اس. شکل در بدنه خودرو

۲. تحلیل عددی

۲-۱. هندسه مقاطع

سازه‌های اس. شکل با توجه به شکل خاصی که دارند در مناطقی که محدودیت مکانی ایجاد می‌کند یا سبب تداخل با مابقی اجزای مرتبط با خود نشوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها به‌عنوان ضربه‌گیرهای ذخیره‌ساز انرژی در وسائل نقلیه از جمله ساختار خودرو مورد استفاده می‌باشند. (شکل ۱). طبق شکل ۲ تحلیل روی سازه‌های تک‌جداره و چندجداره‌ای با سطح مقطع مثلثی (TS1, TS2, TS3)، مربعی (SS1, SS2, SS3) و شش ضلعی (HS1, HS2, HS3) صورت پذیرفته است. سازه‌های تک‌جداره‌ای

(اندیس ۱) در واقع همان تیوب‌های ساده می‌باشند. سازه‌های چندجداره‌ای نیز از دو نوع در نظر گرفته شده‌اند: نوع اول همان تیوب‌های ساده‌ای هستند که اواسط اضلاع آنها بهم متصل شده و تشکیل دو تیوب تودرتوی یک شکل را می‌دهند (اندیس ۲). نوع دوم همان سازه‌های نوع اول است؛ با این تفاوت که نسبت بزرگی تیوب داخلی و خارجی با هم برابر باشد (اندیس ۳). دلیل این انتخاب این اشکال، تحلیل عملکرد جذب انرژی سازه‌های تک و چندجداره با سطح مقاطع، اضلاع و کنج‌های متفاوت می‌باشد. پارامترهای هندسی دخیل در طراحی این‌گونه سازه‌ها شامل طول تیوب (L)، طول منحنی درون سازه‌ای (D)، ضخامت جداره‌ها (t) و ابعاد سطح مقطع می‌باشد. ابعاد طراحی مربوط به سازه‌های ذکر شده در این مقاله در شکل ۳ نمایش داده شده است. محیط سطح مقطع و ضخامت همه سازه‌های تک‌جداره برابر ۵۳۴ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر می‌باشد [۸]. جهت برابر کردن وزن سازه‌های چندجداره‌ای با تک‌جداره‌ای ذکر شده در این پژوهش، ضخامت‌های مختلف به آنها اختصاص داده شده است (شکل ۲).



شکل ۲. سطح مقطع تیوب‌های تک و چندجداره‌ای اس. شکل با جرم یکسان و ضخامت جداره متفاوت

۲-۲. مدل اجزای محدود

از نرم‌افزار غیرخطی اجزای محدود ال. اس. داینا جهت شبیه‌سازی و تحلیل رفتار لهدیگی سازه‌های نشان داده شده در شکل ۲ استفاده شده است [۹]. این سازه‌ها با استفاده از تحلیل برخورد صفحه‌ای دیواری صلبی^۷ با سرعت ثابت ۱۰ متر بر ثانیه و جرم برخورد ۵۰۰ کیلوگرم در نرم‌افزار ال. اس. داینا مدل‌سازی می‌شوند [۸]. لهدیگی نمونه‌ها به اندازه ۴۰۰ میلی‌متر از ۱۰۰۰

میلی‌متر طول تیوب که برابر ۴۰ درصد لهدیگی کامل سازه‌ها است، می‌باشد. مطابق شکل ۴ شرایط مرزی به این صورت است که سازه‌ها در قسمت برخورد با دیوار صلب مذکور کاملاً آزاد و انتهای دیگر آن به یک مکعب صلب و ثابت، متصل و در همه جهت‌ها بدون حرکت باقی می‌ماند. از قید تماس اتوماتیک^۸ جهت جلوگیری از فرورفتن لوله در خودش و جهت تعریف تماس بین صفحه‌های صلب با سازه از قید تماسی سطح به سطح^۹ استفاده می‌شود. اصطکاک کولمب^{۱۰} برای همه سطوح تماسی ۰/۱۵ فرض شده است [۱۰]. در کلیه قسمت‌های مختلف سازه‌های بررسی شده از روابط المان پوسته‌ای چهارگوش، نوع بلیچکو - تسای^{۱۱} با پنج نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت استفاده شده است. جهت تعیین اندازه المان مناسب در شبکه‌بندی سازه‌ها، تحلیل‌های همگرایی انجام گرفت و در نهایت اندازه آنها به صورت ۴×۴ میلی‌متر انتخاب گردید. نمودار تنش - کرنش و خصوصیات مکانیکی جنس سازه‌ها نیز از طریق آزمون کشش محاسبه و در شکل ۵ و جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۳. شاخص‌های لهدیگی

برای ارزیابی قابلیت جذب انرژی سازه‌های مطالعه‌شده در تحقیق حاضر، سه شاخص اصلی به نام‌های جذب انرژی مخصوص^{۱۲}، بیشترین نیروی لهدیگی و بازدهی نیروی لهدیگی در نظر گرفته می‌شود. جذب انرژی مخصوص به‌عنوان یک شاخص کلیدی برای اندازه‌گیری میزان انرژی جذب‌شده در سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد که با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$SEA = \frac{EA}{m} = \frac{\int_0^{\delta} F(x) dx}{m} \quad (1)$$

در این رابطه، F(x) نشانگر نیروی لهدیگی لحظه‌ای و δ میزان لهدیگی سازه را نشان می‌دهد که در این مقاله برابر ۴۰۰ میلی‌متر است. همچنین m جرم سازه می‌باشد. گفتنی است به‌سبب یکسان بودن وزن همه سازه‌ها، شاخص EA به‌جای شاخص SEA مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شاخص بعدی بیشترین نیروی لهدیگی بوده که در واقع بیشترین مقدار F(x) می‌باشد و یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای ایمنی سرنشینان وسائل نقلیه محسوب می‌شود. شاخص دیگری که در ارزیابی جاذب‌های انرژی استفاده می‌شود عبارت است از بازدهی نیروی لهدیگی که از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

محوری با آزادسازی جرم برخورد ۲۰۰ کیلوگرم به ارتفاع ۲ متر و سرعت برخورد ۱۰ متر بر ثانیه با استفاده از دستگاه DropHammer دو بار مورد آزمایش تجربی قرار گرفت (شکل ۶). برای صحت‌سنجی باید نتایج عددی حتی‌الامکان به نتایج تجربی نزدیک و با آن تطابق داشته باشد. با انجام شبیه‌سازی متعدد این تطابق در مد تغییر شکل و نمودارهای نیرو جابه‌جایی در شکل ۷ حاصل گردید. قابل مشاهده است که میزان لهیدگی ۷۵ میلی‌متر از ۹۰ میلی‌متر طول کلی تیوب و برابر ۸۳ درصد لهیدگی کامل تیوب می‌باشد. به‌منظور اطمینان بیشتر از درستی مدلسازی رفتار لهیدگی سازه‌های ترکیبی، آزمایش تجربی روی لوله‌چندجداره دایروی با نسبت لوله داخلی به خارجی ۰/۵، شعاع جداره بیرونی ۲۳/۵ میلی‌متر، طول ۶۷ میلی‌متر و ضخامت ۱/۹ میلی‌متر توسط دستگاه STM-150 که در شکل ۸ نشان داده شده تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. در ادامه، لوله چن جداره در نرم‌افزار ال. اس. داینما مشابیه شرایط آزمایش، مدل‌سازی و تحلیل گردید.

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \times 100 \quad (2)$$

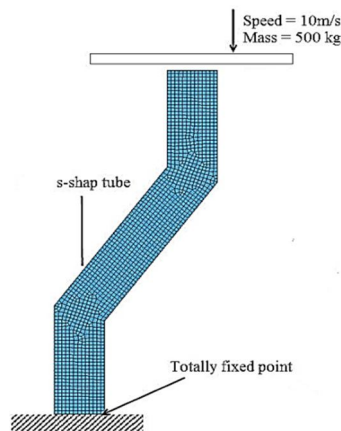
در این رابطه MCF نیروی میانگین بوده و از رابطه ۳ قابل محاسبه است.

$$MCF = \frac{\int_0^\delta F(x)dx}{\delta} = \frac{EA}{\delta} \quad (3)$$

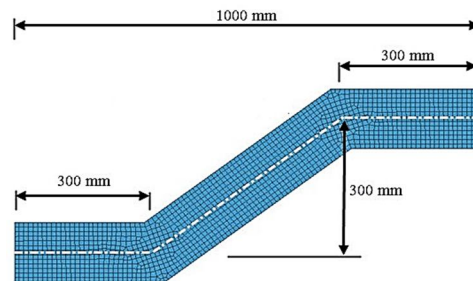
افزایش کاهش سرعت (شتاب منفی در لحظه برخورد) باعث افزایش مقدار PCF شده و در ارزیابی جذب انرژی به‌عنوان عامل منفی شناخته می‌شود. مشخص است که سازه با عملکرد بهتر دارای بیشترین مقدار جذب انرژی مخصوص (SEA) بوده و در کنار آن اگر مقدار CFE افزایش یابد، کاهش سرعت به کمترین حالت خود خواهد رسید چیزی که برای جاذب‌های انرژی مطلوب است.

۳. صحت‌سنجی مدل المان محدود

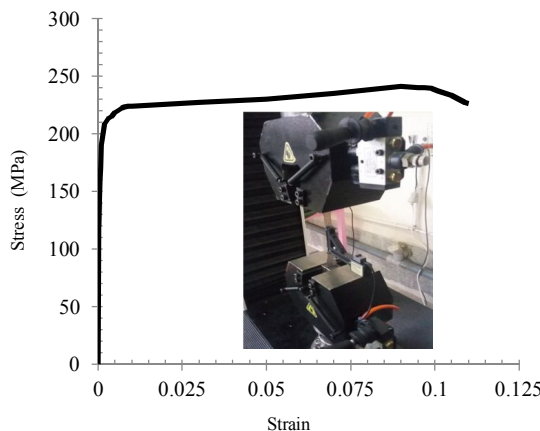
یک نمونه تیوب مربعی ساده اکستروژن شده به ابعاد ۴۰×۴۰، ضخامت و طول ۱/۸ و ۹۰ میلی‌متر تحت بارگذاری دینامیکی



شکل ۴. مدل‌سازی المان محدود و شرایط مرزی سازه‌ها تحت بار ضربه



شکل ۳. ابعاد هندسی سازه‌های اس. ریل



شکل ۵. نمودار تنش - کرنش



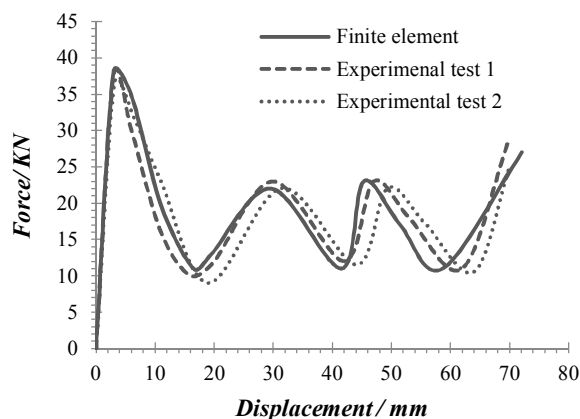
شکل ۶. دستگاه Drop Hammer

جدول ۱. مشخصات مکانیکی جنس سازه‌ها

مقادیر	مشخصات
۶۸	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
۲۱۴	تنش تسلیم (مگاپاسکال)
۲۴۱	تنش نهایی (گیگاپاسکال)
۰/۳۳	ضریب پوواسون



(الف)



(ب)

شکل ۷. الف) الگوی تغییر شکل، ب) نمودار نیرو - جابه‌جایی نتایج عددی و آزمایشگاهی ضربه دینامیکی

می‌باشد. همان‌طور مشخص است، تطابق حاصل از نتایج تجربی و عددی در نمودارهای نیرو - جابه‌جایی از نظر تعداد چین‌ها و شکل‌های لهیدگی تحت دو بارگذاری دینامیکی و شبه‌استاتیکی

شکل ۹ نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود شامل الگوی سازه لهیده شده و منحنی نیرو - جابه‌جایی را نشان می‌دهد. میزان لهیدگی برابر ۷۵ درصد لهیدگی کامل تیوب

قابل قبولی با نتایج آزمایشات تجربی دارند.

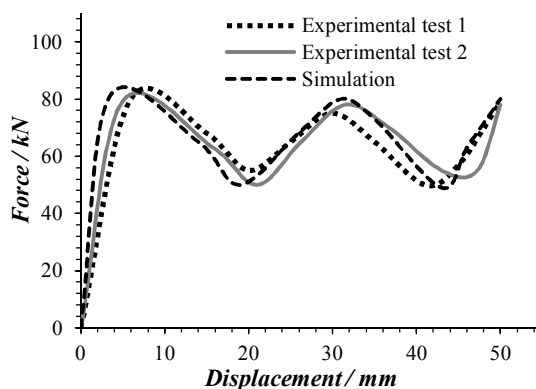
مشاهده شد. لذا می‌توان گفت که نتایج تحلیل‌های عددی تطابق



شکل ۸ دستگاه STM 150



(الف)



(ب)

شکل ۹. الف) الگوی تغییر شکل، ب) نمودار نیرو - جابه‌جایی نتایج عددی و آزمایشگاهی ضربه شبه‌استاتیکی

فاصله انحرافی از سازه‌های اس. شکل چین‌خوردگی پیش‌رونده به‌صورت بسیار ناچیز صورت پذیرفته و در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که در رفتار لهیدگی سازه‌های اس. شکل، خمش کلی بر چین‌خوردگی پیش‌رونده غالب است. مطابق شکل ۱۱ که نمودارهای نیرو - تغییر شکل از لهیدگی سازه‌ها را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که به‌دلیل رفتار خمش کلی، ابتدا اوج نیرو زیاد

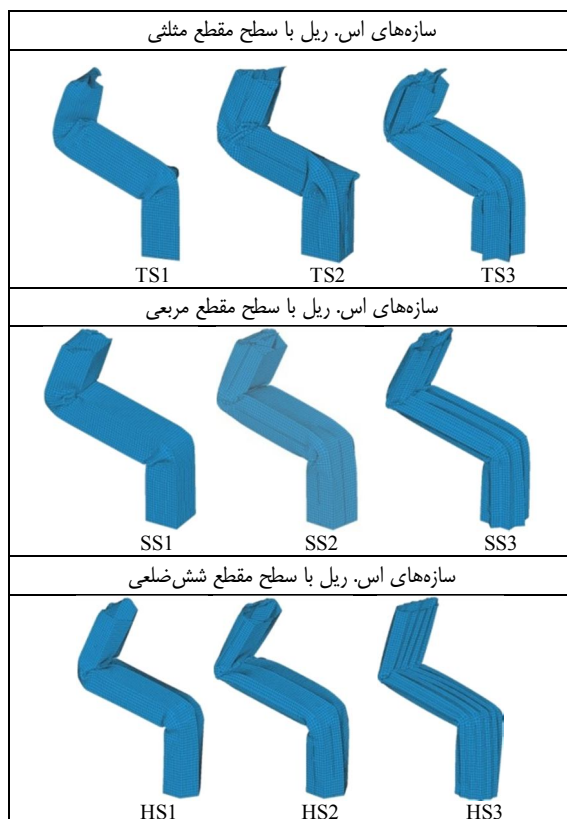
۴. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی سازه‌های اس. شکل

پاسخ به الگوی تغییر شکل شش سازه تک‌جداره و چندجدارهای اس. شکل نشان داده شده در شکل ۲، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. با توجه به تغییر شکل سازه‌ها پس از فرایند ضربه دینامیکی می‌توان دریافت که نوع لهیدگی ایجادشده در سازه‌ها، ترکیبی از خمش کلی و چین‌خوردگی پیش‌رونده است. در ناحیه

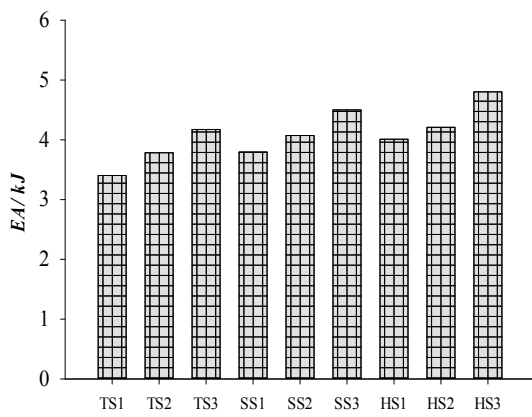
بوده و پس از گذشت زمان با شیب نسبتاً تندی کاهش می‌یابد. هر بالا پایین رفتن در نمودار نیرو - جابه‌جایی نشان‌دهنده تشکیل چین در سازه‌هاست. نمودارهای ستونی شاخص‌های ذکرشده جذب انرژی (EA)، بیشینه نیروی لهیدگی (PCF) و ضریب بازدهی نیروی لهیدگی (CFE) را برای همه سازه‌های ذکرشده در شکل‌های ۱۲ می‌توان مشاهده نمود. طبق شکل ۱۲ الف میزان جذب انرژی برای سازه‌ها با سطح مقاطع مثلثی به صورت $TS1 < TS2 < TS3$ ، سازه‌ها با سطح مقاطع مربعی به صورت، $SS1 < SS2 < SS3$ و برای سازه‌ها با سطح مقاطع شش‌ضلعی به صورت $HS1 < HS2 < HS3$ می‌باشد. نتایج این روابط حاکی از آن است که با افزایش تعداد ضلع و کنج سطح مقطع از مثلثی تا شش ضلعی میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد؛ به طوری که سازه‌های نوع سوم (اندیس ۳) عملکرد بهتری نسبت به نوع دوم (اندیس ۲) و اول (اندیس ۱) با سطح مقاطع یکسان دارند. پس از بررسی شاخص جذب انرژی ویژه، روابط بیشینه نیروی لهیدگی طبق شکل ۱۲ ب برای سازه‌های با سطح مقاطع مثلثی به صورت $TS2 < TS1 < TS3$ ، سازه‌ها با سطح مقاطع مربعی به صورت، $SS2 < SS1 < SS3$ و سر آخر روابط بیشینه نیروی لهیدگی برای سازه‌های اس. شکل با سطح مقاطع شش‌ضلعی به صورت $HS2 < HS1 < HS3$ می‌باشد. طبق روابط ذکرشده برای PCF بیشترین بیشینه نیروی لهیدگی مختص سازه‌ها با اندیس ۳ در مقایسه با اندیس ۱ و ۲ در سطح مقاطع یکسان می‌باشد و آن هم به دلیل وجود تعداد کنج‌ها و اضلاع تماسی بالا بوده که برای لهیدگی نیاز به نیروی ضربه‌ای بیشتری دارند. شکل ۱۲ پ ضریب بازدهی نیروی لهیدگی (CFE) را نشان می‌دهد که با استفاده از دو شاخص جذب انرژی و بیشینه نیروی لهیدگی و از طریق فرمول ۴ محاسبه می‌گردد. به طور کلی سازه‌ها با اندیس ۲ نسبت به مابقی اندیس‌های سطح مقطع یکسان دارای ضریب بازدهی نیروی لهیدگی بیشتری می‌باشند که آن هم طبق فرمول ۴ به سبب کم بودن مقدار PCF در این اندیس است. شاخص‌های لهیدگی شامل معیارهای سودمند و غیرسودمند در تضاد با هم هستند، به گونه‌ای که افزایش یکی از آنها ممکن است کاهش دیگری را در پی داشته باشند. همان‌طور که گفته شد شاخص جذب انرژی (EA) و شاخص ضریب بازدهی نیروی لهیدگی (CFE) از جمله شاخص‌های مثبت در افزایش عملکرد جذب انرژی می‌باشند؛ ام معیار بیشینه نیروی لهیدگی (PCF) به سبب

رابطه مستقیم با شتاب و اینکه هر بار افزایش آن میزان صدمات نیز بالا می‌رود، به عنوان شاخصی منفی در مسائل جاذب‌های انرژی مطرح می‌گردد. در این مطالعه از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کپراس برای معرفی بهترین جاذب انرژی با در دست داشتن شاخص‌های سودمند و غیرسودمند استفاده شده است [۱۱-۱۳]. با پیاده‌سازی این روش میزان رتبه‌بندی این سازه‌ها از لحاظ بهترین عملکرد جذب انرژی در جدول ۲ نشان داده شده است. طبق این جدول روابط عملکرد در هم شکستگی سازه‌های اس. شکل به صورت:

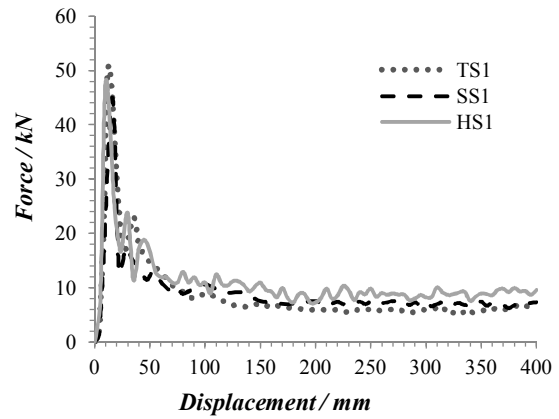
$HS3 > SS3 > HS2 > SS2 > HS1 > SS1 > TS3 > TS2 > TS1$ می‌باشد. بنابراین سازه چندجداره‌ای نوع سوم با سطح مقطع شش‌ضلعی (HS3) بهترین جاذب انرژی در این پژوهش معرفی می‌گردد. رتبه‌بندی سازه‌ها به این موضع اشاره دارد که در مقاطع یکسان، هرچه تعداد کنج سازه‌ها بیشتر و به هم نزدیک‌تر باشد، میزان عملکرد جذب انرژی بیشتر است. همچنین نتایج این روش نشان می‌دهد که افزایش تعداد اضلاع از مقاطع مثلثی به مقاطع شش ضلعی در بالابردن میزان عملکرد جذب انرژی سازه‌ها حین فرایند لهیدگی تأثیرگذار است.



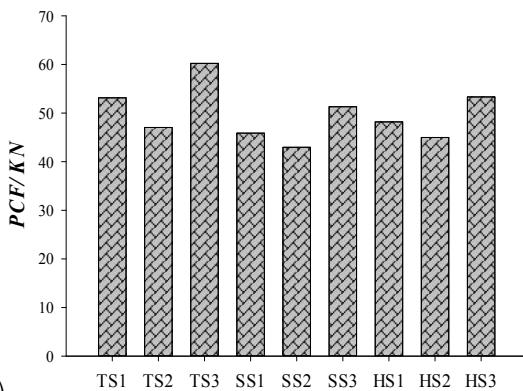
شکل ۱۰. مد تغییر شکل سازه‌های اس. شکل تحت بارگذاری دینامیکی - محوری



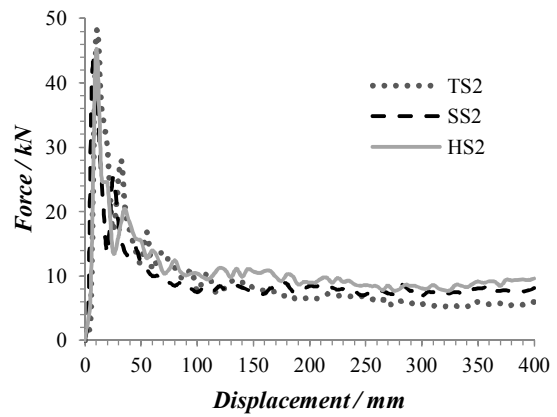
(الف)



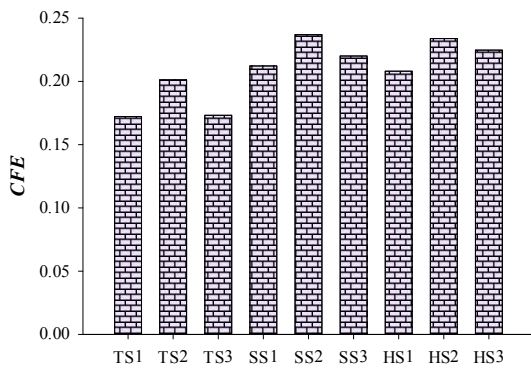
(الف)



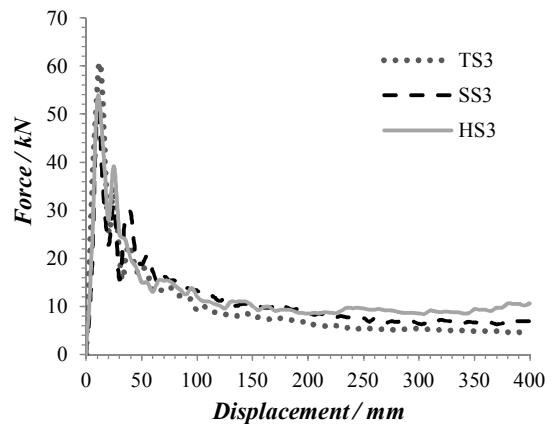
(ب)



(ب)



(پ)



(پ)

شکل ۱۲. مقایسه عملکرد سازه‌های اس. شکل

شکل ۱۱. نمودارهای نیرو-جابجایی برای سازه‌های اس. شکل

تحت بارگذاری محوری؛ الف) EA، ب) PCF، پ) CFE

الف) تک‌جداره، ب) چندجداره‌ای نوع اول، پ) نوع دوم

جدول ۲. نتایج کپراس برای تیوب‌های اس. شکل

سازه	رتبه‌بندی	TS1	TS2	TS3	SS1	SS2	SS3	HS1	HS2	HS3
		9	8	7	6	4	2	5	3	1

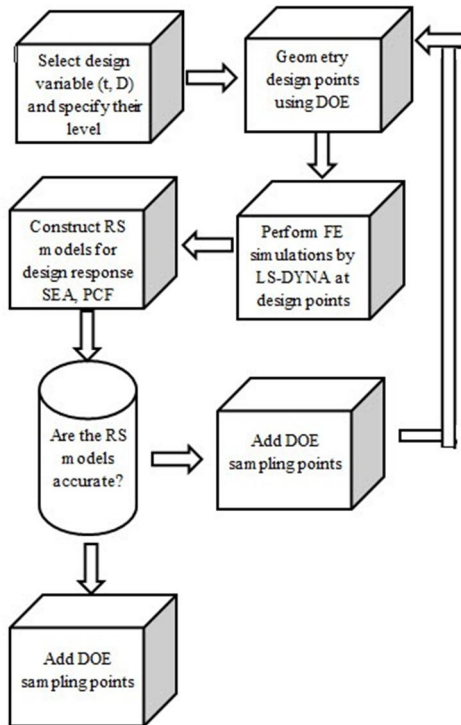
۵. تعریف مسئله بهینه‌سازی

سازه HS3 در قسمت قبل با استفاده از نتایج ال. اس. داینا و به‌کارگیری روش کپراس به‌عنوان سازه برتر از میان سازه‌های بررسی شده در این تحقیق انتخاب شده است. لذا در این قسمت، به بهینه‌سازی سازه اس. شکل شش ضلعی طبق فرایند شکل ۱۳ پرداخته می‌شود. جهت تعیین متغیرهای مؤثر بر کیفیت در مرحله طراحی و بهینه‌سازی و همچنین کاهش تغییرپذیری فرایندهای آزمایش و بهبود بازده آنها از روش طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است [۱۱-۱۴]. به دلیل خاصیت جذب انرژی مقطع‌های جدارنازک، از انرژی جذب‌شده ویژه به‌عنوان معیار مثبت و از نیروی بیشینه برخورد به‌عنوان معیار منفی در روند بهینه‌سازی استفاده می‌شود. انتخاب فضای طراحی تأثیر مستقیمی در نتایج تخمین معیارهای طراحی و بهینه‌سازی دارد. جهت تخمین معیارهای طراحی جذب انرژی ویژه و نیروی بیشینه برخورد از دو فاکتور فاصله انحرافی سازه در محدوده ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر و ضخامت در محدوده ۱/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر استفاده شده است. این فضای طراحی فاکتورها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بتوانند ابعاد جذب‌های انرژی را در مسائل جذب انرژی را پوشش دهند [۷-۸]. در این تحقیق، از روش رویه پاسخ جهت تخمین پاسخ معیارها که ارتباط بین یک یا چند پاسخ تعیین شده را با تعدادی از فاکتورهای ورودی بیان می‌کند، استفاده می‌شود. طبق شکل ۱۳ در صورت مطلوب بودن نتایج بهینه‌سازی و همگرایی رویه پاسخ معیارهای طراحی در برابر متغیرهای فاصله انحرافی و ضخامت، سازه بهینه به‌دست می‌آید.

۵-۱. بهینه‌سازی چندهدفه

برای بررسی نحوه اثرگذاری فاکتورهای مختلف بر روی معیارهای طراحی و انتخاب مشخصه‌های بهینه و همچنین ارزیابی مدل منتخب نیاز به بررسی چندمعیاره جواب‌ها می‌باشد. در این مقاله از روش بهینه‌سازی چندهدفه در جذب انرژی سازه‌ها با بهره‌گیری از روش رویه پاسخ استفاده شده است. اثر فاکتورهای ورودی (فاصله انحرافی و ضخامت) نسبت به هم و سطح تخمین معیارهای طراحی (جذب انرژی ویژه و نیروی بیشینه برخورد) در شکل ۱۴ نمایش داده شده و مشاهده می‌شود که ارتباط مستقیمی بین فاکتورهای فاصله انحرافی و ضخامت سازه وجود دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش فاصله انحرافی مقدار جذب انرژی مخصوص و بیشینه

نیروی لهیدگی کاهش می‌یابد و آن هم به این دلیل است که با افزایش فاصله انحرافی، به نیروی کمتری جهت مستهلک کردن سازه‌ها نیاز است (شکل ۱۴ الف).



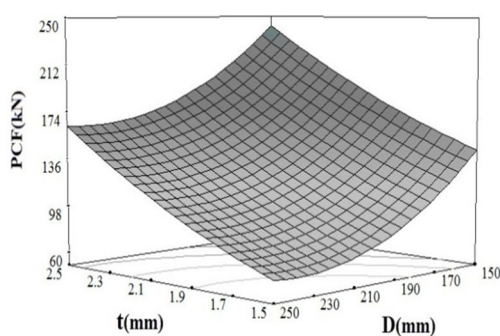
شکل ۱۳. دیاگرام طراحی آزمایش و بهینه‌سازی مقطع سازه‌ها

با افزایش ضخامت جدارها هنگامی که فاصله انحرافی سازه‌ها ثابت است، جهت له‌کردن قطعات به نیرو و انرژی بیشتری نیاز است؛ از این رو میزان شاخص غیرسودمند بیشینه نیروی لهیدگی و شاخص سودمند جذب انرژی ویژه افزایش می‌یابد (شکل ۱۴ ب). در شکل ۱۵ نمودار تأثیر فاکتورهای طراحی حاصل از بهینه‌سازی عددی با در نظر گرفتن نیروی بیشینه برخورد کمتر و جذب انرژی بیشتر جهت عملکرد فروریزش بالای سازه منتخب آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، متغیرهای فاصله انحرافی و ضخامت سازه‌ها در فضای طراحی بهینه شده با درصد مطلوب بودن مسئله رابطه مستقیمی داشته که منتج به افزایش جذب انرژی می‌شود. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که عملکرد جذب انرژی سازه شش ضلعی HS3 با ضخامت زیاد و فاصله انحرافی کم رابطه معکوس دارد. همچنین ضخامت ۱/۵۷ میلی‌متر و فاصله انحرافی ۲۰۳ میلی‌متر بهینه‌ترین فاکتورهای هندسی در محدوده فضای طراحی در نظر گرفته شده می‌باشد.

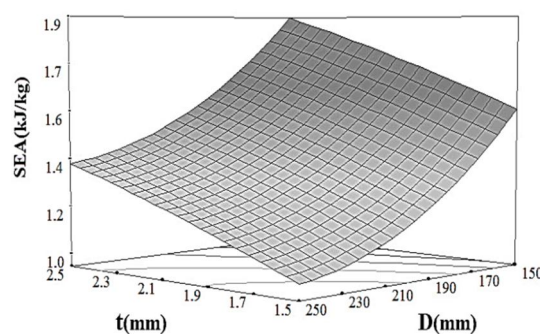
۶. نتیجه گیری

HS3 بهترین ذخیرساز انرژی می باشد. همچنین نتایج این روش بازگوکننده این موضوع است که در سطح مقاطع یکسان، سازه های چندجداره ای در مقایسه با سازه های تک جداره ای با وزن برابر، دارای عملکرد بهتر جذب انرژی می باشند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که صرفاً افزایش ضخامت نمی تواند یک عامل سودمند در بالابردن جذب انرژی باشد و می بایست روی تعداد و نوع جداره های سازه های اس. شکل جهت بالا بردن جذب انرژی، متمرکز شد. در انتها از روش طراحی آزمایشات و روش پاسخ سطح جهت بهینه سازی و بررسی رفتار فاکتورهای طراحی (فاصله انحرافی و ضخامت) بر شاخص های لهیدگی استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که فاکتور طراحی فاصله انحرافی در سازه های اس. شکل تأثیر بیشتری نسبت به بقیه فاکتورهای طراحی در عملکرد جذب انرژی سازه ها دارند.

در این تحقیق خصوصیات جذب انرژی از سازه های اس. شکل با سه سطح مقطع مثلثی، مربعی و شش ضلعی به صورت تک و چندجداره تحت ضربه محوری مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه سازی این سازه ها در نرم افزار ال. اس. داینا صورت پذیرفته است. صحت سنجی شبیه سازی المان محدود و نتایج تجربی بر روی سازه تک جداره مربعی تحت بارگذاری دینامیکی و سازه ترکیبی دایروی تحت بارگذاری شبه استاتیکی صورت پذیرفت. شاخص های لهیدگی مورد مطالعه از نوع جذب انرژی (EA)، بیشینه نیروی لهیدگی (PCF) و ضریب بازدهی نیروی لهیدگی (CFE) می باشد. در ادامه از روش تصمیم گیری چندمعیاره کپراس جهت معرفی بهترین جذب انرژی با در نظر داشتن سه شاخص لهیدگی استفاده شده است. این روش نشان می دهد که سازه

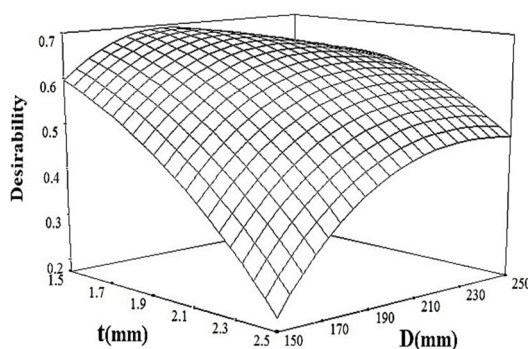


(ب)



(الف)

شکل ۱۴. سطوح پاسخ برای الف) جذب انرژی ویژه، ب) نیروی بیشینه برخورد



شکل ۱۵. تأثیر فاکتورهای طراحی فاصله انحرافی و ضخامت سازه نسبت به هم در میزان مطلوب بودن مسئله بهینه سازی

۷. مأخذ

[1] Y. Ohkami, K. Takada, K. Motomura, M. Shimamura, H. Tomizawa, M. Usuda, Collapse of thin-walled curved beam with closed-hat

section-part 1: study on collapse characteristics, SAE Technical Paper 10, 1990, pp. 900460.

[2] H. Kim, T. Wierzbicki, Effect of the cross-sectional shape of hat-type cross sections on

- crash resistance of an “S”-frame, *Thin-Walled Struct* 39, 2001, pp.535–554.
- [3] C. Zhang, A. Saigal, Crash behavior of a 3D S-shape space frame structure, *J Mater Process Tech* 191, 2007, pp.256–259.
- [4] P. Hosseini-Tehrani, M. Nikahd, Effects of ribs on S-frame crashworthiness, Proceeding of IMechE Part D, *J Auto Eng* 220, 2006, pp.1679-1689.
- [5] P. Hosseini-Tehrani, M. Nikahd, Two materials S-frame representation for improving crashworthiness and lightening, *Thin-Walled Struct* 44, 2006, pp. 407–414.
- [6] H. Kim, H., T. Wierzbicki, Effect of the cross-sectional shape on crash behavior of a 3-D space frame, *Impact Crash Lab Rep* 34, 2000, PP.256-259.
- [7] A. Khalkhali, A. Darvizeh, A. Masoumi, N. Nariman-Zadeh, Experimental and numerical investigation into the quasi-static crushing behaviour of the S-shape square tubes, *J Mech*, 27(4), 2011, pp. 585–596.
- [8] A. Elmarakbi, Y. X. Long, J. MacIntyre, Crash analysis and energy absorption characteristics of S-shaped longitudinal members, *Thin-Walled Struct* 68, 2013, pp. 65–74.
- [9] LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation. Livermore, California, USA; 2010.
- [10] X. Zhang, H. Zhang, Energy absorption of multi-cells tube columns under axial compression, *Thin-Walled Struct* 68, 2013, pp. 156–163.
- [11] Na. Qiu, Y. Gao, J. Fang, Zh. Feng, G. Sun, Q. Li, Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases, *Finite Element Anal Des* 104,2015, pp. 89–101
- [12] E. K. Zavadskas, Z. Turskis, J. Tamošaitiene, V. Marina, Multi criteria selection of project managers by applying grey criteria, *Technol. Econ Dev Econ* 14, 2008, pp. 462–477.
- [13] E. K. Zavadskas, A. Kaklauskas, Z. Turskis, J. Tamošaitiene, Selection of the effective dwelling house walls by applying attributes values determined at intervals, *J Civ Eng Manag* 14, 2008, pp. 85–93.
- [14] A. Baroutaji, M. D. Gilchrist, D. Smyth, A. G. Olabi, Crush analysis and multi-objective optimization design for circular tube under quasi-static lateral loading, *Thin-Walled Struct* 86, 2015, pp. 121–131.

پی نوشت

-
1. S-rail
 2. EA
 3. PCF
 4. CFE
 5. Response surface method
 6. Design of experiment
 7. Rigid wall planar moving force
 8. Automatic single surface
 9. Automatic surface to surface
 10. Coulomb friction
 11. Belytschko-Lin-Tsay
 12. SEA