

تحلیل برخورد و جذب انرژی ضربه محوری پوسته مخروطی با هسته ساندویچی

وحدت آزاد نادر^{۱*}، ابراهیمی سعید^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۰)

چکیده

جذب انرژی پوسته با هسته ساندویچی تحت برخورد محوری به میزان زیادی به موادی که وارد ناحیه تغییر شکل پلاستیک می‌شود بستگی دارد. اثر برهم کنش بین هسته ساندویچی و پوسته خارجی به میزان زیادی بازدهی جذب انرژی را بهبود می‌بخشد که بستگی به شکل هسته نیز دارد. در نتیجه در این مقاله پوسته مخروطی با هسته ساندویچی شامل هسته مربعی، مثلثی، کیگوم و الماسی تحت برخورد محوری با روش المان محدود غیر خطی مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این مقاله رفتار پروفیل شامل میزان جذب انرژی، نیروی برخورد و اثر برهم کنش پوسته و هسته برای هر ۴ مدل بررسی شده است. در ادامه میزان کارایی پروفیل مخروطی هسته ساندویچی نسبت به پروفیل استوانه‌ای با هسته یکسان بررسی گردیده است. به منظور کاهش هزینه محاسباتی در مدلسازی فروریزش از المان محدود برای محاسبه جذب انرژی مخصوص و ماکزیمم نیروی فروریزش به کار گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: پوسته مخروطی، هسته ساندویچی، برخورد، جذب انرژی

Abstract

The energy absorption characteristics of honeycomb sandwich cylindrical columns under axial crushing process depend greatly on the amount of material which participates in the plastic deformation. The interaction effects between the honeycomb core and the column skins greatly improve the energy absorption efficiency, which in turns depend on the shape of honeycomb core. Therefore, in this paper, the energy absorption characteristics of tapered honeycomb sandwich cylindrical columns with square, triangle, kagome and diamond cores under axial crushing loads are investigated by nonlinear finite element analysis. In this paper energy absorption, crushing force and interaction effect between skin and core for 4 models are investigated. Also energy absorption efficiency for tapered tube and cylindrical tube with similar core is investigated and the results are compared. In order to reduce the computational cost of crush simulations, finite element method is employed to formulate specific energy absorption and peak crushing force.

Keywords: tapered tube, sandwich core; crashworthiness, energy absorption

مقدمه

در آنالیز برخورد مربوط به کاربردهای مهندسی شامل مهندسی خوردرو، کشتی سازی، هواپیماسازی و سایر صنایع به ویژگی‌های جذب انرژی و فروریزش پوسته‌های ساندویچی توجه ویژه شده است. برای رسیدن به ایمنی لازم سرنشین خودرو لازم است تا توانایی جذب انرژی مخصوص (نسبت انرژی جذب شده به جرم پوسته) بیشینه و ماکزیمم نیروی فروریزش کمینه باشد. هدف اصلی اینست که انرژی جنبشی اولیه توسط پروفیل‌ها جذب و دامنه نوسانات نیرو به اندازه کافی پایین باشد تا سرنشین صدمه نبیند.

یکی از مهمترین کاربردهای سیستم‌های جاذب انرژی در صنعت مهندسی خوردرو است. پارامترهای مختلفی مانند تغییرشکل خوردرو پس از تصادف و شتاب خوردرو در حین ضربه و فروریزش برای پیش‌بینی صدمه بررسی می‌گردند. زمانی که یک جاذب انرژی برای یک سازه مانند خوردرو طراحی می‌گردد فاکتورهای مختلفی مانند انرژی جذب شده بر واحد جرم، بیشینه نیروی فروریزش و ... می‌تواند برای محاسبه بازده مورد استفاده قرار بگیرد. جذب انرژی مخصوص بالاتر مهمترین فاکتور در طراحی جاذب می‌باشد.

یکی دیگر از کاربردهای جاذب‌های انرژی در طراحی سازه هواپیما می‌باشد. مهندسين در طراحی استرات‌های عمودی هواپیما^۱ به منظور جذب انرژی ضربه از این جاذب‌ها استفاده می‌کنند. به منظور افزایش کارایی، تست رهايش عمودی سازه بدنه هواپیما در سال‌های اخیر مورد توجه بوده است. در مدت زمان ضربه پروفیل‌های عمودی سازه تحت بار محوری فشاری قرار می‌گیرد [۱-۲].

به طور کلی جاذب‌های انرژی به شکل تیوب‌های استوانه-ای یا مخروطی می‌باشند. نتایج بدست آمده از کمناش تیوب-های استوانه‌ای نشان می‌دهد که این تیوب‌ها توانایی جذب انرژی کمتری نسبت به تیوب‌های مخروطی دارند [۳]. در تیوب‌های مخروطی متوسط نیروی فروریزش بر حسب تغییرشکل پروفیل ثابت می‌باشد و در ضربه‌های محوری نسبت به پروفیل‌های استوانه‌ای بهتر هستند [۴]. در نتیجه پروفیل‌های مخروطی بر پروفیل‌های استوانه‌ای مقدم می‌باشند. ویژگی جذب انرژی پروفیل‌های مخروطی تحت ضربه محوری مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. نتایج تجربی بر مقایسه نمودار نیرو- طول فروریزش و نمود فروریزش برای پروفیل‌های استوانه-

ای و مخروطی متمرکز گشته است [۶-۹]. کارهای انجام شده بر روی چنین مدل‌هایی برای مدهای مختلف تغییرشکل محوری [۱۰-۱۲]، اثر قیود تکیه‌گاهی برای مدهای فروریزش و جذب انرژی [۱۳]، و استفاده از کامپوزیت‌ها صورت گرفته است [۱۴-۱۵]. برخی دیگر از تحقیقات بررسی تیوب‌های با مقاطع مربعی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۶-۱۷].

ایده افزایش منطقه تغییرشکل پلاستیک برای پروفیل‌های نازک در پروسه کمناش با استفاده از هسته ساندویچی این است که ناحیه بیشتری دچار کمناش موضعی می‌گردد. اثر برهم‌کنش بین پروفیل و هسته باعث بهبود نیروی فروریزش و افزایش جذب انرژی می‌گردد. استفاده از مواد سبک مانند هسته ساندویچی بر روی مدهای خمشی پوسته توخالی موثر بوده و طول خمشی را کاهش و تعداد لوپ‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین اثر برهم‌کنش بین پوسته و هسته باعث افزایش جذب انرژی پروفیل می‌شود. قابل ذکر است وقتی از فوم‌ها به عنوان هسته استفاده می‌شود میزان قابل توجهی از فوم وارد فاز پلاستیک نمی‌گردد که باعث کاهش میزان عملکرد و بازدهی در جذب انرژی ضربه می‌گردد [۱۸، ۱۹]. بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت پروفیل‌های هسته ساندویچی در کار اخیر ما مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰]. در نتیجه در این مقاله فروریزش برخی از پروفیل‌های مخروطی با هسته ساندویچی بررسی گردیده‌اند. بدین منظور ویژگی‌های مربوط به جذب انرژی و اثر برهم‌کنش بین پوسته و هسته ساندویچی بدست آمده‌اند.

تئوری

فروریزش

مطالعه پدیده فروریزش پروفیل‌های نازک و بهینه‌سازی عملکرد این پروفیل‌ها یکی از موضوعات مورد علاقه پژوهشگران می‌باشد. مطالعه نمودار نیرو بر حسب طول فروریزش و یا بر حسب زمان فروریزش در این موضوع معمول است که در شکل ۱ نشان داده شده است که ویژگی‌های ضربه را شرح می‌دهد. انرژی جذب شده E معادل کار مکانیکی انجام شده توسط نیروی $F(x)$ در طول فروریزش d است و از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد؛

$$E(d) = \int_0^d F(x) dx \quad (1)$$

۲۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین جرم متمرکز الحاقی به پروفیل ۵۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است.

همچنین نیروی متوسط F_{avg} برای این طول فروریزش از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد؛

$$F_{avg} = E(d)/d \quad (2)$$

برای تعریف جذب انرژی مخصوص مواد مختلف با وزن-های گوناگون، جذب انرژی مخصوص بر واحد جرم M بیان می‌گردد؛

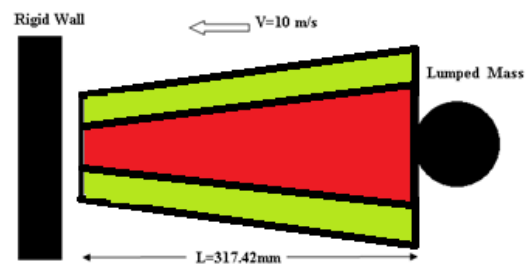
$$SEA = E/M \quad (3)$$

مشهود است مقدار بیشتر SEA نشان‌دهنده قابلیت جذب انرژی بالا می‌باشد.

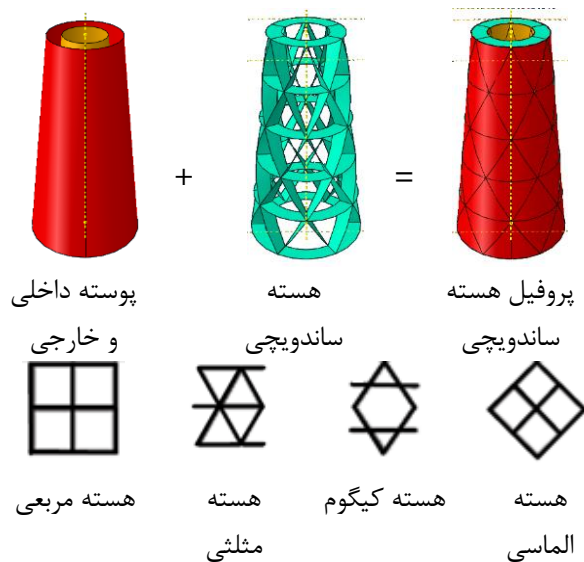
جدول ۱- تعداد سلول ها برای هسته ساندویچی

الماسی	کیگوم	مثلثی	مربعی
۶	۶	۶	۶
-	$5 + [2 \times (0/5)]$	۵	۶

در نرم افزار آباکوس المان پوسته داخلی و خارجی از نوع S4R در نظر گرفته شده است. تماس پوسته‌ها و سطح صلب از نوع surface-to-surface با ضریب اصطکاک ۰/۱ تعریف شده است. تماس سطوح با خودشان در هنگام فروریزش با self-contact، تماس هسته با پوسته داخلی، خارجی و دیواره صلب general-contact می‌باشد. تعداد المان‌ها در کل ۲۱۷۳۳ المان می‌باشد.



شکل ۱- مدل ضربه با جرم متمرکز



شکل ۲- ساختار هندسی پروفیل مخروطی با هسته ساندویچی

مشخصات مواد

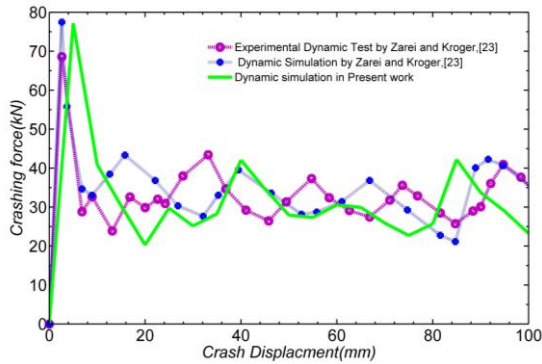
آلومینیوم و آلیاژهایش یکی از مطلوب‌ترین مواد برای جذب انرژی بین مواد مختلف می‌باشد که در صنعت خودروسازی به طور گسترده استفاده می‌شود. آلومینیوم به خوبی شکل‌پذیر و در نتیجه قابل تولید در شکل‌ها و مقاطع گوناگون به روش اکستروژن می‌باشد. پروفیل جدار نازک و هسته ساندویچی آن در این مقاله از جنس آلومینیوم آلیاژی AA6060-T4 در نظر گرفته شده است (جدول ۲). با در نظر

مدل المان محدود

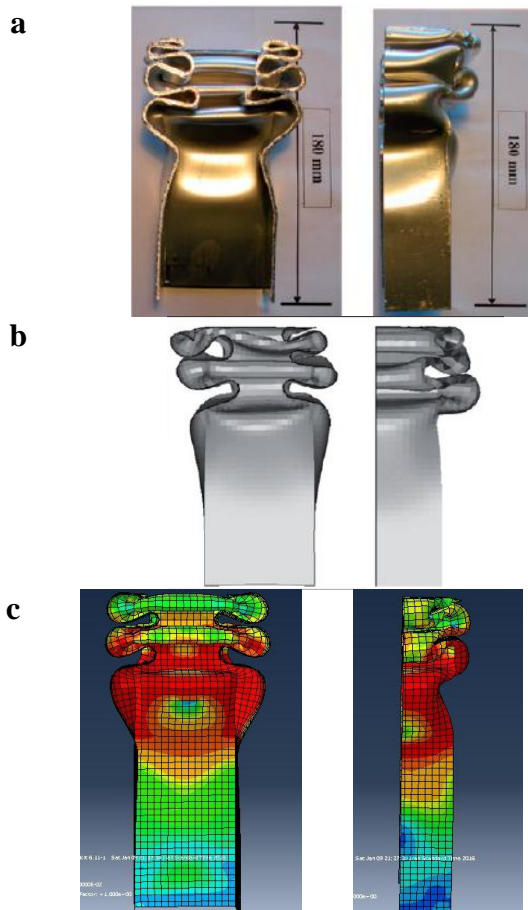
چهار مدل از پروفیل‌های ساندویچی مخروطی با مدل-سازی عددی توسط نرم افزار ABAQUS (آباکوس) شامل هسته مربعی، مثلثی، الماسی و کیگوم بررسی گردیده‌اند که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. این مدل از دو پوسته مخروطی و یک هسته تشکیل شده است. پوسته کوچکتر در مرکز قرار می‌گیرد و سپس هسته ساندویچی روی آن قرار می‌گیرد. در نهایت پوسته بزرگتر در لایه بیرونی و روی هسته جانمایی می‌گردد (شکل ۲). پارامتر L طول پروفیل در راستای محور که ۳۱۷/۴۲ میلی‌متر می‌باشد. قطر داخلی و خارجی در صفحه بالایی به ترتیب ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر و در صفحه پایینی ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ضخامت دیواره برای دیواره داخلی و خارجی با پارامتر t_1 و ضخامت هسته ساندویچی t_2 تعریف شده است. تعداد سلول‌ها در جهت محیطی و طولی برای هر یک از مدل‌ها در جدول ۱ داده شده است.

در حل مسئله فرض بر این است که سرعت پروفیل در لحظه برخورد ۱۰ متر بر ثانیه باشد و مدت زمان آنالیز برخورد

نیروی ضربه ۷۷ کیلو نیوتن می‌باشد که تطابق بسیار خوبی با نتایج مرجع مورد نظر دارد. شکل ۴ تغییرات نیروی برخورد را در طول فروریزش پروفیل نشان می‌دهد. شکل ۵ تغییر شکل پروفیل را در تست تجربی و عددی مرجع و این تحقیق نشان می‌دهد.



شکل ۴- تغییرات نیروی برخورد در طول فروریزش برای مدل‌سازی و تحلیل در این مقاله و مرجع [۲۳]



شکل ۵- فروریزش: (a) تست تجربی [۲۳] (b) تحلیل عددی [۲۰] (c) تحلیل عددی در این مقاله

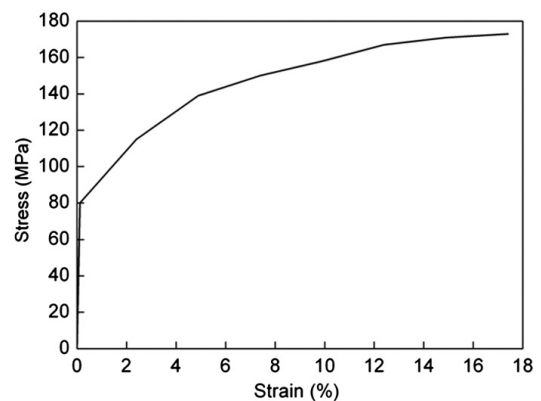
گرفتن اثر کرنش‌سختی، تنش جریان از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد [۲۱].

جدول ۲- مشخصات آلومینیوم آلیاژی AA6060-T4 [۲۲]

دانسیته	۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب
مدول الاستیسیته	۶۸/۲۰ گیگا پاسکال
نسبت پواسون	۰/۳
تنش تسلیم	۸۰ مگا پاسکال
تنش نهایی	۱۷۳ مگا پاسکال

$$S_0 = \sqrt{\frac{S_y S_u}{1+n}} \quad (4)$$

که n توان سختی کرنشی ماده و در اینجا برای آلومینیوم ۰/۲۳ در نظر گرفته شده است [۲۲]. رابطه کامل بین تنش و کرنش برای این آلیاژ آلومینیوم در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- تنش کششی بر حسب کرنش برای آلومینیوم آلیاژی AA6060-T4 [۲۲]

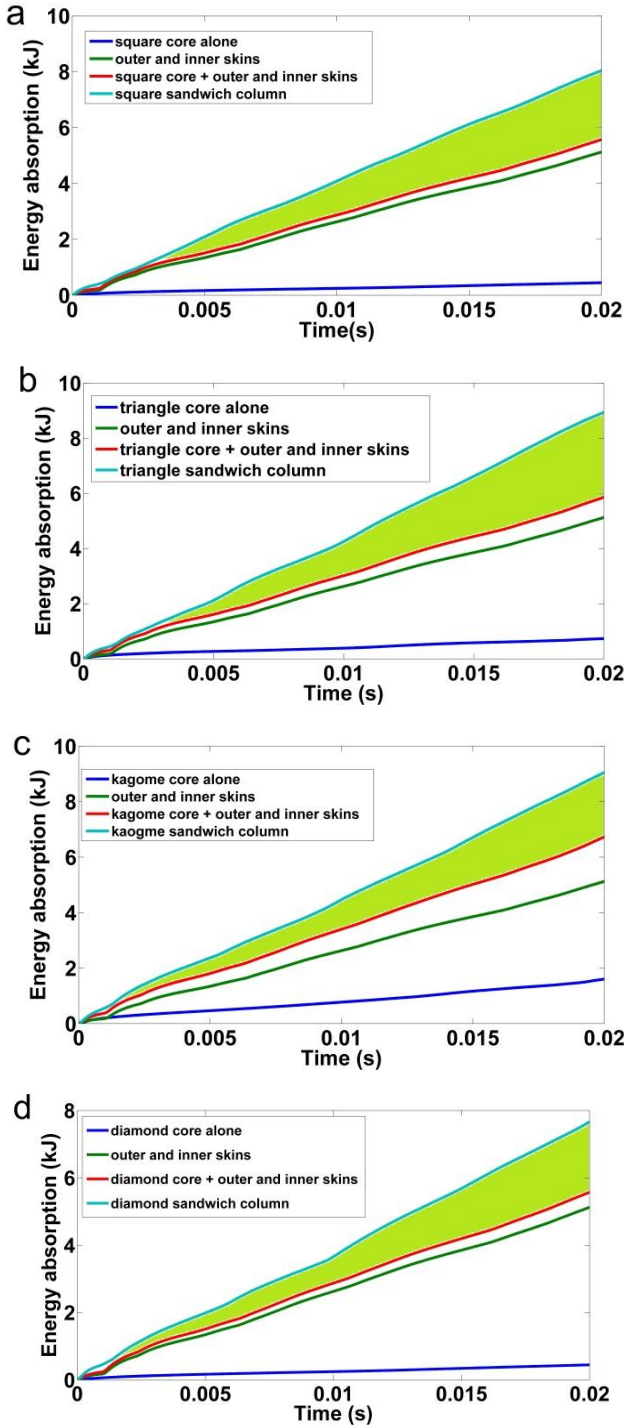
نتایج

صحه گذاری

ابتدا برای اطمینان از صحت روش تحلیل المان محدود یک مدل بر مبنای مطالعات قبلی محققان تحلیل می‌گردد. برای این منظور پروفیل استوانه‌ای با مقطع مربعی (مدل S-1 [۲۳]) مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق مورد نظر تست تجربی و تحلیل عددی مربوط به ضربه دینامیکی انجام شده است. بیشینه نیروی ضربه حاصل از تست تجربی و تحلیل عددی به ترتیب ۶۸ و ۷۸ کیلو نیوتن می‌باشد. نتایج مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار آباکوس در مقاله پیش‌رو برای بیشینه

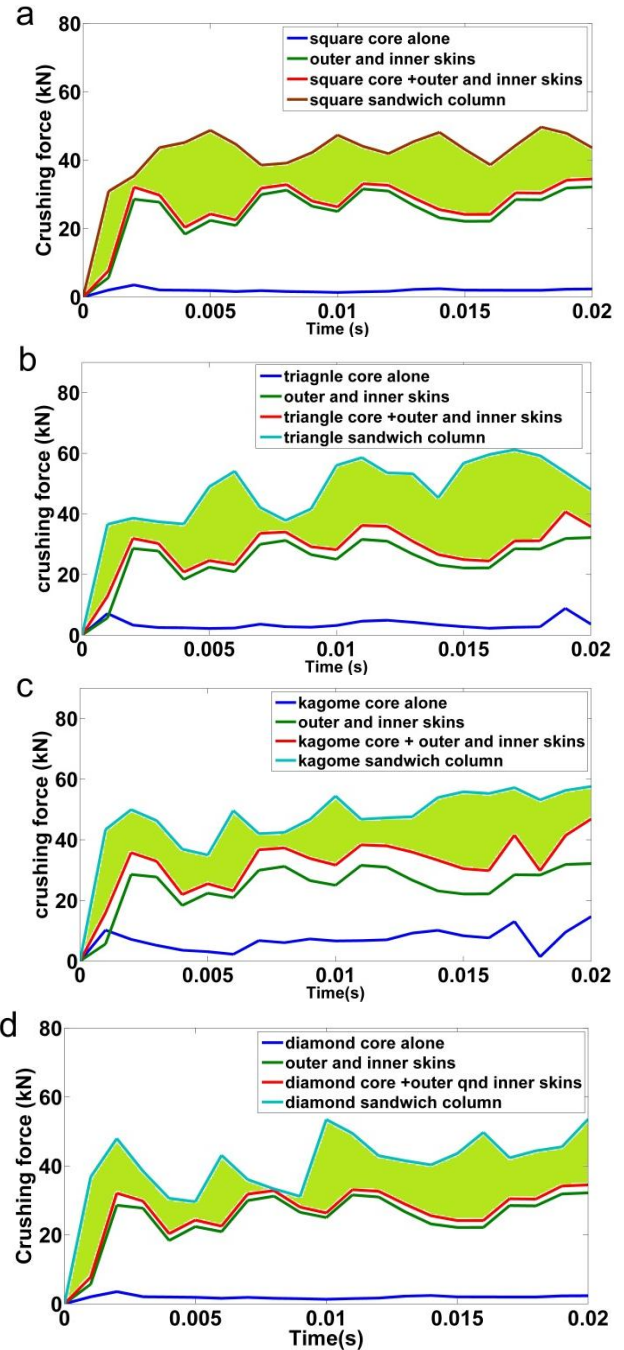
اثر برهم کنش

اثر برهم کنش بین جداره‌های خارجی و داخلی پروفیل و هسته ساندویچی در این قسمت بررسی می‌گردد. شکل‌های ۶ و ۷ نمودار نیروی فروریزش و انرژی را بر حسب مدت زمان فروریزش (۲۰ میلی ثانیه) در حالت‌های مختلف نشان می‌دهند.



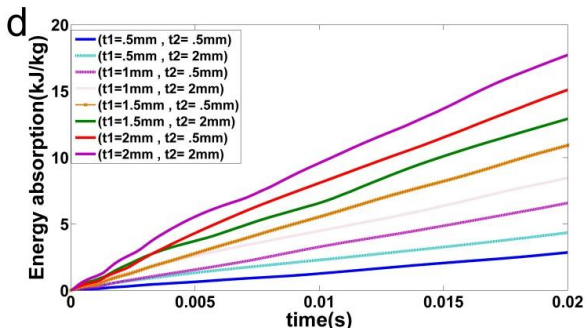
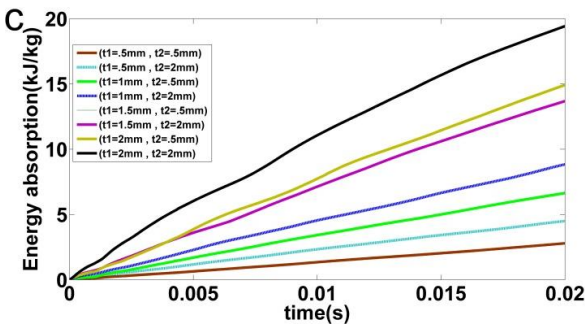
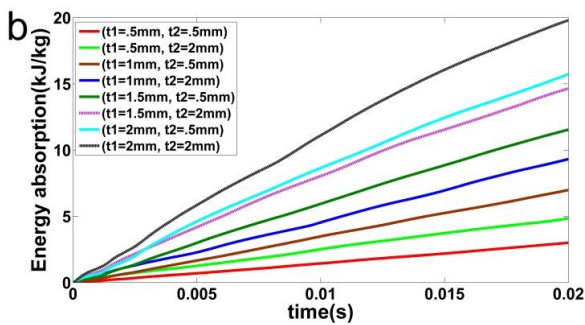
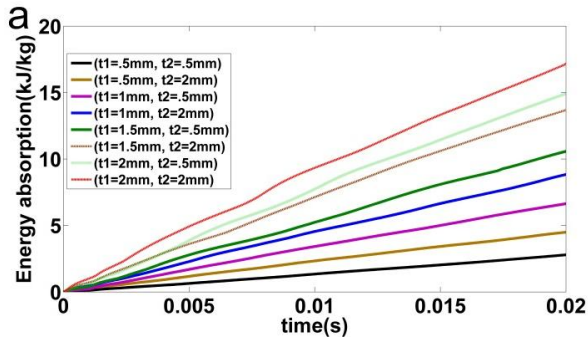
شکل ۷- اثر برهم کنش در جذب انرژی ضربه:
(a) مربعی (b) مثلثی (c) کیگوم (d) الماسی

نمودارها در شکل‌های ۶ و ۷ حالت‌های مختلف هسته ساندویچی، پوسته داخلی و خارجی، پوسته‌های داخلی و خارجی + هسته ساندویچی و پروفیل با هسته ساندویچی نشان می‌دهند. مطابق با اشکال و در نظر گرفتن اثر برهم کنش



شکل ۶- نیروی فروریزش پروفیل مخروطی با هسته (a) مربعی (b) مثلثی (c) کیگوم (d) الماسی

نیروی افزایش می‌یابد. همچنین بوضوح مشخص است با افزایش ضخامت، نیروی فروریزش افزایش می‌یابد.



شکل ۸- رابطه بین جذب انرژی و ضخامت برای پروفیل هسته:

(a) مربعی (b) مثلثی (c) کیگوم (d) الماسی

برای تمام مدل‌ها، سطح نیروی فروریزش و انرژی جذب‌شده برای پروفیل هسته ساندویچی بیشتر از جمع هسته و پوسته‌ها بطور مستقل از اثر برهم‌کنش می‌باشد. سطح سبز روشن نشان داده شده در شکل‌ها افزایش سطح را در اثر برهم‌کنش هسته و پوسته‌ها را نشان می‌دهد.

در جدول ۳ جذب انرژی مخصوص بر حسب زمان ۲۰ میلی ثانیه برای هسته + پوسته‌های داخلی و خارجی و پروفیل مخروطی با هسته ساندویچی داده شده است. مطابق با اثر برهم‌کنش، جذب انرژی مخصوص برای تمام مدل‌ها برای پروفیل هسته ساندویچی به وضوح بیشتر از حالت هسته + پوسته‌هاست. به عنوان مثال برای مدل پروفیل با هسته مثلثی ۵/۵۲٪ افزایش جذب انرژی مخصوص را به خاطر اثر برهم‌کنش داریم.

جدول ۳- بهبود جذب انرژی در پروفیل‌های هسته ساندویچی

مدل	%SEA improvement	SEA sandwich	SEA skin+core	SEA improvement
مربعی	۴۲/۱۲	۸۹۳۱	۶۲۸۴	۲۶۴۷
مثلثی	۵۲/۵۵	۸۵۱۰	۵۵۷۹	۲۹۳۱
کیگوم	۳۴/۵۲	۸۵۳۹	۶۳۴۸	۲۱۹۱
الماسی	۳۷/۵۵	۸۱۵۳	۵۹۲۷	۲۲۲۶

نمودار جذب انرژی بر حسب زمان برای پروفیل مخروطی هسته ساندویچی با هسته‌های مختلف مورد مطالعه در شکل ۸ ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش پارامترهای طراحی t_1 و t_2 میزان جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد. همچنین جذب انرژی پروفیل هسته مثلثی بیشتر از کیگوم، کیگوم بیشتر از مربعی و مربعی بیشتر از الماسی است.

نمودار نیروی فروریزش بر حسب زمان برای چهار مدل پروفیل هسته ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است و در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در طول پروسه فروریزش، نیروی فروریزش نوسانات پریودیک دارد که علت آن تشکیل چین‌خوردگی‌های پروفیل می‌باشد. برای تشکیل هر چین پلاستیکی (فرورفتگی و برآمدگی جداره) در ابتدا نیروی فروریزش افزایش می‌یابد تا بر مقاومت سازه در مقابل تغییر شکل غلبه کند سپس برای تشکیل نیم‌چین بعدی نیرو کاهش می‌یابد. در ادامه برای تشکیل چین بعدی دوباره

و الماسی) در پروفیل‌های مخروطی و استوانه‌ای بدست آمده و در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. این جداول افزایش میزان جذب انرژی بیشینه و کمینه برای همه مدل‌ها در پروفیل مخروطی نسبت به پروفیل استوانه‌ای را نشان می‌دهد. بیشترین افزایش جذب انرژی در کمینه انرژی مدل کیگوم مشاهده می‌گردد که برابر ۱۲۳/۱٪ می‌باشد. مدل الماسی کمترین افزایش در بیشینه جذب انرژی دارد (۵۴/۹٪).

جدول ۴- مقایسه SEA (J/kg) برای پروفیل مخروطی و استوانه‌ای در بیشترین مقدار جذب انرژی [۲۰]

مدل هسته	درصد بهبود جذب انرژی	افزایش جذب انرژی	پروفیل استوانه‌ای [۲۰]	پروفیل مخروطی
مربعی	۶۱/۰	۴۵۶۱/۷	۷۴۷۰/۳	۱۲۰۳۲/۱
مثلثی	۶۸/۸	۴۹۷۴/۰	۷۲۲۳/۱	۱۲۱۹۷/۲
کیگوم	۷۶/۳	۵۲۱۱/۲	۶۸۲۳/۸	۱۲۰۳۵/۰
الماسی	۵۴/۹	۴۲۸۲/۶	۷۷۹۷/۵	۱۲۰۸۰/۱

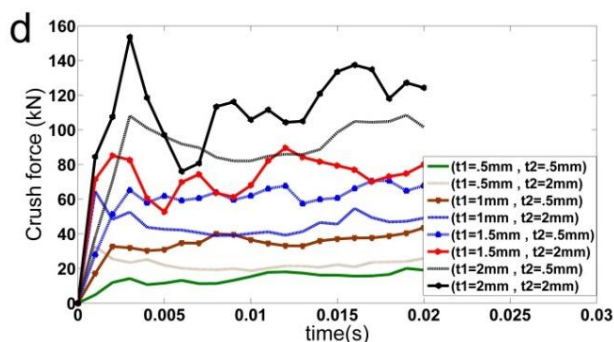
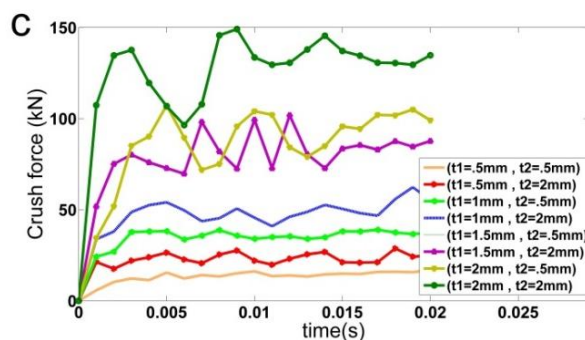
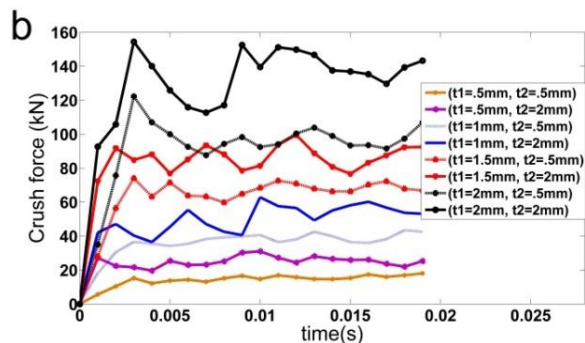
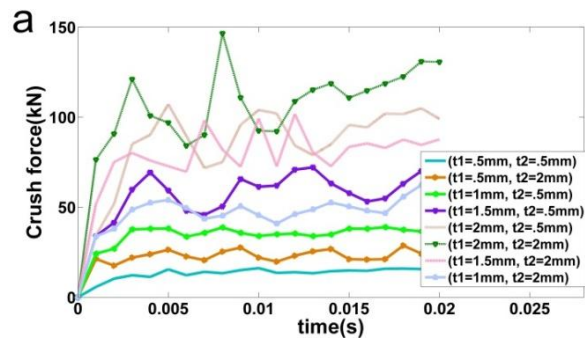
جدول ۵- مقایسه SEA (J/kg) برای پروفیل مخروطی و استوانه‌ای در کمترین مقدار جذب انرژی [۲۰]

مدل هسته	درصد بهبود جذب انرژی	افزایش جذب انرژی	پروفیل استوانه‌ای [۲۰]	پروفیل مخروطی
مربعی	۷۸/۵	۲۵۷۶/۵	۳۲۸۲	۵۸۵۸/۵
مثلثی	۵۵/۴	۱۸۳۸/۴	۳۳۱۶/۷	۵۱۵۵/۱
کیگوم	۱۲۳/۱	۳۴۲۵/۴	۲۷۸۱	۶۲۰۶/۵
الماسی	۹۱/۸	۲۶۳۹/۰	۲۸۷۲/۶	۵۵۱۱/۶

مقایسه پروفیل با هسته ساندویچی و توخالی

در این قسمت به بررسی میزان جذب انرژی و بیشینه نیروی برخورد در سه مدل به شرح زیر می‌پردازیم:

- مدل ۱، یک پروفیل با هسته ساندویچی
- مدل ۲، پروفیل توخالی (بدون هسته) به صورت پوسته مخروطی با ابعادی یکسان با پوسته خارجی مدل ۱ و با ضخامت بالا
- مدل ۳، پروفیل توخالی (بدون هسته) به صورت پوسته مخروطی با ابعاد دو برابری پوسته خارجی مدل ۱ و با ضخامت کمتر



شکل ۹- رابطه بین نیروی فروریزش و ضخامت برای پروفیل هسته: (a) مربعی (b) مثلثی (c) کیگوم (d) الماسی

مقایسه پروفیل مخروطی و استوانه‌ای

در این قسمت قابلیت جذب انرژی برای پروفیل مخروطی و استوانه‌ای که هر دو حاوی هسته‌های هم نوع ساندویچی هستند بررسی می‌گردد. برای این منظور بیشترین و کمترین میزان جذب انرژی برای هر مدل (هسته مربعی، مثلثی، کیگوم

نتیجه‌گیری

در این مقاله پوسته مخروطی با هسته ساندویچی شامل هسته مربعی، مثلثی، کیگوم و الماسی تحت برخورد محوری با روش المان محدود غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از پوسته با هسته ساندویچی مخروطی در پدیده برخورد به میزان زیادی جذب انرژی را نسبت به پوسته با هسته ساندویچی استوانه‌ای افزایش می‌دهد.

اثر برهم‌کنش بین جداره‌های خارجی و داخلی پروفیل و هسته ساندویچی بررسی گردید. نمودار نیروی فروریزش و انرژی بر حسب مدت زمان فروریزش (۲۰ میلی ثانیه) در حالت‌های مختلف شامل هسته ساندویچی، پوسته داخلی و خارجی، پوسته‌های داخلی و خارجی + هسته ساندویچی و پروفیل با هسته ساندویچی نشان داده شده است. مطابق با اشکال و در نظر گرفتن اثر برهم‌کنش برای تمام مدل‌ها، سطح نیروی فروریزش و انرژی جذب شده برای پروفیل هسته ساندویچی بیشتر از جمع هسته و پوسته‌ها بطور مستقل از اثر برهم‌کنش می‌باشد. مطابق با جدول ۳، جذب انرژی برای تمام مدل‌ها برای پروفیل هسته ساندویچی به وضوح بیشتر از حالت هسته + پوسته‌هاست. با افزایش پارامترهای طراحی t_1 و t_2 میزان جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد. همچنین جذب انرژی پروفیل هسته مثلثی بیشتر از کیگوم، کیگوم بیشتر از مربعی و مربعی بیشتر از الماسی است.

قابلیت جذب انرژی برای پروفیل مخروطی و استوانه‌ای که هر دو حاوی هسته‌های هم‌نوع ساندویچی هستند مقایسه گردید. برای این منظور بیشترین و کمترین میزان جذب انرژی برای هر مدل (هسته مربعی، مثلثی، کیگوم و الماسی) در پروفیل‌های مخروطی و استوانه‌ای بدست آمده و در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. این جدول افزایش میزان جذب انرژی بیشینه و کمینه برای همه مدل‌ها در پروفیل مخروطی نسبت به پروفیل استوانه‌ای را نشان می‌دهد.

پی‌نوشت

1- Aircraft's vertical strut

منابع و مراجع

[1] Ren Y., Xiang J., "A comparative study of the crashworthiness of civil aircraft with different strut configurations", Int J Crashworthiness, Volume 15, 2010

نکته مهم این است که در این سه حالت وزن را یکسان در نظر می‌گیریم. نتایج حاصل از بررسی برای هر ۴ مدل هسته در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- مقایسه جذب انرژی و بیشینه نیروی برخورد

مدل هسته	بیشینه نیروی برخورد	بیشینه انرژی	بیشینه جرم	بیشینه انرژی	بیشینه جرم
مربعی	۰/۹	۱۷۱۸	۱۲۷۵۷	۸۰۳۸	۱۲۷۵۷
مربعی	بیشینه نیروی برخورد	۱۴/۷	۱۷۵/۱	۴۹/۶	۱۷۵/۱
مثلثی	۱/۰۵	۲۰۶۷	۱۵۴۵۹	۸۹۳۶	۱۵۴۵۹
مثلثی	بیشینه نیروی برخورد	۱۶/۵	۱۶۵/۲	۶۱/۱	۱۶۵/۲
کیگوم	۱/۰۵	۲۰۶۷	۱۵۴۵۹	۹۰۵۲	۱۵۴۵۹
کیگوم	بیشینه نیروی برخورد	۱۶/۵	۱۶۵/۲	۵۷/۶	۱۶۵/۲
الماسی	۰/۹۴	۱۷۱۳	۱۳۴۳۵	۷۶۶۴	۱۳۴۳۵
الماسی	بیشینه نیروی برخورد	۱۳/۱	۱۵۷/۴	۵۳/۵	۱۵۷/۴

از مقایسه نتایج جدول ۶ می‌توان نتیجه گرفت که در صورت جایگزینی هر مدلی از پروفیل هسته ساندویچی با یک پوسته مخروطی با وزن یکسان، میزان جذب انرژی ممکن است که کمتر (مدل ۳) و یا بیشتر (مدل ۲) باشد. در مدل ۲ چون کل جرم پروفیل در پوسته بیرونی توزیع شده است و پوسته بیرونی به مانند یک پوسته ضخیم عمل می‌کند و میزان نیروی برخورد و انرژی جذب شده افزایش می‌یابد. در مدل ۳ جرم در پوسته مخروطی با ابعادی دو برابر پوسته خارجی مدل ۱ توزیع شده است و پوسته به مانند یک پوسته نازک عمل می‌کند و در نتیجه میزان نیرو و انرژی کاهش می‌یابد. در بررسی برخورد خودرو، طراح سعی بر آن دارد تا نیروی ضربه وارده به سرنشین کمترین مقدار (در اغلب مراجع کمتر از ۷۰ کیلو نیوتن) را داشته باشد (مدل ۲ نامناسب است) و در عین حال بیشینه جذب انرژی را داشته باشد (مدل ۳ نامناسب است). در نتیجه با استفاده از پروفیل هسته ساندویچی توزیع جرم می‌تواند به گونه‌ای باشد که به هر دو هدف فوق دست یابیم. البته قابل ذکر است با یک پوسته مخروطی با ابعادی و ضخامتی متفاوت از مدل ۲ و ۳، حل یک مسئله بهینه‌سازی به این هدف دست یافت.

- impacted frusta*”, Thin Walled Struct , Volume 39 , 2001
- [14] Karbhari V.M., Chaoling X. , “Energy absorbing characteristics of circular frusta”, Int J Crashworthiness, Volume 8, 2003
- [15] Mamalis A.G., Manolakos D.E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B., “Experimental determination of splitting in axially collapsed thick-walled fibre-reinforced composite frusta”, Thin Walled Struct, Volume 28, 1997
- [16] Mamalis A.G., Manolakos D.E., Ioannidis M.B., Kostazos P.K., Hassiotis G., “ Finite element simulation of the axial collapse of thin-wall square frusta”, Int J Crashworthiness, Volume 6, 2001
- [17] Mamalis A.G., Manolakos D.E., Viegelaahn G.L. , “ The axial crushing of thin PVC tubes and frusta of square cross-section”, Int J Impact Eng, Volume 8, 1989
- [18] Zhang Z., Liu S., Tang Z., “ Crashworthiness investigation of kagome honeycomb sandwich cylindrical column under axial crushing loads”, Thin Walled Struct, Volume 48, 2010
- [19] Zhang Z., Liu S., Tang Z., “ Comparisons of honeycomb sandwich and foam-filled cylindrical columns under axial crushing loads”, Thin Walled Struct, Volume 49, 2011
- [20] Ebrahimi S., VahdatAzad N. , “Multiobjective Optimization and Sensitivity Analysis of Honeycomb Sandwich Cylindrical Columns under Axial Crushing Loads”, Thin Walled Struct, Volume 88, 2015
- [21] Wierzbicki T., “ Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam”, Comp Struct, Volume 68, 1998
- [22] Tang Z., Liu S., Zhang Z. , “ Energy absorption properties of non-convex multi-corner thin-walled columns”, Thin Walled Struct, Volume 51, 2015.
- [23] Zarei H.R., Kroger M., “ Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application”, Thin Walled Struct, Volume 46, 2008.
- [2] Zou T., Mou H., Feng Z., “ Research on Effects of Oblique Struts on Crashworthiness of Composite Fuselage Sections”, Journal of Aircraft, Volume 49, 2012
- [3] Gupta NK, Easwara Prasad GL, Gupta SK., “Plastic collapse of metallic conical frusta of large semi-apical angles”, Int J Crashworthiness, Volume 2, 1997
- [4] Reid S.R., Reddy T.Y., “Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross-section”, Int J Mech Sci, Volume 28, 1986
- [5] Nagel G.M., Thambiratnam D.P., “Dynamic simulation and energy absorption of tapered tubes under impact loading”, Int J Crashworthiness, Volume 9, 2004
- [6] Mamalis A.G., Johnson W., “The quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression”, Int J Mech Sci, Volume 25, 1983
- [7] Mamalis A.G., Johnson W., Viegelaahn G.L. , “ The crumpling of steel thin walled tubes and frusta under axial compression at elevated strain rates: some experimental results”, Int J Mech Sci, Volume 26, 1984
- [8] Mamalis A.G., Manolakos D.E., Saigal S., Viegelaahn G.I., Johnson W. , “Extensional plastic collapse of thin-walled frusta as energy absorbers”, J Mech Sci, Volume 28, 1986
- [9] Mamalis A.G., Manolakos D.E., Viegelaahn G.L., Vaxevanidis N.M., Johnson W. , “ On the inextensional axial collapse of thin PVC conical shells”, Int J Mech Sci , Volume 28, 1986
- [10] Alghamdi A.A.A. , “ Reinversion of aluminium frusta”, Thin Walled Struct, Volume 40, 2002
- [11] Alghamdi A.A.A. , “ Folding-crumpling of thin-walled aluminum frusta”, Int J Crashworthiness, Volume 7, 2002
- [12] Alghamdi A.A.A, Aljawi A.A.N, Abu-Mansour T.M.N. , “Modes of axial collapse of unconstrained capped frusta”, Int J Mech Sci. Volume 44, 2002
- [13] Singace A.A., El-Sobky H., Petsios M. , “ Influence of end constraints on the collapse of axially