

بررسی جذب انرژی پروفیل استوانه‌ای پر شده با فوم گرادیانی در آزمون شبه استاتیکی

وحدت آزاد نادر^{1*}، لیاقت غلامحسین²، وحدت آزاد ابازر³، نگهبان برون علی⁴، دهقانی محمدآبادی محسن⁵
1- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران
2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران
4- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران
5- دانش‌آموخته دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران
(دریافت مقاله: 1397/06/27 تاریخ پذیرش: 1398/04/17)

چکیده

برای شناخت هرچه بهتر خواص مکانیکی مواد جاذب، ضروری است آزمایش‌هایی برای ارزیابی جاذب صورت گیرد. در سال‌های اخیر استفاده از فوم تابعی به عنوان جاذب انرژی قابل توجه بوده است. تاکنون فوم تابعی به روش صنعتی تولید نشده است. در تحقیقات قبلی فوم تابعی در نرم افزار مدلسازی شده است. در این مقاله از ایده تولید فوم تابعی به روش گسسته استفاده می‌شود. در این آزمایشات حالت گرادیان چگالی در نمونه‌ها مورد آزمون قرار می‌گیرد فوم‌های پلی‌یورتان با دانسیته و خواص مکانیکی مختلف تولید شدند و فوم تابعی ساخته شده در داخل پروفیل قرار می‌گیرند. در این تحقیق فوم‌های تابعی تولید شده به صورت گرادیان محوری، گرادیان شعاعی و گرادیانی دو جهته مورد بررسی قرار گرفتند. با انجام آزمایشات بارگذاری فشاری (استاتیک) می‌توان خواص مکانیکی بهینه برای طراحی پروفیل‌های جاذب ضربه را به دست آورد. نتایج این تحقیق نشان داد انرژی جذب شده بر واحد جرم برای پروفیل تابعی محوری بسیار مطلوب است همچنین ساخت و انجام آزمایش روی نمونه جاذب با مقطع مخروطی از دیگر نوآوری‌های این طرح به شمار می‌آید.
واژه‌های کلیدی: جاذب ضربه، پلی‌یورتان، فوم گرادیانی، جذب انرژی، فوم تابعی

Energy absorption investigation of cylindrical tube filled by functionally graded foam in quasi static test

1st Nader Vahdatazad, 2nd Golamhosein Liaghat, 3rd Abazar Vahdatazad 4th Ali Negahbanborun

Abstract

For a better understanding of the mechanical properties of absorbent, it is essential for the evaluation of absorbent experiments. In recent years the use of functionally foam as the energy absorber has been remarkable. So far the functionally foam is not produced in industrial methods. Previous research on functionally foam is a model in the software. The idea of discrete functionally foam production method is used in this article for the first time. In these tests the gradient mode density in the sample test used Polyurethane foams with different mechanical properties and density were produced and made functional foam inside the profiles are located. In this research the functional foams derived for the axial gradient, radial gradient, and bi-directional were studied. Compressive static loading experiments can be used to design an optimal mechanical property of absorber. The results of this research reveal that specific energy absorbed of axial functional profiles is very favorable.

Key words: Impact absorber, Polyurethane, Gradient foam, Energy absorption, functionally foam

مقدمه

اعمال بار، مقدار زیادی از انرژی اعمال شده به سازه بر اثر بارگذاری را جذب کرده و آن را صرف ایجاد فشردگی و تغییر شکل کنترل شده می‌نمایند. در واقع عملکرد این‌گونه تجهیزات موجب می‌شود که انرژی دریافتی سایر اجزای سازه

به‌طور کلی از جاذب‌های انرژی به‌منظور کنترل پاسخ سازه در برابر انواع بارگذاری‌ها استفاده می‌شود. مکانیزم عملکردی جاذب‌های ضربه به این صورت است که در هنگام

کاهش یابد. در نتیجه با اجتناب از تغییر شکل‌های بزرگ و منجر به واماندگی¹، قسمت‌های حساس سازه در برابر آسیب محافظت می‌شود.

یکی دیگر از کاربردهای جاذب‌های انرژی در طراحی سازه هواپیما می‌باشد. مهندسين در طراحی ستون‌های عمودی هواپیما 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 [1-3]. مطالعاتی به صورت تجربی و عددی بر روی تغییر شکل لوله‌های جدار نازک با هندسه‌های دایره‌ای تحت بار ضربه‌ای عرضی انجام شده است. مطالعات به منظور بررسی اثر تغییر شکل هندسی برای لوله‌های آلومینیومی بر میزان جذب انرژی و بررسی اثر وجود فوم درون آن جهت جذب انرژی بیشتر ناشی از بارگذاری ضربه‌ای عرضی انجام شده است [4]. با توجه به کاربردهای وسیع جاذب‌های انرژی در صنایع مختلف مانند خودرو، این اجزا را دارای اهمیت بسزایی کرده است مطالعاتی به صورت تحلیلی و تجربی بر روی مقاطع جدار نازک با سطح مقطع‌های مختلف تحت بار دینامیکی و استاتیکی انجام گرفته است و به مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج تجربی به منظور به کارگیری قابلیت‌های تحلیلی در پیشبینی رفتار لوله‌های مختلف پرداخته شده است [5]. مطالعاتی نیز برای بررسی اثر برهم کنش بین جداره‌های خارجی و داخلی پروفیل و هسته سانویچی بررسی گردید [6]. در فرایند مچالگی هدف، جذب انرژی بالا با کمترین جرم مد نظر است. برای رسیدن به وزن کم، مواد شبکه‌ای مانند فوم به طور گسترده به عنوان جاذب مورد استفاده قرار گرفته است که توانایی مچالگی بالایی دارند. در نتیجه سازه‌های سبک با پوسته نازک که داخل آن با فوم پر شده در حال حاضر به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات نشان داد ماده فوم توانایی جذب انرژی بالایی دارد که دلیل آن تغییر شکل بسیار زیاد فوم با یک نیروی مساوی می‌باشد. رید و همکاران [7-9] تحقیقات گسترده آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار ستون‌های مقطع مربعی که داخل آن با فوم پر شده انجام دادند. سانتوسا² و ویرزیبکی [10] اثر استفاده از لانه زنبوری آلومینیومی را در مچالگی پروفیل مقطع مربعی بررسی نمودند و نشان دادند که پر نمودن پروفیل با لانه زنبوری آلومینیومی تأثیر بیشتری نسبت به افزایش ضخامت پوسته دارد.

اگرچه پر نمودن پروفیل پوسته نازک با فوم می‌تواند جذب انرژی برخورد را افزایش دهد، اما جذب انرژی به طور شدید به چگالی فوم بستگی دارد. سیتزبرگر³ و همکاران [11] به بررسی پروفیل پر شده با فوم چگالی بالا را مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق دیگری ریز⁴ و همکاران [12] با مطالعه رفتار فوم آلومینیومی دانسیته بالا به این نتیجه رسیدند که استفاده از این فوم‌ها با پروفیل، جذب انرژی را افزایش می‌دهند ولی جذب انرژی مخصوص می‌تواند کمتر از حالتی باشد که پروفیل بدون فوم به کار رفته است. در تحقیق دیگری استفاده از فوم با دانسیته بالا که در داخل پروفیل مقطع مربعی

جانمایی شده بود بررسی شد و محققان به این نتیجه رسیدند که فوم دانسیته بالا ممکن است باعث کاهش انرژی مخصوص جذب گردد. با توجه به نتایج فوق، هندسه پروفیل و چگالی فوم مناسب پارامترهای بحرانی در مچالگی می‌باشند. هو⁵ و همکاران [13] بهینه‌سازی تک هدفه⁶ و چند هدفه⁷ بر روی پدیده برخورد و مچالگی را برای پروفیل‌های مقطع مربعی مورد بررسی قرار دادند. زارعی و کروگر⁸ [14 و 15] از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه برای ماکزیمم شدن جذب انرژی و مینیمم کردن وزن پروفیل پر شده با فوم آلومینیومی استفاده کردند. نریمانزاده و همکاران [16] از روش الگوریتم ژنتیک در جهت ماکزیمم کردن انرژی جذب شده و مینیمم کردن وزن برای پروفیل آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی بهره بردند.

برای فوم‌های به کار رفته در تحقیقات فوق فرض بر ایزوتروپیک و هموزن بودن فوم می‌باشد. اخیراً گوپتا⁹ فوم تابعی (FGF)¹⁰ را به کار برد و به طور آزمایشگاهی نشان داد که مواد FGF جذب انرژی را افزایش می‌دهد [17-18]. گای¹¹ و ریگی [19] با بررسی مواد FGF به این نتیجه رسیدند که این فوم‌ها کاندید خوبی نسبت به فوم‌های یکنواخت¹² برای جذب انرژی بالاتر می‌باشند. کیرنان¹³ و همکاران [20] انتشار موج تنش برخورد را بر روی ماده FGF با گرادیان‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که اندازه موج تنش و میزان انرژی پلاستیک را با استفاده از گرادیان چگالی فوم می‌توان کنترل کرد. در نتیجه تحقیقات فوق، محققان یقین یافتند که استفاده از مواد FGF می‌تواند توانایی جذب انرژی مچالگی را افزایش دهد.

اگر چه استفاده از مواد FGF می‌تواند شرایط بهتری نسبت به فوم‌های یکنواخت تامین کند ولی باید توجه نمود تکنولوژی‌های آزمایشگاهی پیشرفته توانایی تولید این مواد را دارند [21-23]. در مسئله مچالگی در اثر برخورد، نکته قابل توجه این است که بهترین گرادیان را بیابیم. گان گیانگ¹⁴ و همکاران [24] پروفیل مقطع مربعی را با فوم‌های FGF بررسی نمودند. آنها برای مدلسازی گرادیان فوم از تقریب توانی استفاده نمودند و اثر گرادیان بررسی شد.

هانفگ¹⁵ و همکاران [25] در جهت ارتقای شرایط برخورد پروفیل جدار نازک، دو نوع از فوم‌های گرادیان جانبی¹⁶ را مدلسازی و بررسی کردند. نتیجه تحلیل نشان داد استفاده از این نوع فوم باعث افزایش جذب انرژی نسبت به حالتی که با فوم یکنواخت پر شده باشد را داراست. علاوه بر این به اثر توزیع گرادیان نیز پرداخته شده و در ادامه مسئله با هدف پیشینه سازی انرژی جذبی و کمینه کردن نیروی مچالگی پرداخته شده است.

آتیا¹⁷ و همکاران [26] به بررسی رفتار پروفیل جدار نازک که با فوم فلزی پر شده است پرداخته‌اند. وی در این تحقیق اثر گرادیان دانسیته فوم، تعداد لایه‌های فوم و ضخامت هر لایه را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان دادند جذب انرژی 12 درصد بهتر از حالتی است که فوم با چگالی یکنواخت در داخل پروفیل جدار نازک پر شده است.

- **بازده لهیدگی:** این رابطه ساده‌شده رابطه بازده حجمی است و نشان‌دهنده درصد لهیدگی قطعه، جهت حصول اطمینان از عدم آسیب‌های نامتعارف است.

$$S_e = \delta/L \quad (2)$$

- در این رابطه δ طول لهیدگی و L طول لوله می‌باشد.
- **متوسط نیروی واماندگی:** نیروی واماندگی یکی از معیارهای ضربه‌گیرها می‌باشد و برای بررسی عکس‌العمل ایجاد شده در برابر نیروی وارد شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$F_{ave} = E/\delta \quad (3)$$

- که F_{ave} نیروی متوسط²⁰ می‌باشد.
- **بیشینه نیرو (حد واماندگی)²¹:** این نیرو مربوط به آغاز تغییر شکل الاستیک می‌باشد و به سرعت کاهش می‌یابد. در طراحی جاذب‌ها نیروی بیشینه فروریزش بسیار حائز اهمیت است.
- **حساسیت به جهت نیرو:** نیرو همواره در یک جهت اعمال نمی‌شود؛ بنابراین ضربه‌گیر خوب می‌بایست توانایی مقابله با انواع برخوردها، در جهات متفاوت را دارا باشد.

نمونه استوانه‌ای

بر اساس مرور بر ادبیات موضوع پژوهش و نمونه‌های ملاحظه شده در آزمایشات تجربی، در این تحقیق نمونه استوانه‌ای از جنس آلومینیوم در نظر گرفته شد. این رده از آلومینیوم به دلیل وزن سبک، قیمت نسبتاً کم و نیز فراوانی عرضه در بازار، به عنوان یک نمونه مطمئن و قابل اجرا در سازه‌های جاذب ضربه می‌تواند در نظر گرفته شود.

شکل 1 شماتیک ابعاد لوله آلومینیومی تهیه‌شده برای این آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، طول لوله برای پرهیز از بروز کماتش در حین آزمون و نیز قابلیت فشردگی در حد مورد نیاز، 10 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. قطر این لوله‌ها 47 میلی‌متر بوده و ضخامت لوله 3 میلی‌متر می‌باشد. با توجه به اینکه نحوه ساخت این لوله‌ها به صورت اکستروژن²² است، کاملاً صاف و صیقلی و فاقد هرگونه درز هستند که تأثیر نواقص سطحی را در آزمایش از بین می‌برد.

پروفیل تابعی محوری استوانه

از آنجا که تولید فوم تابعی محوری به صورت یکپارچه و با تغییر پیوسته و یکنواخت خواص مکانیکی امری بسیار دشوار پرهزینه است، می‌توان پروفیلی با تغییر خواص ناپیوسته و پله‌ای ساخت که مشخصات آن با تقریب خوبی

محمدیها و بهشتی¹⁸ [27] بر روی استفاده از فوم‌های فلزی داخل پروفیل‌های مخروطی با در نظر گرفتن اثرات گرادیان دانسیته فوم و ضخامت لایه‌های فوم بر میزان توانایی جذب انرژی جنبشی و بیشینه مقدار نیروی وارد در هنگام مچالگی تحقیق کردند. در این تحقیق مسئله با هدف یافتن ضخامت و پارامتر گرادیانی دانسیته برای دو حالت دانسیته افزایشی و کاهش‌ی تعریف شده است.

در کار دیگری خواص جذب انرژی مچالگی پروفیل جدار نازک مخروطی که با فوم FGF پر شده بررسی شد [28]. در ادامه یک مسئله تعریف شده است تا علاوه بر دستیابی به مقدار بیشینه جذب انرژی مخصوص، مقدار بیشینه نیروی مچالگی را کمینه نمایند.

در این مقاله از ایده تولید فوم تابعی به روش گسسته استفاده می‌شود. در این آزمایشات حالت گرادیان چگالی در نمونه‌ها مورد آزمون قرار می‌گیرد. فوم‌های تابعی تولیدشده به صورت گرادیان محوری، گرادیان شعاعی و گرادیانی دو جهته مورد بررسی قرار گرفتند. استوانه پر شده با فوم تابعی دو جهته بیشترین میزان مطلق جذب انرژی را دارد و پس از آن به ترتیب فوم توپر ساده، فوم تابعی محوری و فوم تابعی شعاعی هستند. با اعمال اثر جرم نمونه در میزان جذب انرژی و محاسبه مقدار انرژی ویژه (نسبی)، بدیهی است که استوانه خالی به دلیل سبکی وزن بالاتر از بقیه قرار می‌گیرد. اما در میان استوانه‌های توپر مجدداً مقدار SEA برای فوم تابعی دو جهته از بقیه بیشتر بوده و پس از آن مانند حالت قبل به ترتیب فوم ساده، فوم تابعی محوری و فوم تابعی شعاعی قرار دارند.

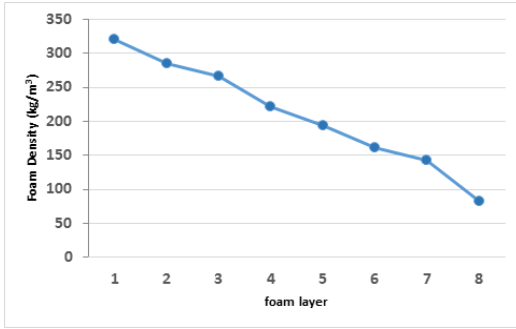
مفاهیم نظری جذب ضربه

پیش از ورود به موضوع جاذب‌های ضربه لازم است برخی اصطلاحات رایج و پرکاربرد معرفی شوند.

- **انرژی جذب‌شده مخصوص (SEA)¹⁹:** برای بیان بازده ضربه‌گیرها، بخصوص در شرایطی که جرم جاذب ضربه یا نمونه‌ها متغیر است از انرژی جذب شده در واحد جرم استفاده می‌شود.

$$S_e = E/M \quad (1)$$

که در این رابطه S_e انرژی مخصوص (جذب انرژی ویژه)، E انرژی جذب شده و M جرم جاذب ضربه است. مقدار جذب انرژی ویژه اهمیت بالایی دارد زیرا بیانگر این مسئله است که قابلیت جذب انرژی جاذب با توجه به جرم مواد به کار رفته چه مقدار می‌باشد. اگر بیان جذب انرژی را بدون در نظر گرفتن جرم مواد به کار رفته بیان شود تعریف درستی از قابلیت جذب انرژی جاذب به دست نمی‌آید زیرا در یک مدل مشابه، اصولاً مدلی که وزن بیشتری از مواد را به کار برده انرژی بیشتری جذب می‌کند.

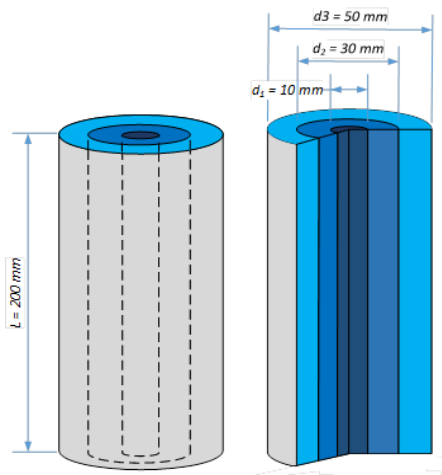


شکل 3 - نمودار چگالی لایه‌های قرارگرفته در پروفیل تابعی محوری

از سوی دیگر تولید چنین نمونه‌ای نسبت به حالت محوری دشوارتر است، چرا که عملیات ساخت آن مستلزم ماشین‌کاری روی فوم و تراشیدن آن به قطرهای مورد نیاز است. لذا به دلیل محدودیت‌های فنی، ساخت پروفیل شعاعی با بیش از ۳ لایه عملاً ممکن نیست. شکل 4 شماتیک پروفیل تابعی شعاعی را نشان می‌دهد که چگالی لایه‌های آن از مرکز به پوسته و از زیاد به کم به ترتیب عبارت‌اند از ۲۸۰، ۲۲۰ و ۱۶۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب. واضح است که در این حالت نیز نرخ تغییر چگالی به شکل تقریباً خطی می‌باشد. نمونه واقعی ساخته‌شده فوم تابعی شعاعی نیز در شکل 5 مشاهده می‌گردد.

پروفیل تابعی دوجته

ساخت پروفیل تابعی دوجته یکی از دشوارترین و زمان‌برترین مراحل آماده‌سازی نمونه‌های مورد استفاده در آزمایشات این مقاله است. پروفیل دوجته که ترکیبی از دو نوع پروفیل تابعی قبلی است، دارای خواص متغیر در هر دو راستای محوری و شعاعی است.



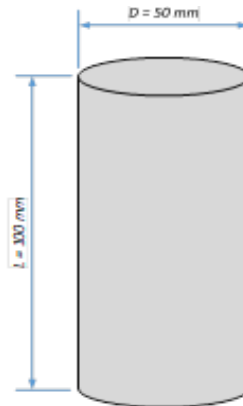
شکل 4 - شماتیک پروفیل تابعی شعاعی برای نمونه استوانه‌ای

مشابه مشخصات نمونه پیوسته باشد. برای این منظور مطابق شکل پروفیل استوانه‌ای تابعی محوری با ۸ لایه فوم که چگالی آنها به تدریج افزایش می‌یابد ساخته شد و در داخل لوله آلومینیومی قرار گرفت.

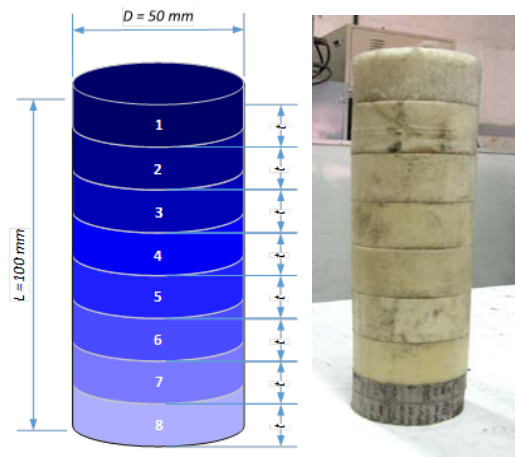
در شکل 2، ضخامت هریک از لایه‌ها و برابر t 1/25 سانتی‌متر است. چگالی لایه‌های ۱ تا ۸ به ترتیب از زیاد به کم عبارت است از ۳۲۰، ۲۸۵، ۲۶۶، ۲۲۲، ۱۹۴، ۱۶۱، ۱۴۳ و ۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب. بر این اساس و همان‌طور که در شکل 3 نیز ملاحظه می‌شود، تابع خواص مکانیکی (چگالی) لایه‌های قرارگرفته در نمونه موردنظر تقریباً یک تابع خطی است.

پروفیل تابعی شعاعی

به دلیل مشابه حالت قبل، تهیه فومی با خواص متغیر پیوسته به صورت تابعی شعاعی نیز کاری تقریباً غیرممکن است. به همین دلیل در این حالت هم پروفیل تابعی به صورت ناپیوسته تهیه شده است.



شکل 1- شماتیک و مشخصات ابعادی پروفیل استوانه‌ای

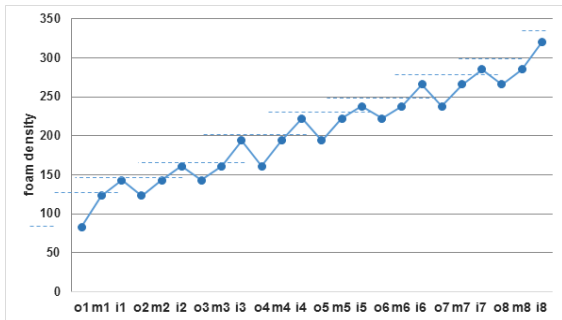


شکل 2- شماتیک پروفیل تابعی محوری برای نمونه استوانه‌ای

(o)	(m)		
۱۴۳	۱۲۳	۸۳	۱
۱۶۱	۱۴۳	۱۲۳	۲
۱۹۴	۱۶۱	۱۴۳	۳
۲۲۲	۱۹۴	۱۶۱	۴
۲۳۸	۲۲۲	۱۹۴	۵
۲۶۶	۲۳۸	۲۲۲	۶
۲۸۵	۲۶۶	۲۳۸	۷
۳۲۰	۲۸۵	۲۶۶	۸



شکل 5 - لایه‌های فوم تابعی شعاعی به صورت تلسکوپی



شکل 7 - نمودار چگالی لایه‌های قرار گرفته در پروفیل تابعی دوجته

آزمایش‌ها

برای آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی، دستگاه بارگذاری تک‌محوره کشش- فشار ۱۵ تن مورد استفاده قرار گرفته است. نحوه انجام آزمایش‌های فشار به این صورت است که با در نظر گرفتن نرخ بارگذاری مشخص، هرکدام از نمونه‌ها تحت بار محوری فشاری قرار می‌گیرند که این روند مطابق شکل 8 تا رسیدن به حد نهایی فشردگی²³ ادامه پیدا می‌کند.

نرخ بارگذاری نمونه‌ها چه برای نمونه‌های استوانه‌ای و چه برای نمونه‌های مخروطی برابر ۵ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شده است تا حدالمقدور شرایط بارگذاری موازی استاتیک رعایت شده باشد. با چنین سرعتی، انجام هر یک از آزمایش‌های فشار حدوداً بین ۱۰ الی ۱۵ دقیقه زمان برده است.

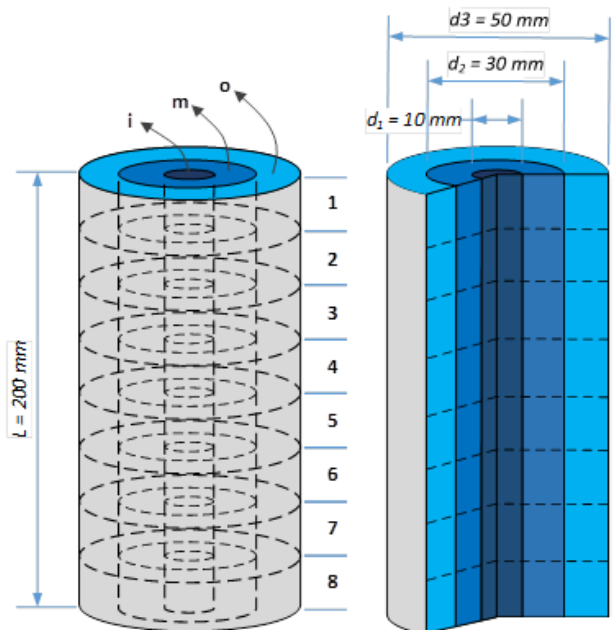
نرم‌افزار متصل به رایانه دستگاه در هر مرحله از آزمایش خروجی نیرو-زمان را تحویل می‌دهد. این خروجی‌ها از طریق حافظه‌های جانبی (USB) قابل دریافت بوده و در مراحل بعد برای انجام محاسبات و تهیه نمودارهای مربوطه مورد استفاده قرار گرفته است.

آزمون بارگذاری استاتیکی

با توجه به انواع مختلف نمونه‌های استوانه‌ای تولید شده که در فصل قبل توضیح داده شد، در مرحله اول برای بارگذاری استاتیکی ۵ آزمایش موفق در اینجا ارائه می‌شود (تعداد آزمایش‌های انجام شده در حقیقت بیش از این مقدار بوده است که به دلایل مختلفی مردود شده‌اند).

بدیهی است ساخت فومی که تراکم و چگالی آن به طور یکنواخت در دو جهت متغیر باشد در عمل امکان‌پذیر نیست. در نتیجه می‌بایست مانند حالات قبل از تغییرات ناپیوسته اما متناسب خواص استفاده شود. بر این اساس برای تولید این نمونه ۸ لایه متمایز تهیه شد که در هر لایه ۱ نمونه دایروی در مرکز و ۲ نمونه حلقوی پیرامون آن قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر پروفیل تابعی دوجته مطابق شکل 6 متشکل از ۲۴ قطعه مجزا است که در داخل لوله آلومینیومی مورد نظر به دقت جاسازی شده‌اند.

مشخصات و چگالی فوم‌های قرار گرفته در هرکدام از لایه‌های این نمونه در جدول 1 قابل ملاحظه است. بر این اساس شکل 7 نمودار تغییرات چگالی اجزای فومی قرار گرفته در داخل این نمونه را نشان می‌دهد که شکلی به اصطلاح «اره‌ای» دارد.



شکل 6 - شماتیک پروفیل تابعی دوجته برای نمونه استوانه‌ای

جدول 1 - چگالی (kg/m³) لایه‌های نمونه تابعی دوجته

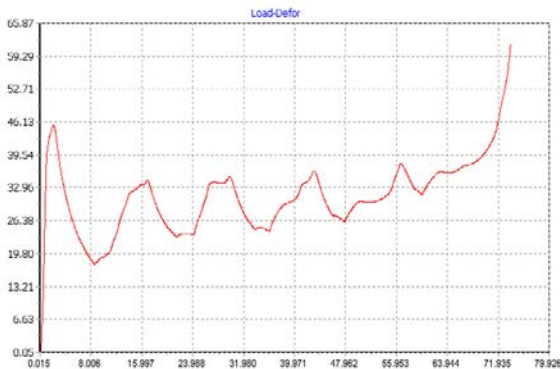
ردیف	داخل (i)	وسط	بیرون
------	----------	-----	-------

استوانه خالی



وقتی استوانه خالی در زیر دستگاه آزمون فشار قرار می‌گیرد، بدون آن که مقاومت چندانی آن را از فشردگی حفظ کند، به صورت منظمی دچار چین‌خوردگی شده و این روند تا ۵ چین ادامه پیدا می‌کند. بعد از آن به حد فشردگی نهایی رسیده و نمودار به صورت اکیداً صعودی در می‌آید. ۵ چین اعمال شده روی نمونه در عکس و نمودار شکل 9 به خوبی مشخص است. قله (پیک) اول در این نمودار نیرویی برابر 42/3 کیلونیوتن است.

شکل 9 - نمونه استوانه‌ای خالی بعد از آزمایش فشار و نمودار L-D آن



استوانه پر شده با فوم ساده

وقتی لوله آلومینیومی با فوم پلی‌یورتانی ساده پر می‌شود، روند فروریزش لوله زیر بار فشاری تحت کنترل قرار می‌گیرد. به دلیل مقاومت فوم در برابر نفوذ چین‌های لوله به داخل، این چین‌ها با عمق کمتری شکل گرفته و در عوض تعداد چین‌ها افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه همان‌طور که در عکس و نمودار شکل 10 مشاهده می‌شود، تعداد چین‌های نمونه مورد نظر ۶ تا است. با دقت در نمودار مشخص می‌شود که قله اول در نیرویی برابر 45/4 کیلونیوتن اتفاق افتاده است که نسبت به نمونه خالی از فوم در حالت قبل، افزایشی 7/3 درصدی نشان می‌دهد. نکته دیگری که از نمودار می‌توان دریافت این است که برخلاف حالت قبل، قله‌های ناشی از چین‌های متوالی با یک روند صعودی نسبی مواجه هستند که به علت تأثیر حضور فوم در نمونه است.

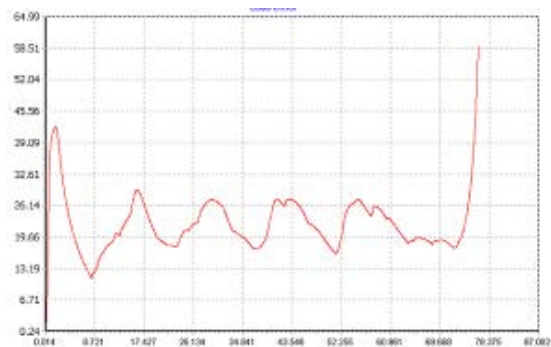
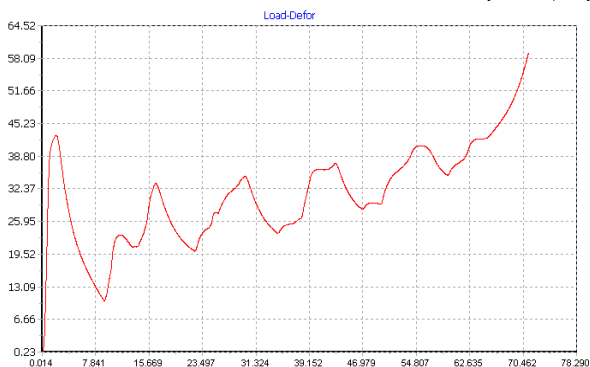
شکل 10 - نمونه استوانه‌ای پر شده با فوم ساده بعد از آزمایش فشار و نمودار L-D آن

استوانه پر شده با فوم تابعی محوری

در این نمونه نیز مانند حالت قبل ۶ چین اتفاق می‌افتد که تأثیر وجود فوم را نشان می‌دهد. روند صعودی قله‌های متوالی در نمودار فوم تابعی محوری از حالت قبل مشهودتر است. قله اول در نیروی 42/9 کیلونیوتن اتفاق می‌افتد که از حالت پایه (فوم خالی) فقط 1/5 درصد بیشتر است.²⁴



شکل 8 - نمونه استوانه‌ای تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیکی





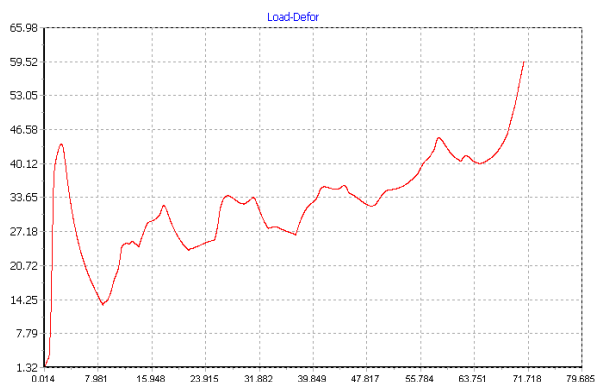
شکل 12 - نمونه استوانه‌ای پر شده با فوم تابعی شعاعی بعد از آزمایش فشار و نمودار L-D آن



شکل 11 - نمونه استوانه‌ای پر شده با فوم تابعی محوری بعد از آزمایش فشار و نمودار L-D آن

استوانه پر شده با فوم تابعی شعاعی

همان‌طور که در عکس و نمودار شکل 12 دیده می‌شود، در پروفیل تابعی شعاعی 5 چین ایجاد شده است. این چین‌خوردگی‌ها بر خلاف حالت محوری روند صعودی ندارد و حتی به منظمی فوم ساده هم نیست. همچنین قله اول در نمودار این نمونه نیرویی برابر 44/7 کیلونیوتن را نشان می‌دهد. با در نظر داشتن نکات اشاره شده خواص جذب ضربه استوانه تابعی شعاعی چندان مثبت ارزیابی نمی‌شود. دلیل این موضوع می‌تواند به لغزش‌های آسان لایه‌های فوم در حین بارگذاری محوری اشاره کرد که همراستا با جهت اعمال نیرو بوده و نمی‌تواند مقاومت زیادی در برابر نیرو از خود نشان دهد.



شکل 13 - نمونه استوانه‌ای پر شده با فوم دوجته بعد از آزمایش فشار و نمودار L-D آن

شبیه‌سازی عددی

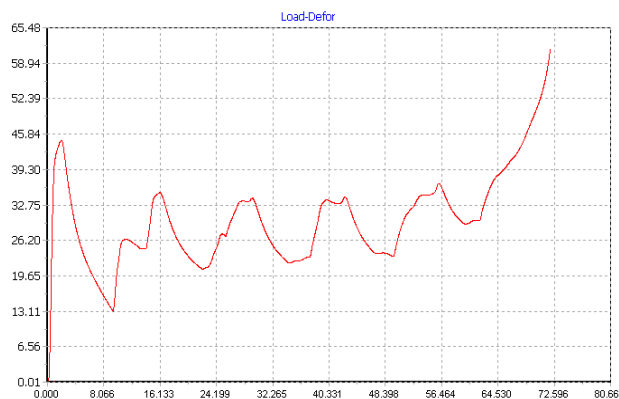
در این قسمت برای بررسی مدل ناپیوسته پروفیل فوم گرادیناتی، یک مدل المان محدود با خواص مواد به کار رفته در تست تجربی را در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل می‌کنیم. بدین منظور پروفیل آلومینیومی با طول 110 میلی‌متر، قطر داخلی 38 میلی‌متر و قطر خارجی 40 میلی‌متر برای حالت پر شده با فوم FGF در نظر گرفته شد. تعداد 10 لایه‌های فوم را در داخل استوانه قرار می‌دهیم. دانسیته فوم‌ها از 80 کیلوگرم بر متر مکعب تا 400 کیلوگرم بر متر مکعب متغیر می‌باشد. در مرحله بعدی همین مدل را در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی می‌کنیم.

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 0/1 تعریف شده است. تماس سطوح با خودشان در هنگام مچالگی با self-contact، تماس فوم با پوسته داخلی، خارجی و دیواره صلب general-contact می‌باشد. فوم به 10 لایه در راستای محوری تقسیم شده است. بر پایه‌ی دانسیته فوم در هر قسمت، خواص مکانیکی فوم تعریف می‌گردد.

نمودار نیرو بر حسب طول مچالگی پروفیل پر شده با فوم تابعی که آن در شکل 14 ترسیم شده است مدل‌سازی و آنالیز گردید. شکل 14 نشان می‌دهد که نتایج حل عددی و تست تجربی تطابق خوبی با یکدیگر دارند. نتیجه مهم اینکه طریقه تولید فوم تابعی قابل قبول بوده است. علیرغم اینکه فوم‌های

استوانه پر شده با فوم تابعی دوجته

به طوری که در عکس شکل 13 از پروفیل تابعی دوجته مشخص است، این نمونه 5 چین کامل و 1 چین ناقص را تجربه کرده است. نمودار مربوط به این نمونه هم روندی کاملاً صعودی اما بی‌نظم را نشان می‌دهد که علت آن را می‌توان در ناپیوستگی‌های متعدد میان لایه‌های فوم تابعی دوجته جست و جو کرد. قله اول این نمودار در نیرویی برابر 43/8 کیلونیوتن حادث شده که رقم نسبتاً قابل قبولی در مقایسه با قله نمونه پایه است.



سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد. برای اثبات این موضوع از نمودارهای نیرو بر حسب جابجایی در بازه‌های یکسان انتگرال‌گیری شده است. بازه انتگرال‌گیری از لحظه شروع بارگذاری تا رسیدن به فشردگی ۶۰ میلی‌متر می‌باشد که در شکل 15 با نقطه‌چین مشخص شده است.

اما بزرگی مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها اگرچه معیاری برای ارزیابی میزان کیفیت جذب ضربه آنهاست، به تنهایی و بدون اینکه جرم نمونه‌ها در محاسبه لحاظ شود ارزشی نخواهد داشت. به همین منظور با تقسیم عدد میزان انرژی جذب شده بر جرم هر یک از نمونه‌ها، مقدار انرژی جذب‌شده ویژه²⁵ نیز محاسبه می‌شود. نتایج این دو انتگرال‌گیری به شرح جدول 2 است.

همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود، استوانه پر شده با فوم تابعی دووجهه بیشترین میزان مطلق جذب انرژی را دارد و پس از آن به ترتیب فوم توپر ساده، فوم تابعی محوری و فوم تابعی شعاعی هستند. با اعمال اثر جرم نمونه در میزان جذب انرژی و محاسبه مقدار انرژی ویژه (نسبی)، بدیهی است که استوانه خالی به دلیل سبکی وزن بالاتر از بقیه قرار می‌گیرد. اما در میان استوانه‌های توپر مجدداً مقدار SEA برای فوم تابعی دووجهه از بقیه بیشتر بوده و پس از آن مانند حالت قبل به ترتیب فوم ساده، فوم تابعی محوری و فوم تابعی شعاعی قرار دارند. نکته قابل توجه آنکه نمونه تابعی شعاعی ضربه‌پذیری ضعیف‌تری نسبت به فوم ساده دارد که دلیل آن قبلاً بیان شد و می‌تواند نامطلوب بودن این پروفیل تابعی را در کاربرد جذب ضربه نشان دهد.

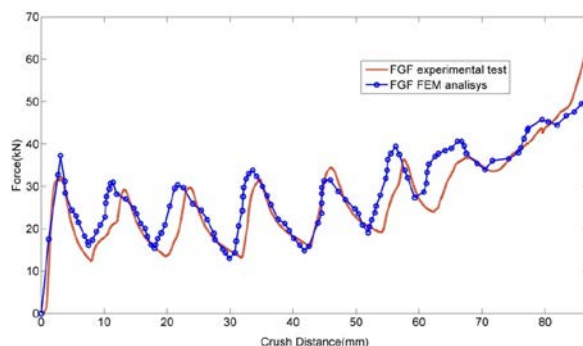
جدول 2 - مقدار انرژی جذب‌شده و انرژی ویژه برای نمونه‌های

استوانه‌ای		نمونه	
مقدار انرژی ویژه (SEA) (kJ/g)	جرم نمونه (g)	مقدار انرژی جذب‌شده (J)	
22/5	۶۰	۱۳۵۲	استوانه‌ای خالی
19/85	۸۸	۱۷۴۶	استوانه‌ای توپر ساده
18/90	۹۱	۱۷۲۰	استوانه‌ای تابعی محوری
18/49	۹۰	۱۶۶۴	استوانه‌ای تابعی شعاعی
20/30	۸۹	۱۸۰۷	استوانه‌ای تابعی دووجهه

پی‌نوشت‌ها

1. Failure
2. Santosa
3. Seitzberger
4. Reyes

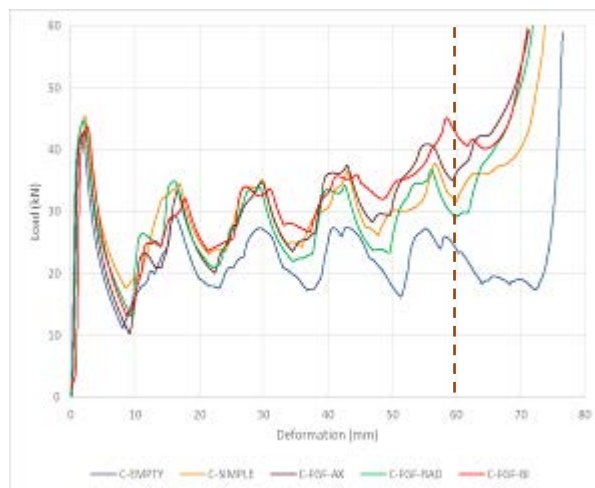
پلی یورتان به صورت دیسکی بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و به صورت یک فوم گرادیانی یکپارچه تولید نشده‌اند، نتایج تحلیل عددی و تست تجربی تطابق خوبی با هم دارند. بنابراین می‌توان ادعا کرد که روش تولید فوم گرادیانی ذکر شده در این تحقیق قابل قبول است.



شکل 14- مقایسه منحنی نیرو بر حسب طول مچالگی برای پروفیل با فوم FGF در تست تجربی و تحلیل عددی

نتیجه‌گیری

برای قضاوت بهتر در مورد خواص جذب انرژی نمونه‌های استوانه‌ای نمی‌توان به نمودارهای آنها به تنهایی بسنده کرد. در نمودار شکل 15 منحنی‌های L-D کلیه نمونه‌های استوانه‌ای برای مقایسه با یکدیگر به صورت تجمیع‌شده ترسیم شده است. از جمله مهم‌ترین پارامترهای جذب ضربه، میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها (E) و همچنین انرژی جذب‌شده ویژه (SEA) است که در حقیقت سطح زیر نمودار L-D است.



شکل 15 - مقایسه نمودارهای L-D برای آزمایش فشار نمونه‌های استوانه‌ای

با توجه به نمودار ترکیبی فوق، واضح است که خواص ضربه‌پذیری از جهت مساحت زیر نمودار (جذب انرژی) برای نمونه تابعی دووجهه بهترین وضعیت را داراست، و پس از آن نمونه تابعی محوری خواص مناسب‌تری را نسبت به

- [6]. Vahdat azad .N., Ebrahimi S, crashworthiness and energy absorption analysis on tapered tube filled by sandwich core, *journal of aeronautical engineering*, 2015.
- [7]. Ahmad Z., Thambiratnam D.P., Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading, *Computers & Structures* , Vol.87 (3–4) , pp.186–197, 2009.
- [8]. Reid S.R., Reddy T.Y., Axial crushing of foam-filled tapered sheet metal tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 28 (10), pp.643–656, 1986.
- [9]. Reid S.R., Reddy T.Y., Gray M.D., Static and dynamic axial crushing of foam-filled sheet metal tubes, *International Journal of Mechanical Sciences* , Vol.28 (5) , pp.295–322, 1986.
- [10]. Santosa S., Wierzbicki T., Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam , *Computers & Structures*, Vol.68 (4), pp.343–367, 1998.
- [11]. Seitzberger M., Rammerstorfer F.G., Degischer H.P., Gradinger R., Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam, *Acta Mechanica*, Vol.125 (1–4) , pp.93–105, 1997.
- [12]. Reyes A., Hopperstad O.S., Hanssen A.G., Langseth M., Modeling of material failure in foam-based components, *International Journal of Impact Engineering* , Vol.30 (7) , pp.805–834, 2004.
- [13]. Hou S.J., Li Q., Long S.Y., Yang X.J., Li W., Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures, *Materials & Design*, Vol.30 (6), pp.2024–2032, 2009.
- [14]. Zarei H.R., Kroger M., Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application, *Thin-Walled Structures*, Vol.46 (2), pp.214–221, 2008.
- [15]. Zarei H.R., Kroger M., Crashworthiness optimization of empty and filled aluminum crash boxes, *International Journal of Crashworthiness*, Vol.12 (3), pp.255–264, 2007.
5. Hou
6. Single objective
7. Multi objective
8. Kroger
9. N .Gupta
10. functionally graded foam
11. Cui
12. uniform foam
13. Kiernan
14. Guangyong
15. Hanfeng
16. functionaly lateral graded foam (FLGFT)
17. Attia
18. Mohammadiha and Beheshti
19. Specific Energy Absorbition
20. Average Force
21. Peak Force (Failure Limit)
22. Extrude
23. آستانه‌ای که ماده از آن بیشتر فشرده نمی‌شود و منحنی بارگذاری به شکل اکیداً صعودی درمی‌آید.
24. به طور کلی هرچه نیروی اعمال‌شده در قله اول کمتر باشد به معنای عملکرد مناسب‌تر جاذب در دریافت شوک ضربه است.
25. Specific Energy Absorption

منابع و مراجع

- [1]. Ren Y., Xiang J., A comparative study of the crashworthiness of civil aircraft with different strut configurations, *Int J Crashworthiness*, Vol.15, pp 17-26, 2010.
- [2]. Zou T., Mou H., Feng Z., Research on Effects of Oblique Struts on Crashworthiness of Composite Fuselage Sections, *Journal of Aircraft*, Vol 49, pp 111-118, 2012.
- [3]. Paz J., D'iaz J., Romera L., Costas M., Size and shape optimization of aluminum tubes with GFRP honeycomb reinforcements for crashworthy aircraft structures, *Composite Structures*, Vol.15, pp 53-60, 2015.
- [4]. M. Chobini, Gh.H. Liaghat, Experimental and Numerical investigation of energy absorption and deformation of thin-walled tube with various geometry cross-section under lateral Impact loading, *Tarbiat Modares University*, 2013.
- [5]. A. Meshkin zar, M. Darvizeh, A. Darvizeh, Analytical and experimental study of thin-walled sections for energy absorption under static and dynamic loading, *Gilan University*, 2012.

- [23]. Kieback B., Neubrand A., Riedel H., Processing techniques for functionally graded materials, *Materials Science and Engineering*, Vol.362 (1-2), pp.81-105, 2003.
- [24]. Guangyong S., Li G., Shujuan H., Shiwei Z., Wei L., Qing L., Crashworthiness design for functionally graded foam-filled thin-walled structures, *Materials Science and Engineering A*, Vol.527, pp1911-1919, 2010.
- [25]. Hanfeng Y, Guilin W., Shujuan H., Qixiang Q., Multiobjective crashworthiness optimization of functionally lateral graded foam-filled tubes, *Materials and Design*, Vol.44, pp.414-428, 2013.
- [26]. Attia M.S., Meguid S.A., Nouraei H., Nonlinear finite element analysis of the crush behaviour of functionally graded foam-filled columns, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 61, pp.50-59, 2012.
- [27]. Mohammadiha O. and Beheshti H., Optimization of functionally graded foam-filled conical tubes under axial impact loading, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 67, pp.34-48, 2003.
- [28]. [79] Hanfeng Y., Guilin W., Hongbing F., Qixiang Q., Xiangzheng K., Jiuru X., Zhibo L., Multiobjective crashworthiness optimization design of functionally graded foam-filled tapered tube based on dynamic ensemble metamodel, *Materials and Design*, Vol.55, pp.747-757, 2014.
- [16]. Narimanzadeh N., Darvizeh A., Jamali A., Pareto optimization of energy absorption of square aluminium columns using multiobjective genetic algorithms, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol.220 (2), pp.213-224, 2006.
- [17]. Cui L., Kiernan S., Gilchrist M.D., Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials, *Materials Science and Engineering*, Vol.507 (1-2), pp.215-225, 2009.
- [18]. Gupta N., A functionally graded syntactic foam material for high energy absorption under compression, *Materials Letters*, Vol.61, pp.979-982, 2007.
- [19]. Gupta N., Ricci W., Comparison of compressive properties of layered syntactic foams having gradient in microballoon volume fraction and wall thickness, *Materials Science and Engineering A*, Vol.427, pp.331-342, 2006.
- [20]. Kiernan S., Cui L., Gilchrist M.D., Propagation of a stress wave through a virtual functionally graded foam, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol.44 (5), pp.456-468, 2009.
- [21]. Brothers A.H., Dunand D.C., Mechanical properties of a density-graded replicated aluminum foam, *Materials Science and Engineering*, Vol.489 (1-2), pp.439-443, 2008.
- [22]. Matsumoto Y., Brothers A.H., Stock S.R., Dunand D.C., Uniform and graded chemical milling of aluminum foams, *Materials Science and Engineering*, Vol.447(1-2), pp. 150-157, 2007.