اثر ساختار سلولی فوم آلومینیم کامپوزیتی A356-10vol.%SiC بر رفتار شبه استاتیکی کمانش پلاستیک پیشرونده قوطی‌های برنجی پرشده با آن

سید محمد حسین میرباقری*، میلاد دانشمند، سید یوسف طباطبایی

دانشکده مهندسی معدن و مواد دانشگاه امیرکبیر تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۲۹- دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۰/۲۱)

چکیده – **هدف از پژوهش حاضر بررسی رفتاریک سازه جاذب انرژی ضربه بر مبنای استفاده از ماده پیشرفتهِ فوم فلزی کامپوزیتی با نگرش به همگنی ساختار سلولی فوم است. لذا در این پژوهش ابتدا داخل لوله‌های برنجی Cu-Zn30wt.%، با قطر داخلی ۲۷ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر، از طریق فرایند فرم‌گریپ با فوم‌های کامپوزیت آلومینیم A356-10vol.%SiC-Xwt.%TiH_2 با سه درصد وزنی متفاوت TiH_2 به ترتیب ۱، ۱/۵ و ۲ پر شد. سپس مجموعه قوطی و فوم فلزی و هم‌چنین هرکدام به طور مجزا، به عنوان یک سازه جاذب انرژی، تحت بار فشاری و محوری قرار گرفت و رفتار چین خوردگی و کمانش پلاستیک پیشروندی آن‌ها برای چگالی‌های مختلف فوم بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد با کاهش چگالی فوم آلومینیمی A356-10vol.%SiC، به ترتیب از ۰/۹۳ به ۰/۸۸ و ۰/۴۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، میزان جذب انرژی قوطی‌های برنجی پرشده با فوم یاد شده، به ترتیب از ۱۲۹۵۵ به ۱۳۴۶۵ و سپس به ۱۱۱۹۲ ژول تغییر می‌یابد که نشان دهنده جذب انرژی بالاتر نمونه فوم حاوی ۱/۵ درصد TiH_2 با چگالی ۰/۸۸ است. هم‌چنین نتایج تحلیل تصویری مقطع طولی فوم‌ها با چگالی متفاوت نشان می‌دهد پارامتر"ضریب جوری" که در پژوهش حاضر توسعه داده شده است به خوبی می‌تواند اثر غیر همگنی ساختار سلولی فوم را در الگوی کمانش پلاستیک پیشرونده و میزان جذب انرژی لهیدگی نشان دهد.**

واژگان کلیدی : **فوم آلومینیمی، قوطی‌های جاذب انرژی، کمانش شبه استاتیکی، لوله برنجی، فوم سلول بسته.**

Effect of Cellular Structure of A356-10 vol.%SiC Composite Aluminum Foam on Progressive Quasi-Static Axial Buckling Behavior of Brass Crush-Box

S.M.H. Mirbagheri*, M. Daneshmand, Y. Tabatabaie.

Department of Material and Metallurgical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: smhmirbagheri@aut.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

Abstract: ***In this paper, the behavior of energy absorption of crush-boxes, made of Aluminum foam advanced material, was investigated based on foam cellular structure homogeneity. Therefore, thin-walled tubes of Cu-Zn30wt.%.brass alloy with 27 mm diameter and 1 mm thickness were filled with A356-10vol.%SiC-Xwt.%. of TiH_2 foam liquid. Foam samples with 1, 1.5, 2wt.%. of TiH_2 were prepared by Form Grip into the brass tubes in order to produce crush-box .Then the crush-boxes as energy absorber elements were compressed by un-axial loading and then behaviors of progressive buckling foams were measured. Results showed by decreasing A356-10vol.% SiC foam density from 0.93 to 0.88 and then 0.43 g/cm3, the energy absorption would be changed from 12955 to 13465 and then to 11192 J, respectively. The sample with 1.5wt.% of TiH_2 and density of 0.88 g/cm^3 had the maximum energy absorption. Also, the results of foams cellular structure images showed that foams of homogenous cellular structure had a sizeable effect on the progressive buckling behavior. We developed a new parameter as "sorting coefficient", which can release the foams cellular structure non-homogeneity, and change the crush-boxes energy absorption during the progressive plastic buckling.***

Keywords: ***Aluminum foam, Crush-box of energy absorption, Quasi-static buckling, Brass tube, Closed cell foam.***

۱- مقدمه

امروزه در تقسیم بندی مواد مهندسی، گروه جدیدی تحت عنوان *مواد پیشرفته*، به این تقسیم بندی اضافه شده است. از بین انواع مواد مهندسی پیشرفته ، فومهای فلزی یکی از پرکاربردترین این موادند که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته اند. در دهای اخیر مقالات زیادی در مورد کاربردهای متنوع فومهای فلزی به عنوان مواد پیشرفته ارائه شده است. از آنجا که فومهای فلزی دارای ساختار متخلل سلولیاند، همین ویژگی باعث شده است که خواص منحصر به فردی در زمینههای مختلف مهندسی پیدا کنند. این تنوع کاربرد مدیون ساختار سلولی فومهای فلزی است. از اینرو ساختار سلولی یا متخلخل فومهای فلزی به دو گروه اصلی سلول باز و سلول بسته تقسیم میشوند که توسط مهندسین متالورژی طراحی و تولید میشوند [۱]. ساختارهای سلول باز بیشتر در کاربردهای فیلتراسیون، مبدلهای گرمایی، باطریها، کاتالیزورها و از این قبیل مورد توجه مهندسین قرار گرفته است زیرا به واسطه سطح فوق العاده زیادشان در واحد وزن، میتوانند راندمان انتقال گرما و یا تبادل یونی بسیار بالایی نسبت به سایر سازههای رایج در این صنایع داشته باشند [۲]. اما ساختارهای سلول بسته که هدف اصلی این پژوهشاند، بیشتر در کاربردهایی مانند جذب صوت، جذب ضربه، جذب امواج الکترومغناطیسی وسبک سازی سازههای تحت بار استاتیکی یا دینامیکی مطرح میشوند. یکی از رفتارهای قابل توجه فومهای فلزی سلول بسته، رفتار جذب انرژی آنها طی تغییر فرم پلاستیک و به خصوص هنگام تصادف یا ضربه است. اما پژوهش در مورد ساختارهای سلول بسته، برای بررسی رفتار جذب انرژی آنها در بارگذاریهای دینامیکی و استاتیکی، بیشتر مورد توجه مهندسین مکانیک و راه ساختمان قرار گرفته است. به دلیل ساختار سلولی بسته فومهای فلزی، به ویژه فلز آلومینیم که پس از فوم شدن، چگالی آن به زیر واحد میرسد، آنقدر سبک میشود که به راحتی روی آب شناور میشود. به عبارت دیگر، سازه فومی نسبت به سازه توپر، به شدت سبک میشود. این سبکسازی در حین حفظ استحکام و سفتی نسبی باعث شده است که پارامتر استحکام به چگالی یا مدول الاستیک به چگالی یا نسبت هر خاصیت فیزیکی-مکانیکی دیگر به چگالی که در طراحی مهندسی از آن استفاده میشود به شدت بالا رود [۱]. لذا توجه به استفاده از فومهای فلزی سلول بسته در بارگذاریهای استاتیکی و دینامیکی به شدت افزایش یافته است. رفتار تغییر فرم پلاستیک قوطیهای خالی (ستونها) در بارگذاری محوری، که به کمانش پلاستیک معروف است، اگر به کمک آزمون فشار تک محور با نرخ کرنش پایین (نسبت به حالت ضربه ناگهانی که معروف به کمانش دینامیک است) انجام گیرد، بیشتر تحت عنوان کمانش شبه استاتیک بیان میشود و همواره مورد توجه پژوهشگران است [۳-۵]. در این حالت میزان جذب انرژی در طی کمانش پلاستیک و لهیدگی قوطیهای فلزی یا ستونهای تحت بار محوری، از منحنی تنش- کرنش آنها قابل استخراج

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

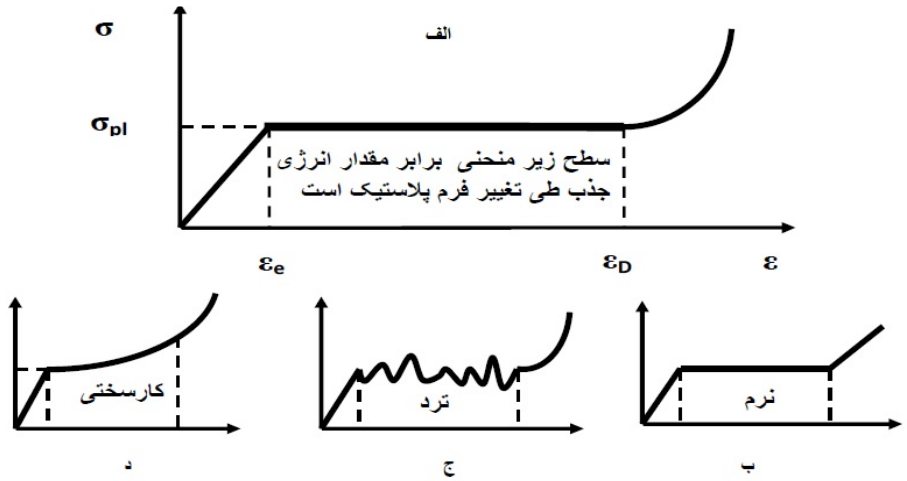
است و مقاله‌های زیادی نیز در مورد جنس قوطی، ضخامت، نسبت قطر معادل دهنه به ارتفاع قوطی، هندسه مقطع قوطی و حتی ایجاد شیارهای حلقه ای و تکرار آن‌ها در جهت ارتفاع در داخل و یا خارج جداره قوطی بر مقدار کمّی جذب انرژی، طی کمانش ارائه شده است [۶]. لذا در ادامه به طور خلاصه، پژوهش‌هایی که به تحلیل منحنی‌های تنش–کرنش قوطی‌های فومی جاذب انرژی، طی کمانش شبه استاتیکی، پرداخته‌اند، جمع آوری و بیان شده و در انتها اشاره ای به اثر مورفولوژی ساختار متخلخل فوم‌ها سلول بسته بر استحکام فوم شده است.

رفتار عمومی منحنی تنش– کرنش نمونه‌های فومی فلزی سلول بسته استوانه ای، که در راستای محور آن‌ها بارگذاری فشاری شود، مطابق شکل (۱- الف) است. طبق این شکل ملاحظه می‌شود که فوم‌های فلزی در منطقه وسیعی از کرنش، تقریبا یک تنش تغییر شکل پایا از خود نشان می‌دهند (افزایش کرنش در تنش ثابت). هم‌چنین تغییرات اندکی در ضریب پواسون، حین تغییر شکل نیز در فومهای فلزی دیده می‌شود. بطورکلی فوم‌های فلزی ساختار سلولی بسته طی بارگذاری فشاری محوری، داری سه ناحیه جوانه زنی لغزش، رشد باندهای لغزش و ناحیه چگالش مطابق شکل (۱) هستند. تنش تسلیم فوم‌های سلول بسته، با از هم باز شدن تعدادی اندک از دیواره‌های سلولی، موسوم به "باند لغزش" در سطح مقطع نمونه تحت فشار رخ می‌دهد. این باندها معمولا در مراحل اولیه و در نقاط کم چگال یا معیوب فوم، تشکیل می‌شوند. این بخش اصطلاحا منطقهٔ الاستیک نامیده می‌شود [۱و۷]. در مرحلهٔ دوم، با افزایش تغییر شکل دیواره‌های سلول‌ها در این باندها، یک فشردگی موضعی ایجاد می‌شود و با توسعه این باندهای تسلیم در کل نمونه، مرحلهٔ تغییر فرم پلاستیک در تنش ثابت آغاز می‌شود. حتی در کرنش‌های پلاستیک بالا، تسلیم با خرد شدن ماده تغییر شکل نیافته ادامه می‌یابد که به آن تنش پلاستیک پایا می‌گویند که ناحیه دوم نمودار تنش- کرنش شکل (۱- الف) را تشکیل می‌دهد.

فروپاشی پلاستیک در ناحیه دوم گاهی با گسترش باند سلولی عمود بر صفحهٔ نمونه اتفاق می‌افتد. تعدادی از پژوهشگران اشاره کرده اند که فروپاشی یک باند سلولی باعث سفتی مناطق اطرافش می‌شود و رشد باند تغییر شکل در جهت عمودی را به تعویق می‌اندازد [۱]. بعضی دیگر از پژوهشگران، فروپاشی رفتار پلاستیک فوم‌ها را بر اساس پدیده کارسختی به دو دسته نرم و ترد تقسیم بندی می‌کنند [۷]. نمودار تنش کرنش در فروپاشی ترد، دندانه ارّه ای است و در هنگام تسلیم کاهش قابل توجهی در تنش مشاهده می‌شود و ادامه منحنی دارای شیب اندکی به علت کار سختی خواهد بود. اما درفوم‌ها با فروپاشی نرم، منحنی تنش کرنش بدون دندانه و تقریبا صاف است و به صورت یک خط تقریباً افقی (بدون کارسختی) ادامه می‌یابد تا به مرحلهٔ چگالش برسد که در برخی منابع نیز به تنش این منطقه ، تنش پایا می‌گویند. نمودار تنش-کرنش مربوط به دو حالت نام‌برده در مقالات متعددی ارائه شده است [۵ و۷]. شکل‌های (۱- ب)، (۱- ج) و (۱- د) به ترتیب نمودار تنش-کرنش را در یک فوم با فروپاشی ایده آل، فوم با فرو پاشی ترد و فوم با فروپاشی به همراه کار سختی گسترده، نشان می‌دهند. ناحیه انرژی جذب شده مفید، انتگرال سطح زیر این منحنی‌ها تا کرنش چگال شده (ε_D) است [۱].

اما ناحیه سوم منحنی شکل (۱- الف) مربوط به تغییر فرم پلاستیک طی چگالش فوم است. در این ناحیه، با ادامه فروپاشی گسترده باندهای سلولی، زمانی فرا می‌رسد که به دلیل بشکه ای شدن و کمانش پلاستیک، فضای باز بین سلولی، برای تغییر شکل پایا باقی نمی‌ماند. این مرحله همان ناحیه پایانی یا ناحیه سوم نمودار شکل (۱- الف) است. مقدار این کرنش مهندسی که چگالش در آن اتفاق می‌افتد با تقریب‌های مختلف قابل اندازه گیری است. به عبارت ساده‌تر شروع کرنش مرحله سوم، ε_D، دقیقا مشخص نیست و به کمک مدل‌های ریاضی- فیزیکی مختلف، توسط پژوهشگران مربوطه، تعریف می‌شود [۱]. عوامل مختلفی بر خواص جذب انرژی فوم‌های فلزی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]



شکل ۱- الف) سه مرحله منحنی تنش-کرنش فوم فلزی تحت تنش محوری فشاری بالا، و رفتار منحنی تنش-کرنش فشاری فوم‌ها در حالت ب) نرم (ایده‌آل)، ج) ترد و د) مستعد به کارسختی.

موثرند که این عوامل عبارت از جنس و نوع فلز سازنده فوم، چگالی فوم، اندازه سلول‌های تشکیل دهنده فوم و هندسه ساختار سلول‌های تشکیل دهنده فوم هستند. برای افزایش قابلیت جذب انرژی فوم‌های فلزی یا سازه‌های جاذب انرژی، باید تنش و کرنش پایا را افزایش داد. افزایش تنش پایا با انتخاب یک آلیاژ زمینه مناسب و با توجه به چگالی مربوط به آن صورت می‌گیرد. قبل از این‌که فوم‌های فلزی به عنوان مواد پیشرفته پا به عرصه صنعت بگذارند، لوله‌های جدار نازک فلزی به عنوان سازه‌های جاذب ضربه در صنعت مطرح بودند و هم اکنون نیز کارایی خود را دارند. این کارایی بدین معناست که میزان جذب انرژی آن‌ها در واحد حجم یا در واحد جرم آن‌ها بالاست. لذا می‌توانند قابل رقابت با فوم‌های فلزی باشند. در مرجع [۸] تغییرفرم پلاستیک یا همان کمانش پلاستیک پیشرونده، یک لوله جداره نازک را بخوبی با آزمایش نشان داده است.

هنگامی که یک لوله جدارنازک در برابر یک نیروی محوری فشرده می‌شود، می‌تواند یا بصورت متقارن (حلقوی) و یا بصورت غیر متقارن (الماسی) له یا دچار چین خوردگی شود. این که یک لوله متقارن یا نامتقارن له شود بستگی به نسبت شعاع لوله به ضخامت جداره آن دارد. اگر این نسبت کم‌تر از ۴۵-۴۰ درصد باشد یا به عبارتی اگر جداره ضخیم باشد و هم‌چنین نسبت طول لوله به شعاع لوله تقریباً کم‌تر از ۸ برابر باشد، چین خوردگی یا کمانش پلاستیک، بصورت متقارن انجام خواهد شد [۹-۱۰]. مقدار کمّی جذب انرژی در طی کمانش در یک گام چین خوردگی با طول ثابت L از رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$E_a = \frac{2\pi\sigma_{ys} H^2 (\pi R + l)}{\sqrt{3}} + 2\pi\sigma_{ys} l^2 H \qquad (۱)$$

که در این رابطه E_a انرژی جذب شده، σ_{ys} تنش تسلیم، H ,R به ترتیب شعاع داخلی و ضخامت لوله و L طول بازوی تاخورده است. البته رابطه (۱) بیش‌تر برای قوطی‌ها با مقاطع دایره یا لوله صادق است و برای سایر مقاطع مانند مربع و مستطیل، رفتار تغییرفرم و کمانش متفاوت و در بعضی مواقع مدل‌سازی آن پیچیده‌تر از مقاطع دایره‌ای است [۱۱]. یاماشیتا و همکاران [۱۲] نشان دادند که هرچه تعداد اضلاع مقاطع قوطی‌ها بیش‌تر شود، استحکام این قوطی‌ها افزایش می‌یابد و تأثیر آن با کاهش ضخامت جداره قوطی برجسته‌تر می‌شود. این اتفاق به این دلیل است که قسمت اعظم اتلاف انرژی در اثر تغییرفرم گوشه‌ها است [۱۳]. ناکازاوا و همکاران [۱۴] نیز با ساخت قوطی‌ای برای جذب انرژی در خودرو نشان دادند که قوطی‌ای با مقطع ۲۴ ضلعی علاوه بر کاهش وزن، جاذب انرژی زیادی خواهد بود. اما در ده‌های اخیر وقتی پژوهشگران با رفتار

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

جذب قوطی‌های جداره نازک و از طرفی فوم‌های فلزی روبرو شدند، تصمیم به استفاده از تلفیقی از دو ماده یاد شده را گرفتند. لذا تعدادی از پژوهشگران برای استفاده و بهره بردن هم‌زمان از خواص لوله‌ها و فوم‌های فلزی و در نتیجه افزایش میزان کارایی لوله‌ها، آن‌ها را به وسیله فوم‌های فلزی پر و سپس به عنوان سازه جاذب انرژی استفاده نمودند و در ادامه مقدار نیروی قابل اعمال به ازای یکی مقدار جابه جایی مشخص بر یک لوله فلزی توخالی، یک فوم فلزی و هم‌چنین یک لوله فلزی پر شده با فوم فلزی را مورد مقایسه قرار دادند [۱و۱۳]. نتایج آن‌ها و سایر پژوهشگران به صورت رابطه (۲) ارائه شده است.

$$W_v^{Filledtube} = W_v^{Tube} + W_v^{Foam} + W_v^{Int.} \qquad (۲)$$

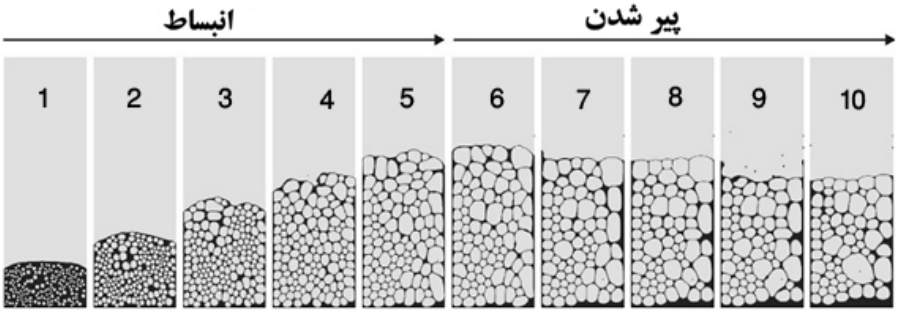
که در این رابطه $W_V^{Filledtube}$ مقدار انرژی جذب شده در واحد حجم لوله‌های فلزی پر شده با فوم، W_V^{Tube} انرژی جذب لوله توخالی، W_V^{Foam} انرژی جذب فوم و $W_V^{Int.}$ مقاومت چسبندگی فصل مشترک لوله و فوم است [۱۵ و۱۶]. عبارت انرژی جذب شده اضافی ($W_V^{Int.}$)، در اثر برهمکنش فوم و لوله‌های فلزی در رابطه (۱) اضافه شده است. دلیل این امر این است که فوم‌های فلزی به علت پشتیبانی و در نتیجه افزایش مقاومت دیواره‌ی لوله‌ها، طول موج چین‌ها را کاهش می‌دهند و باعث تشکیل چین‌های پلاستیک بیش‌تری به ازای واحد طول می‌شوند. وجود فوم‌های فلزی در داخل لوله‌ها هم‌چنین باعث می‌شود که مقدار جابه‌جایی و کرنش چگالش قبل از قفل شدن و متوقف شدن چین‌ها کم‌تر شود و از طرف دیگر مقدار نیروی متلاشی شدن F_m افزایش یابد. به این ترتیب مقدار انرژی جذب شده $F_m.\delta$ تقریبا در این سازه تلفیقی ۳۰٪ افزایش می‌یابد که جزئیات این مطلب در فصل ۴ مرجع [۱] آمده است. مشاهده می‌شود که لوله‌های فلزی توخالی نسبت به فوم‌های فلزی مقدار انرژی بیش‌تری متناسب با رابطه (۳) جذب می‌کنند.

$$\frac{W_v^{Tube}}{W_v^{Foam}} \approx 4.2\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{1/6} \qquad (۳)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود به ازاء تمام مقادیر حقیقی چگالی نسبی ρ/ρ_s مقدار انرژی جذب شده در واحد حجم لوله‌های فلزی توخالی حدود سه برابر بیش‌تر از فوم‌های فلزی با چگالی زیر واحد است. اما باید توجه داشت که فوم‌های فلزی به علت همگن بودن و قابلیت جذب انرژی در تمام جهات و هم‌چنین مقاومت بیش‌تر در برابر ضربه‌های احتمالی و ناگهانی، نسبت به لوله‌های فلزی توخالی بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته اند. چندی از پژوهشگران آزمایش‌های ضربه را برای فوم‌آلومینیم طراحی کردند و انرژی جذب شده آن را با وجود عدم آسیب رسیدن به فوم قابل قبول توصیف کردند [۱۷]. هم‌چنین لوله‌های مخروطی پُرشده با فوم آلومینیوم نیز به عنوان جاذب انرژی با رفتار تغییرفرم یکنواخت‌تر معرفی شده اند [۱۸]. نتایج پژوهش‌های دیگر نشان داده است که فوم‌های ساخته‌شده با کامپوزیت‌هایی که ذرات تقویت کننده آن در یک زمینه داکتیل پخش شده‌اند، دارای استحکام بالا و جذب انرژی زیادتری‌اند. [۱۹]

جزء اصلی ساختار فوم فلزی، حفره‌ها یا همان حباب‌های گازند که «سلول» نامیده می‌شوند. هر سلول خود از اجزایی مانند دیواره‌های سلول، مرزهای مسطح و گره‌ها (رئوس) تشکیل شده است. ضخامت متوسط دیواره سلول بسیار کم‌تر از قطر حباب است و محل تقاطع دیواره‌ها به عنوان مرز مسطح شناخته می‌شود. مرزهای مسطح به طور بی‌نظم به هم متصل‌اند و تشکیل شبکه‌ای می‌دهند که در آن در گره‌ها حداقل چهار مرز مسطح اتصال دارند [۲۰]. هندسه سلول‌های حاصل با دو شرط تعیین می‌شود. از یک طرف انرژی درونی یعنی سطح داخلی باید تا جایی که امکان دارد کوچک باشد. از طرف دیگر، چیدمان سلول‌ها باید فضاپرکن باشد. شرط دوم محدودیت توپولوژیکی است و از این حقیقت ناشی می‌شود که تنها تعداد محدودی از هندسه‌های سلولی فضا پرکن هستند. جستجو برای سلول بهینه هنوز به اتمام نرسیده است. برای مدت‌ها عقیده براین بود که سلول به اصطلاح «کلوین» دارای حداقل انرژی است. امروزه رکورد مربوط به سلول‌های ویرفلن است [۲۰ و۲۱]

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]



شکل ۲- مراحل تکامل فوم: جوانه‌زنی، رشد، درشت شدن و فرو ریختن [۲۰]

و پژوهش‌ها برای ساختارهای بهتر هم‌چنان ادامه دارد. اما این هندسه سلولی طی مرحله فوم سازی در مذاب فومی شکل می‌گیرد و در صورت پایدار بودن (قبل از ترکیدن) اگر منجمد شود، فوم فلزی با ساختارسلولی مناسب تولید خواهد شد. پس چگونگی پایداری فوم‌ها در مرحله ذوب (نترکیدن و یا ادغام شدن حفرها) موضوع مطالعه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفت. حاصل این پژوهش‌ها در شکل (۲) نمایش داده شده است [۲۰]. دراین شکل اگر فوم در مراحل ۵ الی ۶ منجمد شود، تقریبا حالت پایدار فوم تثبیت می‌شود و این فوم علاوه بر ساختار مناسب دارای حداقل چگالی نیز است. لذا دست‌یابی به آن زمان یکی از پارامترهای اصلی ومورد علاقه صنایع تولید فوم فلزی است. در شکل (۲)، در مراحل اولیه، انبساط با جوانه‌زنی حباب که به علت مقدار اضافی گاز حباب‌زا القاء می‌شود، آغاز می‌شود. این گاز آزاد و به علت دمای زیاد یا فشار خارجی در فاز مذاب حل می‌شود که هر دو عامل باعث افزایش غلظت گاز حل شده در سیال ناشی از تجزیهٔ عامل حباب‌زا می‌شوند. در نتیجه گاز به حباب‌ها نفوذ می‌کند، مقدار گاز در حباب‌ها افزایش می‌یابد و باعث رشد آن‌ها می‌شود و در طی رشد، حباب‌ها شروع به اندرکنش با یکدیگر می‌کنند. در ابتدا، نیروهایی که حباب‌ها متقابلاً به یکدیگر اعمال می‌کنند ناشی از هیدرودینامیک و فقط شامل نیروی ویسکوز است و از این رو به سرعت انبساط حباب‌ها و ویسکوزیته سیال وابسته است. این نیروها سعی می‌کنند حباب‌ها را تغییر شکل دهند و با کشش سطحی که تمایل به باز گرداندن حباب‌ها به شکل کروی دارد، اندرکنش می‌کنند. اگر چگالی نسبی به یک مقدار معین برسد، حباب‌ها بیش‌تر شکل چندوجهی به خود می‌گیرند. این فرایند با ادغام و درشت تر شدن سلول که منجر به ناپایدار شدن فوم و در نهایت فروریختن ساختار سلولی فوم می‌شود، ارتباط تنگاتنگ دارد. عوامل موثر بر پایداری فوم فلزی بسیار متعدد و دسته بندی آن‌ها به علت ماهیت پیچیده پایداری فوم بسیار مشکل است. اما علاوه بر پودرهای پایدار کننده مانند پودر SiC در مذاب Al ، که با افزایش ویسکوزیته مذاب و تقویت اثر ماراگونی حباب‌ها را پایدارتر می‌کنند، شاید بتوان از عوامل توپولوژیکی حباب، به ضخامت دیواره حباب و انحنای آن‌ها اشاره نمود. به نظر می‌رسد که یک حداقل ضخامت دیواره سلولی وجود دارد که زیر آن دیواره دچار شکست می‌شود. برای فوم Al-Si این ضخامت حدود ۸۰-۵۰ μ و برای فوم آلومینیم خالص حدود ۱۰۰ μ است [۲۲و ۲۳]. گاهی اوقات پیشنهاد می‌شود که این ضخامت، یک ضخامت بحرانی است که زیر آن وجوه سلولی ناپایدارند. این ضخامت عموما به وسیله فرایند فوم سازی محدود می‌شود و از پارامترهایی که متقابلاً برهم اثر می‌گذارند مانند اندازه، شکل و درصد حجمی فاز جامد، هندسه ساختار فوم و دما و زمان فرایند، تأثیر می‌پذیرد. شواهدی در مورد ارتباط بین اندازه ذرات جامد پایدار کننده و ضخامت وجوه سلولی وجود دارد [۲۴].

از این رو در پژوهش حاضر سعی شده است ابتدا داخل قوطی‌های برنجی به روش فرم‌گریپ با مذاب فوم‌های

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و برخی خواص آلیاژ آلومینیم A356 مصرفی در کار حاضر [۲۵]

ترکیب	Si	Mg	Mn	Cu	Fe	Zn	Ti	Al
درصد	۶/۷	۰/۳	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۳	۰/۱	بقیه

	دمای لیکوئیدوس (°C)	دمای سالیدوس (°C)	تنش تسلیم در ۰/۲ ٪	تنش کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	درصد تغییر طول٪	سختی برینل HBN	
خواص	۶۱۵	۵۷۷	۱۸۵	۲۳۰	۷۱	۲	۷۵	

جدول ۲- مشخصات مواد پودری استفاده شده در پژوهش حاضر

اندازه (میکرون)	خلوص	سازنده	ترکیب شیمیایی	
<۲۰	٪۹۵	آلمان	SiC	فاز تقویت کننده و پایدارساز
<۴۵	٪+۹۸	آلمان- شرکت مرک (شماره۱.۱۲۳۸۴)	TiH_2	عامل حباب‌زا
<۶۳	٪۹۹.۹	ایران-شرکت متالوژی پودر خراسان	Al	مکمل

آلومینیمی کامپوزیتی پر شود. در مرحله بعد تلاش شده است که رفتار جذب انرژی کمانش شبه استاتیکی آن‌ها تحت بارگذاری فشاری محوری، به کمک منحنی‌های تنش- کرنش اندازه گیری شود. در انتها رفتار منحنی‌های بدست آمده با توجه به تحلیل ساختار سلولی فوم به کمک نرم افزار Clemex مانند اندازه، شکل و تعداد حفرها در واحد حجم، مدل‌سازی می‌شود.

۲- روش پژوهش

۲-۱- مواد اولیه

درپژوهش حاضر با استفاده ازمواد اولیه شامل شمش A356، پودرحباب زای TiH_2، پودر تقویت کننده کامپوزیت SiC و لوله‌های برنجی Cu30wt.%Zn طراحی فرایند تولید فوم به روش ریخته گری موسوم به فرم‌گریپ انجام گرفت [۲۰] و فوم‌های با چگالی‌های مختلف و اندازه‌های سلولی متفاوت (از ریز به درشت) تهیه شد. سپس سازه‌های تلفیقی از لوله توخالی برنجی، پرشده با فوم آلومینیم کامپوزیتی A356-10vol.%SiC ساخته شد تا اثر چگالی فوم و ساختار سلولی آن، بر رفتار جذب انرژی این سازها طی چین خورگی کمانش پلاستیک پیشرونده در شرایط بارگذاری فشاری تک محوری بدست آید.

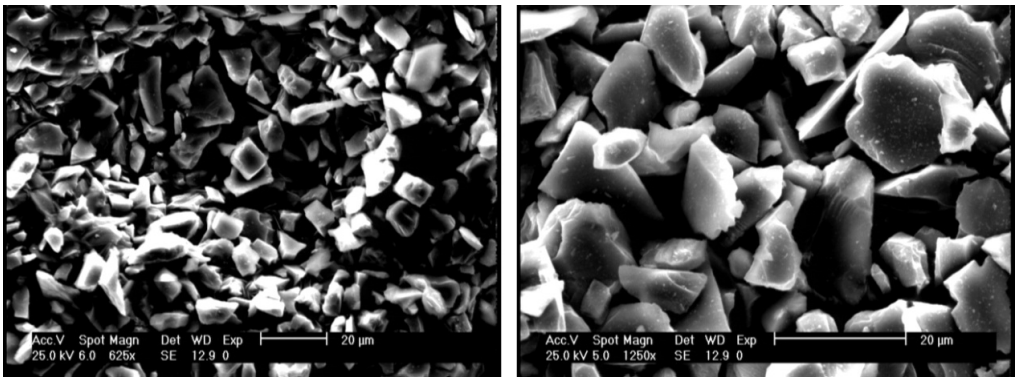
۲-۲- مواد مصرفی

برای ساخت فوم فلزی از آلیاژ آلومینیم A356 استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن به همراه خواص مکانیکی آن در جدول (۱) آورده شده است. آلیاژ A356 با دامنه انجماد ۳۸ درجه سانتی‌گراد و انجماد به نسبت خمیری، استفاده گسترده ای در ریخته‌گری دارد و به علت اینکه حاوی حدود ۶٪ سیلیسیم است، می‌تواند با ویسکوزیته خود زمان ماندگاری حباب را افزایش دهد، و در نتیجه انتخاب مناسبی برای پژوهش حاضر است. در طی ذوب این آلیاژ، حدود ۱٪ منیزیم به صورت آمیژان آلومینیم۵۰٪-۵۰٪ منیزیم نیز اضافه می‌شود تا به افزایش خیس پذیری ذرات SiC کمک کند [۲۵].

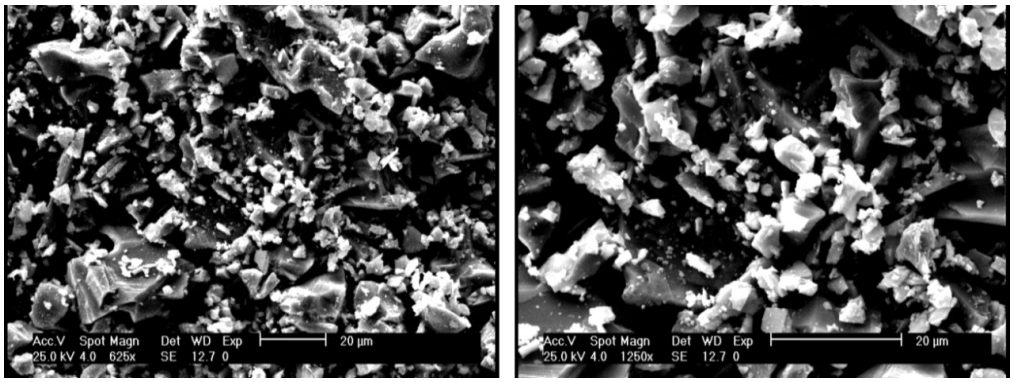
۲-۳- مواد پودری استفاده شده

این مواد شامل ذرات تقویت کننده و پایدارساز SiC، عامل حباب زا TiH_2 و پودر آلومینیم خالص‌ند. مشخصات این پودرها در جدول (۲) ارائه شده است. برای مشخص شدن مورفولوژی، اندازه و توزیع ذرات مواد پودری تصاویر میکروسکوپ الکترونی، مواد عامل حباب‌زا و پودر فاز تقویت کننده در شکل (۳) و شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی پودر SiC در دو بزرگ‌نمایی مختلف



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی پودر TiH_2 در دو بزرگ‌نمایی مختلف

از تصاویر مشخص است ذرات کاربید سیلیسیم گوشه دار و دارای توزیع اندازه ذرات تقریبا یکنواخت‌اند، در حالی‌که ذرات هیدرید تیتانیم کم‌ترگوشه دارند، اما از یکنواختی کم‌تری (مخلوطی از ریز و درشت) برخوردارند. برای تولید لوله‌های پرشده با فوم فلزی، لوله‌های برنجی با ترکیب شیمیایی Cu-30 wt.%Zn به قطر ۲۷ میلی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر مطابق شکل (۵) خریداری شد. نسبت ارتفاع به قطر لوله‌ها برای حداقل کردن کمانش در آزمون فشار ۱/۵ انتخاب شد.

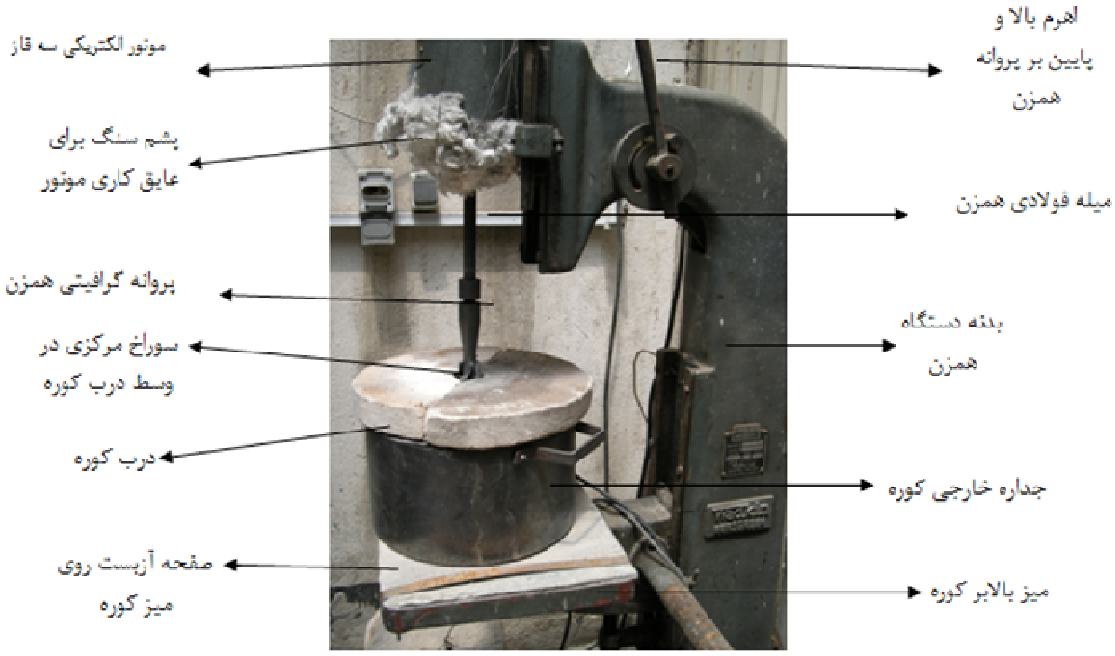
۲-۴- تجهیزات و طراحی

برای انجام این پژوهش، یک دستگاه هم‌زن مذاب مجهز به کوره مقاومتی و دارای قابلیت کنترل دما و سرعت چرخش هم‌زن، طراحی و ساخته شد. کوره دستگاه هم‌زن، دارای المنت کنتال و ملات نسوز HF100 با توان ۳۷۰۰ وات به شکل استوانه با قطر داخلی و خارجی ۲۵ و ۳۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بود. برای کنترل دمای کوره از یک کنترل خاموش/ روشن مغناطیسی با دقت پنج درجه استفاده شد. مطابق شکل (۶) قسمت‌های مختلف کوره مجهز به پروانه هم‌زن، عبارت از یک صفحه میز برای قرار دادن کوره، یک پدال و دسته‌ای برای بالا و پایین بردن موتورهم‌زن دستگاه است. یک دسته چرخنده برای تنظیم ارتفاع میز که در نتیجه قابلیت بالایی برای تنظیم دقیق مکان کوره و پروانه در ارتفاع دلخواه به وجود می‌آورد نیز استفاده می‌شود. برای کنترل سرعت دور هم زن از یک اینورتور ساخت شرکت ژاپنی با مارک N100 استفاده شد که اجازهٔ تنظیم قدرت و سرعت گردش پروانه از ۰ تا ۲۸۰۰rpm با کنترل گشتاور می‌دهد. برای اندازه گیری دمای کوره و هم‌چنین دمای مذاب از ترموکوپل‌های نوع K با غلاف سرامیکی استفاده شد که بعد از هر چند بار استفاده برای اطمینان از کارکرد آن کالیبره می‌شد. برای طراحی بوته با توجه قطر خارجی پروانه هم‌زن، باید قطر

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]



شکل ۵- لوله‌های برنجی استفاده شده با قطر ۲۷ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵

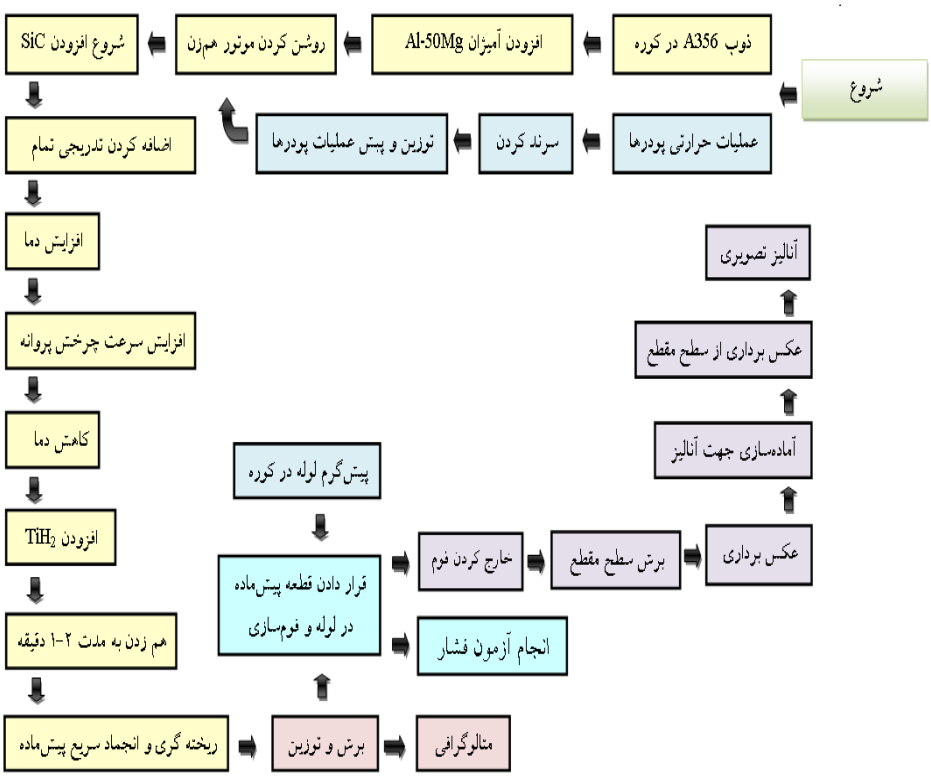


شکل ۶- نمایی از کوره و همزن مورد استفاده جهت ساخت پیش ماده فوم سازی

بوته طوری انتخاب شود که نسبت قطر دهانهٔ بوته حدود ۱/۵ برابر قطر همزن باشد [۲۰و۲۵]. این امر باعث هم خوردن مناسب مذاب داخل بوته و ایجاد جریان گردابی مناسب در مذاب و به دنبال آن ایجاد پیش ماده با توزیع همگن مواد پایدار کننده و حباب زا می‌شود. طراحی آزمون‌ها و سیکل پژوهش برای ساخت لوله‌های پرشده با فوم فلزی مطابق نمودار شکل (۷) انجام گرفته است.

ابتدا باید پودرها را عملیات حرارتی نمود. درمورد پودر هیدرید تیتانیم برای به تاخیر انداختن فرایند آزاد شدن گاز، روی پودر مذکور عملیات پخت اولیه انجام می‌شود تا یک لایه محافظ اکسید تیتانیوم در سطح پودر تشکیل شود. با توجه به پژوهش‌های انجام شده [۲۶] برای این کار پودر هیدرید تیتانیم به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و سپس ۱ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. پودر SiC نیز برای افزایش خیس پذیری نسبت به مذاب آلومینیم به مدت ۲ ساعت در۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد عملیات حرارتی می‌شود تا یک لایه نازک SiO_2

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]



شکل ۷- سیکل پژوهش و طراحی آزمون‌ها در پژوهش حاضر

در اطراف ذرات SiC تشکیل شده و زاویه ترشوندگی آن‌ها کاهش یابد [۲۷].

مرحلهٔ بعد شامل ساخت کامپوزیت A356-10vol.%SiC بعنوان زمینه فوم است. برای این کار از آلیاژ آلومینیم A356 (جدول (۱)) به عنوان فلز پایهٔ فوم سازی استفاده شده است. در هر نوبت تولید پیش ماده حدود ۳۵۰ گرم از آلیاژ آلومینیم A356 در داخل کوره قرار گرفته تا ذوب شود. پس از اینکه آلیاژ به دمای نیمه مذاب حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد رسید، افزودن پودر کاربید سیلیسیم آغاز می‌شود. این پودر، از پیش عملیات حرارتی شده، الک شده (جدول (۲)) و در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه پیش‌گرم شده است. درحالیکه آلیاژ نیمه مذاب با استفاده از هم‌زن گرافیتی با سرعت ۸۰۰ دور بر دقیقه هم زده می‌شود پودر کاربید سیلیسیم با نرخ حدود ۱۰ گرم بر دقیقه به مذاب افزوده می‌شود. علاوه بر این به آلیاژ مورد اشاره حدود ۱٪ منیزیم به صورت آمیژان آلومینیم۵۰٪-۵۰٪ منیزیم نیز اضافه می‌شود تا به افزایش خیس پذیری SiC کمک کند. پس از این‌که تمام کاربید سیلیسیم افزوده شد، هم زدن مذاب حدود ۲۰ تا ۲۵ دقیقه ادامه می‌یابد. سپس دما به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد تا نمونه کاملاً مذاب شود و همگنی توزیع ذرات افزایش یابد. در این دما نیز مذاب کامپوزیتی به مدت ۱۰ دقیقه هم زده می‌شود. مرحلهٔ بعد افزودن عامل حباب زا به کامپوزیتِ آماده شدهٔ A356-10vol.%SiC است. برای افزودن عامل حباب‌زا به مذاب، پودر آلومینیم با نسبت ۱ به ۱ با عامل حباب زا مخلوط می‌شود تا خیس‌شوندگی آن نسبت به مذاب آلومینیم افزایش یابد و توزیع آن در مذاب همگن‌تر شود. سپس دمای کوره در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم می‌شود. هنگامی‌که دمای کوره حاوی کامپوزیت به ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد رسید، دور موتور به ۱۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش می‌یابد و سپس عامل

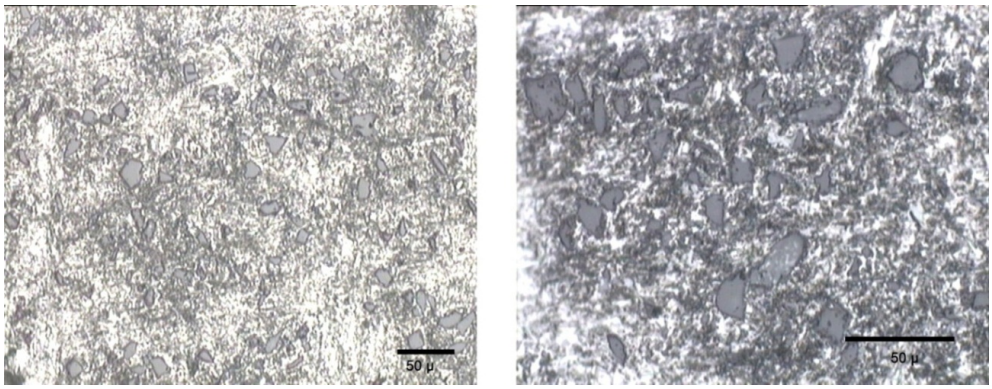
[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

حباب زا به مذاب اضافه می‌شود. کنترل دقیق دمای مذاب در این مرحله بسیار اهمیت دارد زیرا در دماهای پایین تر از این مقدار سیالیت مذاب به حدی پایین است که اجازهٔ مخلوط شدن عامل حباب زا به صورت همگن را نمی‌دهد و در دماهای بالاتر از این مقدار نیز فرایند آزاد شدن عامل حباب زا آغاز می‌شود و باعث از بین رفتن عامل حباب زا در این مرحله می‌شود. لازم به ذکر است که در این مرحله دمای مذاب توسط یک ترموکوپل نوع K که مستقیماً در مذاب قرار داده می‌شود اندازه گیری می‌شود. بعد از این‌که تمام عامل حباب زا اضافه شد هم زدن مذاب حدود ۱ الی ۲ دقیقه ادامه می‌یابد. هم زدن بیش‌تر در این مرحله باعث آزاد شدن عامل حباب زا می‌شود. در انتها، مذاب حاصل به سرعت در قالب فلزی استوانه ای آب‌گرد ریخته‌گری و منجمد می‌شود. آلیاژکامپوزیتی A356-10vol.%SiC جامد تهیه شده در این قالب، «پیش مادهٔ فوم سازی» و روش ساخت آن «فرم‌گریپ» نام دارد. سپس پیش ماه مذکور برای فوم سازی، در تکه‌های متناسب با حجم لوله‌های برنجی بریده می‌شود. در این پژوهش برای بررسی اثر عامل حباب زا بر جذب انرژی لولهٔ پرشدهٔ فومی، پیش ماده‌هایی با سه درصد مختلف ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی TiH_2 انتخاب شد. برای هر حالت دو تا سه نمونهٔ فومی ساخته شد تا زمان بهینهٔ فوم‌سازی یعنی حداکثر افزایش حجم بدست آید. در مرحله ساخت قوطی‌های فومی، پس از فرایند پیش گرم لوله‌های برنجی در کوره، تکه پیش مادهٔ بریده شده داخل آن قرار می‌گیرد و طی زمان مناسب با آزاد شدن عامل حباب زا، پیش ماده به فوم مذاب تبدیل می‌شود و با انبساط خود تمام حجم لوله را پر از فوم مذاب می‌کند. حال با خروج سریع لوله برنجی حاوی فوم از کوره و خنک نمودن آن ، جامد فومی شکل می‌گیرد. برای این‌که نام‌گذاری نمونه‌ها با معنا باشند، آن دسته از لوله‌هایی که با فوم پر شده بودند، با توجه به درصدهای TiH_2 مصرفی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد، به ترتیب با کدهای L-1 ، L-1.5 و L-2 مشخص و لوله خالی با کد L-0 نام‌گذاری شد. در پژوهش حاضر ساختار سلولی فوم‌ها به کمک نرم افزار تحلیل تصویری Clemex به مقایر کمّی تبدیل شد و محاسبات آماری برای پارامترهای بدست آمده مانند قطر، کرویت و محیط حفره‌ها انجام گرفت.

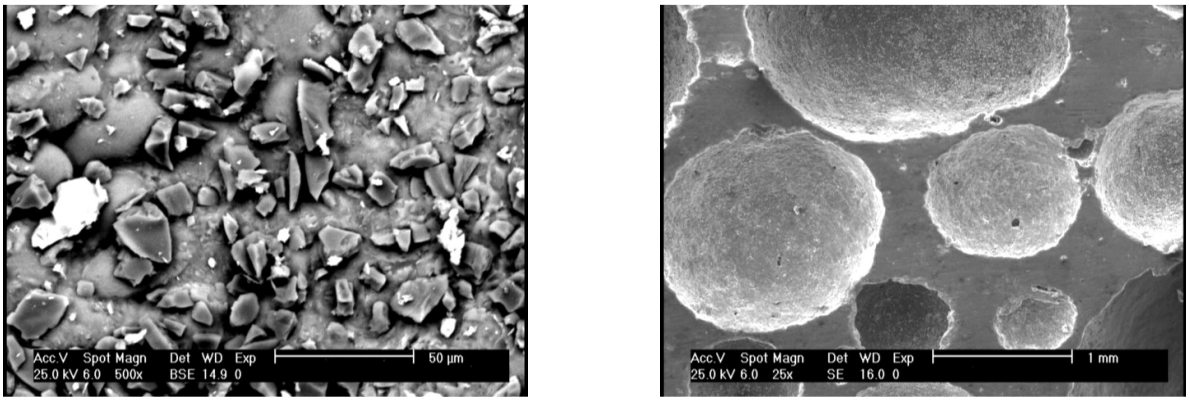
۳- نتایج وبحث

در مرحله اول برای بررسی توزیع ذرات SiC در زمینه آلیاژ A356 از پیش ماده ریخته گری شده، تصاویر متالوگرافی نوری تهیه شد. نتایج این آزمون در تصاویر شکل (۸) ارائه شده است. سپس به منظور اطلاع و بررسی چگونگی توزیع ذرات SiC در فوم و خصوصا در دیواره‌های حفره‌های فوم، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شد. شکل (۹- الف) ساختار حفره‌های فوم و شکل (۹- ب) بزرگ‌نمایی قسمتی از دیواره داخل یکی از حفره‌ها را نشان می‌دهد. نتایج اندازه گیری چگالی پیش ماده‌ها و فوم‌های بدست آمده از آن‌ها به همراه شرایط تولید در جدول (۳) برای کامپوزیت A356-10vol.%SiC با چگالی نظری ۲/۷۳ گرم برسانتی‌متر مکعب ارائه شده است. این چگالی بر اساس قانون مخلوط‌ها محاسبه شده است [۲۰و ۲۵]. برای بررسی میزان جذب انرژی لوله‌های برنجی توخالی و پر شده با فوم A356-10vol.%SiC با چگالی‌های مختلف (در درصدهای مختلف TiH_2) ، آزمون فشار تک محوره انجام گرفت. شکل (۱۰) تفاوت بارز الگوی چین‌خوردن یا کمانش پلاستیک پیش رونده این قوطی‌ها را در دو حالت خالی و پرشده با فوم نشان می‌دهد. نتایج کمی آزمون فشار تک محوره بصورت منحنی‌های نیرو– جابجایی در شکل (۱۱) رسم شده است. سپس به کمک نمودارهای مذکور با محاسبه سطح زیر منحنی‌ها، انرژی جذب شده در طی چین‌خوردگی کمانش پلاستیک پیشرونده به دست آمد. نمودار شکل (۱۲) نتایج این محاسبات را، با توجه به کدگذاری فوق بر واحد حجم، نشان می‌دهد. برای بررسی ساختار داخلی فوم‌ها از لحاظ توزیع و تعداد تخلخل و هم‌چنین رفتار له شدگی فوم بدون لوله ابتدا، تعدادی از لوله‌های برنجی پرشده از فوم، پس از انجماد و سرد شدن به

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

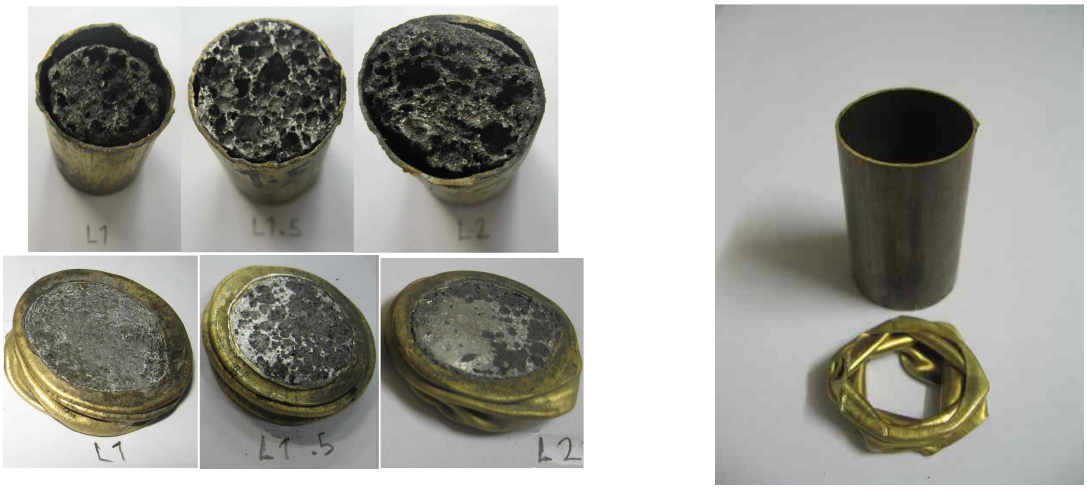


شکل ۸- تصویر متالوگرافی پیش ماده کامپوزیتی A356-10vol.%SiC در دو بزرگ‌نمایی متفاوت



(ب) (الف)

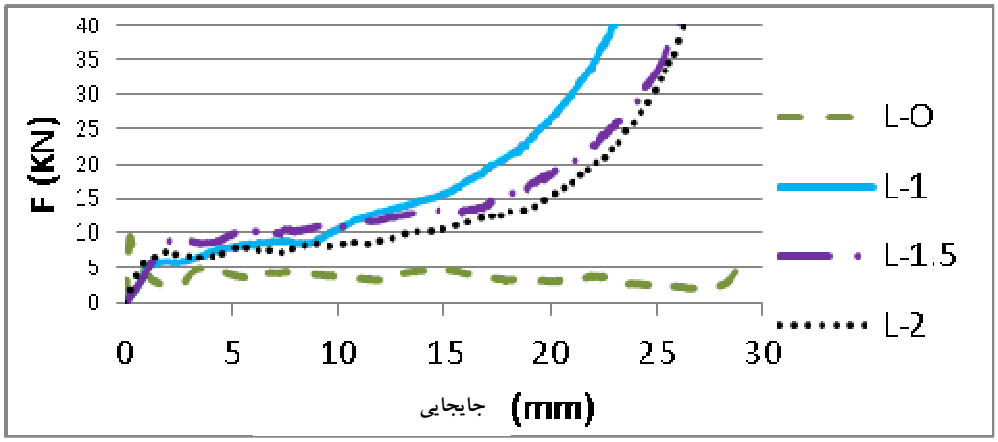
شکل ۹- تصویر SEM الف) دیواره سلولی و ب) ذرات SiC در دیواره فوم حاوی ۱۰ درصد حجمی SiC



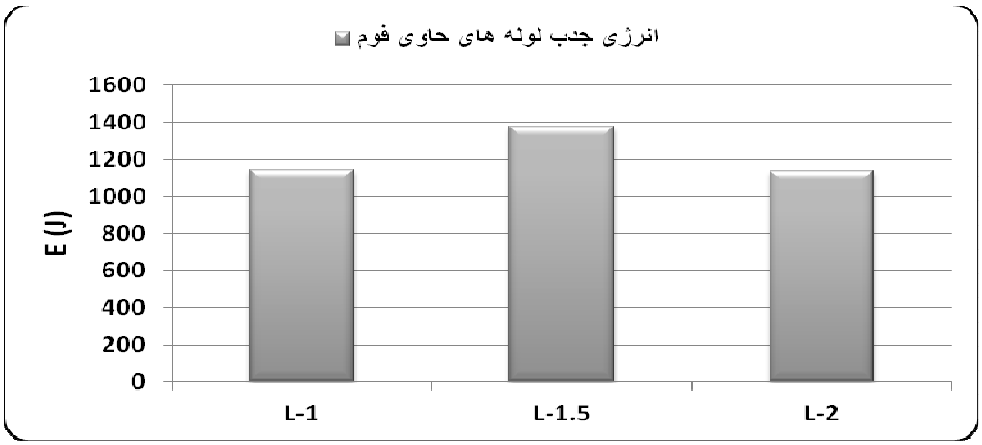
(ب) (الف)

شکل ۱۰- الگوی کمانش پیش‌رونده لوله‌های جاذب انرژی: الف) لوله‌های برنجی تو خالی با الگوی غیرهمگن یا الماسی و ب) لوله‌های برنجی پرشده از فوم A356-10vol.%SiC با الگوی همگن یا حلقوی در چگالی‌های مختلف.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]



نمودار ۱۱- مقایسه نمودارهای نیرو- جابجایی لوله توخالی با لوله‌های پرشده توسط فوم A356-10vol.%SiC



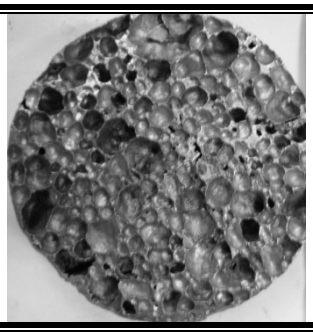
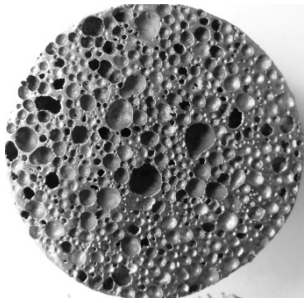
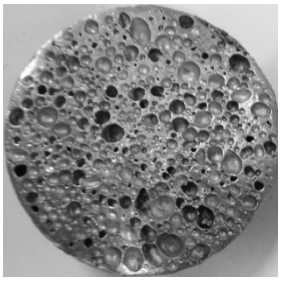
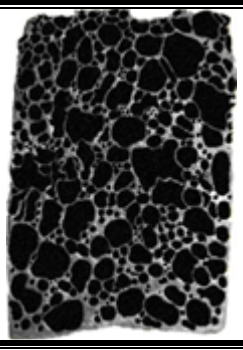
شکل ۱۲- مقایسه مساحت زیر منحنی تنش- کرنش لوله توخالی با لوله های حاوی فوم A356-10vol.%SiC با چگالی‌های متفاوت.

جدول ۳- شرایط تولید و چگالی فوم کامپوزیتی A356-10vol.%SiC و پیش ماده مصرفی در پژوهش حاضر

TiH_2 wt.%	دمای پخت (°C)	زمان پخت (min)	چگالی پیش‌ماده (D*) (g/cm3)	چگالی فوم (D) (g/cm3)	نسبت دانسیته فوم به آلومینیم D/D th
۱	۶۷۵	۵	۱/۸۷	۰/۹۳	۰/۳۴
۱/۵	۶۷۵	۵	۲/۲۱	۰/۸۸	۰/۳۲
۲	۶۷۵	۵	۱/۷۵	۰/۴۳	۰/۱۶

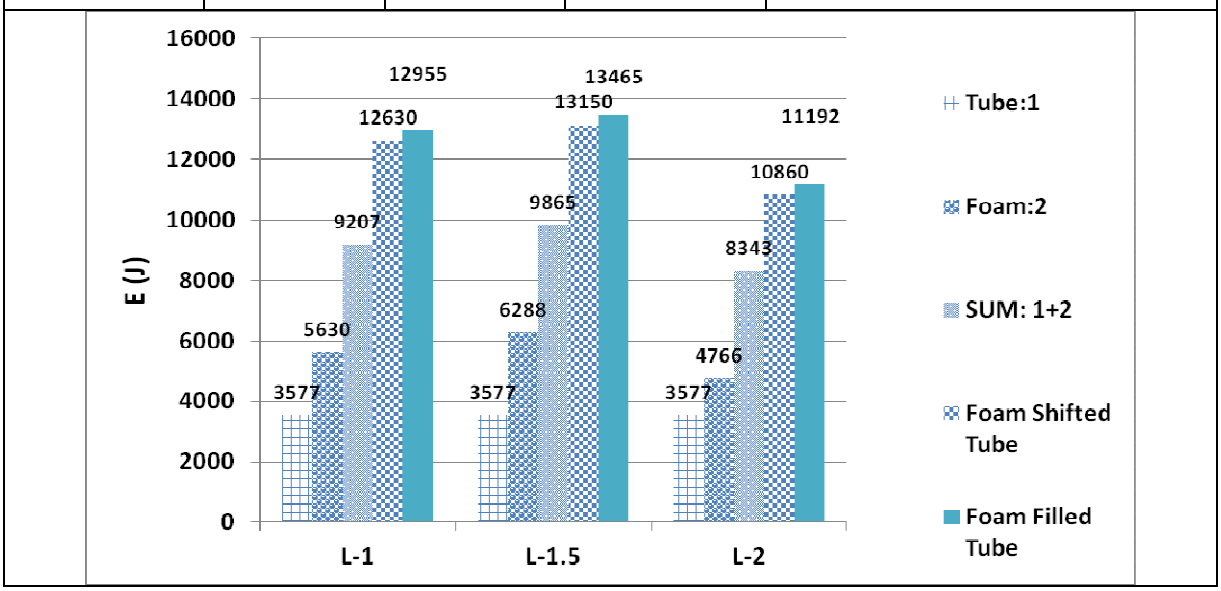
کمک اره مویی در راستای طولی بریده می‌شود تا جرم فوم از آن خارج شود، به طوری‌که به فوم داخل آن آسیبی نرسد. حال این استوانه‌های فومی منفرد، برش طولی و عرضی داده می‌شود تا ساختار متخلخل فوم‌ها آشکار شود. نتایج این آزمون در شکل (۱۳) ارائه شده است. در انتها نیز تعدادی از استوانه‌های فومی منفرد، تحت بارگذاری فشاری محوری قرار گرفت و مقدار جذب انرژی له شدگی آن‌ها محاسبه شد. مقایسه انرژی جذب این استوانه‌ها با سایر لوله‌های برنجی خالی و نیز پر شده با فوم در نمودار شکل (۱۴) ارائه شده است. نتایج شکل (۱۰) نشان می‌دهد که پر نمودن لوله‌های خالی بافوم A356-10vol.%SiC الگوی کمانش را کاملا عوض و از الگوی غیرمتقارن الماسی به الگوی متقارن حلقوی تبدیل نموده است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

درصد عامل حباب‌زا / ابعاد نمونه	L1= 1% TiH_2	L1.5=1.5% TiH_2	L2=2% TiH_2
۲۷=Φmm t. ۱=mm برش عرضی از وسط نمونه			
۲۷=Φmm t. ۱=mm برش طولی از وسط نمونه			

شکل ۱۳- برش عرضی و طولی نمونه‌های فومی A356-10vol.%SiC خارج شده از لوله‌های برنجی.

	L-1	L-1.5	L-2	واریانس کل
مجموع ریاضی نیروها برحسب نیوتن	۹۲۰۷	۹۸۶۵	۸۳۴۳	±۶
مفدار واقعی نیروها برحسب نیوتن	۱۲۶۳۰	۱۳۱۵۰	۱۰۸۶۰	±۸



شکل ۱۴- مقایسه مقدار کمی جذب انرژی لوله‌های خالی برنجی، لوله‌های پرشده با فوم A356-10vol.%SiC در درصدهای مختلف TiH_2 و استوانه فومی منفرد (بدون پوشش لوله برنجی).

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

الگوی متقارن حلقوی تقریبا در تمامی نمونه‌های ۱، ۱/۵ و ۲ درصد TiH_2 مشاهده می‌شود. از دیدگاه مهندسی مکانیک درصد عامل حباب زا در طراحی معیار قابل استفاده ای نیست، بلکه اثر آن بصورت تغییرات چگالی در معادلات و روابط طرحی قابل استفاده است. لذا اگر به داده‌های حاصل از اندازه‌گیری چگالی فوم A356-10vol.%SiC در جدول (۳) توجه شود، مشاهده می‌شود که به ترتیب افزایش عامل حباب زا از ۱ به۱/۵ و ۲، چگالی فوم A356-10vol.%SiC به ترتیب از۰/۹۳ به۰/۸۸ و ۰/۴۳گرم بر سانتی‌متر مکعب، کاهش می‌یابد. لذا افزایش عامل حباب زا چگالی را کاهش می‌دهد و تمامی قوطی‌های برنجی که با این سه چگالی فوم تهیه شده بودند، بصورت تقریبا متقارن حلقوی، کمانش و چین خوردگی پیدا نموده‌اند. لذا بایستی بررسی نمود که آیا مقدار کمّی چگالی عامل تعیین کننده در تبدیل الگوی کمانش الماسی به حلقوی بوده است؟ با دقت در تعداد حلقه‌ها و فاصله گام حلقه‌ها در پیرامون لوله‌ها در شکل(۱۰)، می‌توان مشاهده نمود که لوله L1.5 دارای سه حلقه متقارن با گام تقریباً یکسان در پیرامون لوله است . فوم A356-10vol.%SiC مصرفی در نمونه L1.5 دارای چگالی ۰/۸۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. اما در نمونه‌های L1 و L2 به ترتیب با چگالی فوم ۰/۹۳ و ۰/۴۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، گام چین خوردگی در پیرامون نمونه یکسان نیست و درنمونه L1 با چگالی فوم ۰/۹۳ گویی تعداد چین‌ها در پیرامون لوله له شده یکسان نبوده است، به خصوص که اندازه گام طرفین لوله تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. اگر چه این تفاوت گام در چین خوردگی در نمونه L2 نیز قابل مشاهده است، به نظر در شکل(۱۰) نمونه L1.5 با چگالی فوم ۰/۸۸ الگوی چین خوردگی متقارن‌تر و یکنواخت‌تری در کمانش از خود نشان داده است که احتمالا می‌تواند منجربه جذب انرژی بیش‌تری نیز در مقایسه با دو نمونه غیر متقارن L2 (با چگالی ۰/۴۳) و L1 (باچگالی ۰/۹۳) شود. مقایسه شکل‌های (۱۱) و (۱۰) نشان می‌دهد که وجود فوم در لوله با عث کارسختی در منطقه پلاستیک شده است. این بر خلاف لوله توخالی است که منطقه پلاستیک آن تقریبا افقی و بدون نمای کار سختی است و تا نقطه کرنش چگالش، می‌توان رفتار آن را مانند پلاستیک ایده آل در نظر گرفت. اما افزایش عامل حباب زا که می‌تواند منجر به کاهش چگالی فوم شود، نمی‌تواند تنها نقش افزایشی در کار سختی داشته باشد و به نظر می‌رسد که حالت بهینه دارد، زیرا افزایش از ۱/۵ درصد عامل حباب زا به ۲ درصد اثر چندانی در نمای کارسختی ندارد و گویا به حد اشباع می‌رسد و بیش‌تر شدن آن علاوه بر به هم ریختن ساختار همگن فوم با عث نوسانات اندکی در شیب نمای کارسختی می‌شود. لذا بیش‌ترین مقاومت به کمانش لوله برنجی در تصویر شکل (۱۰) مربوط به ۱/۵ درصد حباب زا است که بهترین الگوی کمانش پلاستیک را دارد. با مراجعه به نتایج کمّی جذب انرژی و مقایسه آن‌ها در شکل (۱۲) برای هر سه نمونه مذکور مشاهده می‌شود، جذب انرژی نمونه L1.5 (۱۳۱۵۰ ژول) از دو نمونه L1 (۱۲۶۳۰ژول) و L2 (۱۰۸۶۰ ژول) بالاتر است. پس بررسی نتایج ظاهری نشان می‌دهد که کاهش چگالی نمی‌تواند همواره معیار الگوی کمانش پیشرونده مناسب برای حداکثر جذب انرژی باشد. چرا که نمونه L2 با چگالی ۰/۴۳ مقدار جذب انرژی کم‌تری از دو نمونه دیگر دارد. از این‌رو می‌توان فرض نمود که اگرچه افزایش عامل حباب زا باعث کاهش چگالی فوم می‌شود، ولی این کاهش پی در پی نمی‌تواند منجر به جذب انرژی بیش‌تر و بیش‌تر با حفظ الگوی حلقوی همگن شود. نتایج مراجع [۱۳، ۱۶و ۲۸] نیز نتایج پژوهش حاضر را تایید می‌نمایند. پس به نظر می‌رسد علاوه بر مقدار چگالی عوامل دیگری باید در این الگوی کمانش موثر باشد. دو عامل اساسی را می‌توان چنین پیش فرض نمود. یک عامل ناشی از اتصال و نحوی چسبندگی فصل مشترک فوم فلزی به لوله برنجی و دوم عامل دیگری به نام الگوی ساختار سلولی و متخلخل فوم فلزی (بکاربرده شده در داخل لوله برنجی) است. برای تحلیل فرضیه اول، تعدادی از لوله‌های برنجی حاوی فوم با دقت از فوم جدا و فوم مجزا، مجددا در داخل لوله برنجی قرار داده شد. در این صورت دیگر هیچ چسبندگی بین فوم و لوله برنجی وجود

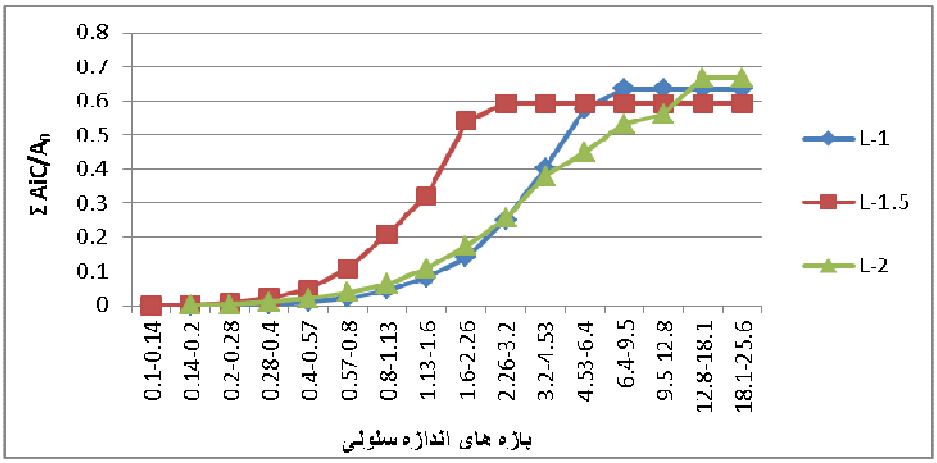
[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

ندارد. این نمونه جدید دوباره تحت تنش فشاری تک محوری قرار گرفت. نتایج استحکام این نمونه‌ها با نمونه‌هایی که چسبندگی بین فوم ولوله برنجی وجود داشت در شکل (۱۴)، کنار نمونه‌های فومی مجزا و هم‌چنین لوله خالی بدون فوم ارائه شده است. مشاهد می‌شود که انرژی جذب (سطح زیر منحنی نیرو – جابجایی در کرنش چگالش) درنمونه‌های که بین فوم و لوله چسبندگی نیست، اندکی کم‌تر از نمونه‌هایی است که بین فوم ولوله آن‌ها چسبندگی وجود دارد. این مقدار اختلاف، در مقابل کل انرژی جذب، بسیار اندک و تقریبا ثابت و حدود ۳۲۵ ژول با متوسط واریانس ۷± برای هر سه نمونه L1, L1.5 و L2 است. لذا فرضیه اول یا همان مقاومت چسبندگی فصل مشترک فوم/ لوله قابل قبول نیست و استحکام فصل مشترک لوله و فوم نمی‌تواند باعث تغییر الگوی کمانش پیشرونده باشد، زیرا انرژی جذب آن حدود ۲٪ متوسط انرژی جذب کل لوله برنجی پرشده با فوم است. از طرفی در شکل (۱۴) انرژی جذب هر دو نمونه ی دارای چسبندگی (Filled) و بدون چسبندگی (Shifted) فصل مشترک از جمع جبری انرژی‌های جذب نمونه فوم مجزا و نمونه لوله تو خالی بسیار بیش‌تر است. این نتایج با نتایج مرجع شکل(۳) که در قسمت مقدمه اشاره شد هم‌خوانی دارد. پس وجود خود فوم به علت ممانعت از لولا شدن دیواره داخلی لوله می‌تواند مقاومت به کمانش پلاستیک را بالا ببرد و میزان جذب انرژی آن را افزایش دهد و اتصال و چسبندگی فصل مشترک فوم- لوله بر آن بی‌تاثیر است. اما این‌که آیا هرچه چگالی فوم بیش‌تر شود، مقاومت آن در برابر چین خوردن لوله برنجی و افزایش جذب انرژی بیش‌تر می‌شود، قبلا در شکل (۱۲) اثبات شد که صرفاً اینگونه نیست. لذا خود بخود فرض دوم یعنی عامل ساختار سلولی و متخلخل فوم در کنار چگالی فوم عامل موثرتری در الگوی کمانش پیشرونده لوله حاوی فوم (چه با فصل مشترک چسبنده و چه غیر چسبنده) خواهد بود. اما برای اثبات این موضوع، می‌توان هر سه نمونه L1، L1.5 و L2 را در جهات طولی و عرضی برش و ساختار متخلخل آن‌هارا مورد بررسی قرار داد که نتایج این‌کار در شکل (۱۳) ارائه شده است. تصاویر شکل (۱۳) برای هر سه نمونه ی L1، L1.5 و L2 الگوی تخلخل سلولی متفاوتی را نشان می‌دهد، به طوری‌که نمونه L2 علاوه بر تخلخل‌های عادی سلولی فوم، دارای یک سری تهی حفره‌های بزرگ است که در نمونه‌های دیگر وجود ندارد. شاید وجود این حفره‌های غیر طبیعی باعث کاهش غیر همگن چگالی فوم و افت مقاومت آن در برابر چین خوردگی لوله برنجی شده باشد، ولی در نمونه L1.5 که چگالی آن نسبت به نمونه L1 کاهش یافته است، به علت عدم وجود تهی حفرهای غیر طبیعی، مقاومت آن به چین خوردگی و کمانش پلاستیک پیشرونده زیاد و لذا مقدار انرژی جذب نیز افزایش یافته است. حال اگر بتوان این الگوی تخلخل سلولی فوم‌ها را به مقادیر کمّی تبدیل نمود، شاید بتوان اثر ساختار تخلخل را بر مقدار جذب انرژی، علاوه بر چگالی فوم، نیز مشخص نمود. در پژوهش حاضر این کار به کمک نرم افزار تحلیل تصویری Clemex انجام شده است. نتایج این تحلیل تصویری در راستای طولی نمونه‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. برای تعیین میزان همگن بودن ساختار تخلخل فوم به این صورت عمل شد. ابتدا بازه‌هایی از اندازه سلولی در حوزه کاری فوم‌های سلول بسته (یعنی جاذب‌های انرژی) از مرجع [۱] انتخاب شد. کم‌ترین مقدار اندازه سلولی ۰/۱ میلی‌متر و بیش‌ترین ۵ میلی‌متر برای فوم سلول بسته انتخاب شد. سپس مقادیر قطر متوسط سلولی زیر حد کمینه و بالای حد بیشینه از نتایج تحلیل تصویری حذف می‌شود و مقادیر بیش‌تر از حد بیشینه به عنوان تهی حفره در نظر گرفته می‌شود. سپس اندازه قطر متوسط سلول‌ها با اقتباس گیری از استاندارد ASTM-E11 با ضریب $\sqrt{2}$ بصورت متوالی بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شوند تا به حداکثر قطر حفره موجود در ساختار فوم برسد. سپس در هرکدام از این بازه‌ها، تعداد سلول‌ها و به دنبال آن مساحت آن‌ها محاسبه می‌شود. پس از آن مجموع مساحت تخلخل‌ها تقسیم بر مساحت سطح نمونه (A_0=دایره داخلی لوله برنجی) $\sum Ai/A_0$ در هر بازه محاسبه و نمودار تجمعی آن مطابق شکل (۱۵) رسم می‌شود. لازم به ذکر است که آخرین نقطهٔ

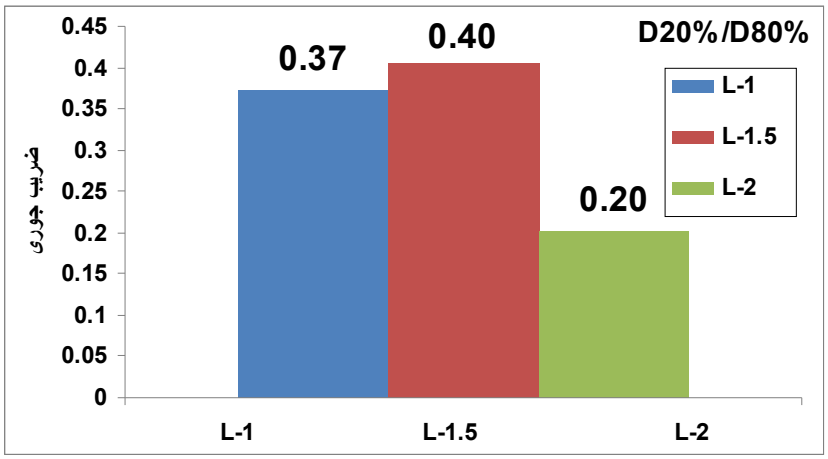
[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

جدول ۴- خلاصه اطلاعات تحلیل تصویری فوم A356-10vol.%SiC (داده‌ها بر حسب میلی‌متر است)

نام نمونه	تعداد سلول‌ها	انحراف معیار مساحت	مساحت متوسط سلول‌ها	متوسط قطر سلول‌ها	متوسط محیط سلول‌ها	کرویت سلول‌ها
L-1	۳۶۱	۱۴/۷۲	۱/۸۲	۱/۴۹	۴/۴۷	۰/۸
L-1.5	۶۰۶	۱/۷۶	۰/۸۶	۱/۰۳	۲/۹۱	۰/۸۷
L-2	۵۳۹	۴/۹۶	۱/۰۷	۱/۰۴	۳/۰۹	۰/۷۹



شکل ۱۵- نمودار درصد تخلخل سطحی فوم بر حسب قطر متوسط سلول‌ها که هر بازه قطر $\sqrt{2}$ برابر بعدی است



شکل ۱۶- مقایسه ضریب جوری ساختار سلولی فوم‌های مصرفی در نمونه L1، L1.5 و L2 که رفتار آن مشابه شکل (۱۲) است.

نمودار، درصد تخلخل سطحی را نیز نشان می‌دهد. شکل (۱۵) نمودار درصد تخلخل سطحی فوم بر حسب قطر متوسط سلول‌ها را نشان می‌دهد. در محور افقی این نمودار هر عدد، به مقدار $\sqrt{2}$ برابر با عدد بعدی تفاوت دارد. سپس با تعیین اندازه قطر متوسط سلولی در ۲۰٪ و ۸۰٪، کسر مساحت سطح از محور عمودی نمودار شکل (۱۵) و تقسیم نمودن قطر متناظر آن‌ها بر هم (یعنی نسبت d_{20}/d_{80})، ضریبی به دست می‌آید که نسبتی از تفاوت اندازه سلول‌ها را به نام "ضریب جوری" بیان می‌کند. هر چه این ضریب به صفر نزدیک‌تر (یا از ۱ دورتر) باشد نمایانگر بازه بزرگ‌تری از اندازه قطر سلولی و بر عکس هرچه به ۱ نزدیک باشد نشان دهنده اندازه بازه کوچک‌تری از اندازه سلولی (سلول‌های با اندازه نزدیک به هم و یک جور)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

وساختار فوم همگن‌تر است. مقایسهٔ ضریب جوری برای سه نمونه L1، L1.5 و L2 در شکل (۱۶) ارائه شده است. دیده می‌شود که این پارامتر بسیار واضح اثر غیرهمگنی ساختار سلولی را در در بین سه نمونه مذکور تفکیک می‌کند. حال برای به دست آوردن پارامتری که ساختار فوم ایده آل را با مقادیر کمّی توصیف کند، از مراحل مختلف رشد، توسعه و فرو ریختن ساختار فوم مذاب در شکل (۲) استفاده شد. به طوری که پارامتری تعیین شود که کم‌ترین چگالی و بیش‌ترین حد رشد ایده آل و همگن سلول‌ها را (مرحله ۶ شکل۲) را ارائه دهد. به نظر می‌رسد پارامتر ضریب جوری به عنوان اولین قدم از پژوهش حاضر برای توصیف کمّی ساختار سلولی همگن مناسب باشد. حال به کمک پارامتر ساختاری ضریب جوری می‌توان الگوی کمانش پیشرونده لوله‌های برنجی پرشده با فوم را در کنار تغییرات چگالی فوم مصرفی به خوبی تحلیل نمود. در نمونه L2 به علت وجود تهی حفره‌های غیر طبیعی در میان زمینه متخلخل طبیعی فوم باعث ایجاد یک ساختار سلولی غیر همگن شده است که علی‌رغم کاهش فوم به علت عدم مقاومت همگن آن در برابر چین خوردگی لوله توانسته است مقدار انرژی جذب را کاهش دهد و ضریب جوری به خوبی این کاهش مقاومت را با مقدار عددی خود در مقایسه با سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد. به عبارت ساده‌تر غیرهمگنی ساختار سلولی فوم‌های سلول بسته توسط پارامتر ساختاری ضریب جوری به صورت کمّی در آمده است. از طرفی روند تغییرات مقادیر ضریب جوری (افزایش یا کاهش) از تغییرات مقادیر انرژی جذب تبعیت می‌کند. لذا این ضریب می‌تواند مدل ریاضی مناسبی برای مدل‌سازی میزان جذب انرژی لوله‌های برنجی پرشده با فوم فلزی با چگالی‌های متفاوت باشد. بنابراین به نظر می‌رسد هدف اصلی این پژوهش که اثر ساختار فوم و چگالی فوم بر الگوی کمانش پلاستیک پیشرونده قوطی‌های برنجی Cu-Zn30wt.%، پرشده از فوم A356-10vol.%SiC تحت بارگذاری فشاری تک محوری و شبه استاتیکی است، محقق شده است. به عبارت ساده‌تر، اگر ضریب جوری در مقدار انرژی جذب ضرب شود، صحت همگنی ساختار سلولی و عدم دخالت تهی حفره‌ها در کاهش کاذب چگالی را به خوبی، به صورت مقادیر عددی قابل مقایسه، مشخص می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر که حاصل بارگذاری فشاری تک-محوری روی لوله‌های برنجی Cu-Zn30wt.%، پرشده از فوم آلیاژ آلومینیمی کامپوزیتی A356-10vol.%SiC است نشان داد که:

۱- با قراردادن فوم A356-10vol.%SiC در لوله‌های برنجی، الگوی کمانش پلاستیک یا چین خوردگی بصوت دایره‌های حلقوی در جداره لوله تولید می‌شود، اما در لوله برنجی توخالی الگوی چین خوردگی لوله بصورت مثلثی معروف به الماسی ظاهر می‌شود. به طوری‌که این تفاوت کاملا مشهود در الگوی کمانش پلاستیک، افزایش حدود ۳۵-۴۲٪ درصدی جذب انرژی را، بسته به چگالی فوم مصرفی، نسبت به لوله توخالی به همراه خواهد داشت.

۲- عوامل اصلی در مقدار کمّی جذب انرژی کمانش پلاستیک پیشرونده شبه استاتیکی لوله برنجی حاوی فوم فلزی A356-10vol.%SiC چگالی فوم و نوع ساختار سلولی فوم (همگنی حفرها) است. نیروی چسبندگی بین فوم و دیواره داخلی لوله برنجی بر رفتار کمانش پلاستیک پیشرونده اثری ندارد، زیرا اثر آن حدود ۲ درصد انرژی کل سازه جاذب انرژی است.

۳- تنوع ساختار سلولی فوم توسط پارامترضریب جوری که درپژوهش حاضر بر اساس تحلیل تصویری مقطع طولی و عرضی فوم توسعه داده شد، می‌تواند به خوبی الگوی کمانش پلاستیک پیشرونده قوطی‌های برنجی پر شده از فوم را پیش‌بینی نماید.

۴- پارامتر ضریب جوری توسعه داده شده حاضر با مقایر کمّی خود که بین یک و صفر است، می‌تواند مقادیر جذب انرژی طی تغییر فرم پلاستیک لوله‌های حاوی فوم فلزی را به خوبی مدل‌سازی نماید و اثر تهی حفره‌های بزرگ که منجر به ناهمگونی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

چین خوردگی لوله‌ها می‌شود را تفکیک و آشکار سازد. ضریب جوری نزدیک به یک، رفتار کمانش پیشرونده و نحوه چین خوردگی کاملا همگنی را از خود نشان خواهند داد.

۵- نتایج کمّی در بارگذاری فشاری تک محوره وشبه استاتیکی، لوله‌های برنجی Cu-Zn30wt.% پر شده با فوم فلزی A356-10vol.%SiC نشان می‌دهد که با کاهش چگالی فوم مذکور، به ترتیب از۰/۹۳ به۰/۸۸ و ۰/۴۳گرم بر سانتی‌متر مکعب، میزان جذب انرژی قوطی‌های برنجی پرشده با فوم مذکور، به ترتیب از۱۲۹۵۵.به ۱۳۴۶۵ و ۱۱۱۹۲ ژول تغییر می‌یابد که نشان دهنده جذب انرژی بالاتر نمونه فوم حاوی ۱/۵ درصد TiH_2 با چگالی ۰/۸۸ است. هم‌چنین ضریب جوری این فوم نسبت به بقیه نمونه‌ها به عدد یک نزدیک‌تر است.

۶- نتایج نشان می‌دهد که در نمونه فومی با چگالی ۰/۴۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، کاهش چگالی ناشی از وجود چند تهی حفره بزرگ، باعث غیرهمگنی ساختارفوم می‌شود و به علت اثر مخرب خود، جذب انرژی کل سازه را کاهش می‌دهد و نیز چین خوردگی حلقوی را نامتقارن می‌نماید. بنابراین نمونه‌هایی که دارای ساختار سلولی همگن‌تراند (ضریب جوری نزدیک‌تر به واحد)، دارای الگوی کمانش و چین خوردگی همگن‌تری نیز خواهند بود که جذب انرژی بالاتری را نیز به همراه خواهند داشت.

مراجع

1. Ashby, M.F., Evans, T., Fleck, N.A., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G. and Gibson, L.J., *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann, 2000.
2. Dukhan, N., *Metal foam: Fundamental and Application*, ADES Tech Publication, 2013.
3. Teng, J.G., Rotter, J.M., *Buckling Of Thin Metal Shells*, Spon Press, Washington, 2001.
4. Bloom, F., *Handbook of Thin Plate Buckling and Post-Buckling*, Chapman and Hall-CRC, 2000.
5. خواجه علی، م.، " بررسی اثر آهن بر رفتار جذب انرژی جاذب‌های انرژی فوم‌های فلزی سلول بسته"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۹.
6. Alavi Nia, A., Haddad Hamedani, J., "Comparative Analysis of Energy Absorption and Deformations of Thin Walled Tubes with Various Section Geometries", *Thin-Walled Structures,* Vol. 48(12), pp. 946-954, 2010.
7. Gibson, L.J., Ashby, M.F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
8. Jones, N., *Structural Impact*, Cambridge University Press, 1989.
9. Jones, N., Abramowicz, W., "Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes", *Impact Engineering*, Vol. 2, pp. 263-281, 1984.
10. Yu, T.X. and Zhang, X.W., "Energy Absorption of Pressurized Thin-Walled Circular Tubes under Axial Crushing", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 51, pp. 335-349, 2009.
11. Huh, H. and Zhang, X., "Energy Absorption of Longitudinally Grooved Square Tubes under Axial Compression", *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, pp. 1469-1477, 2009.
12. Gotoh, M., Yamashita, M. and Sawairi, Y., "Axial Crush of Hollow Cylindrical Structures with Various Polygonal Cross-Sections: Numerical Simulation and Experiment", *Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 59–64, 2003.
13. Rammerstorfer, F.G., Seitzberger, M., Gradinger, R., Degischer, H.P., Blaimschein, M. and Walch, C., "Experimental Studies on the Quasi-Static Axial Crushing of Steel Columns Filled with Aluminium Foam" *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, pp. 4125-4147, 2000.
14. Tamura, K., Nakazawa, Y. and Yoshida, M., "Development of Crash-Box for Passenger Car with High Capability for Energy Absorption", 8th *International Conference on Computational Plasticity*, Barcelona, pp. 123-138, 2005.
15. Langseth, M., Hanssen, A.G. and Hopperstad, O.S., "Optimum Design for Energy Absorption of Square Aluminium Columns with Aluminium Foam Filler", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 153-176, 2001.
16. Zarei, H.R. and Kroger, M., "Optimization of the Foam-Filled Aluminum Tubes for Crush Box Application", *Thin Walled Structures*, Vol. 46, pp. 214–221, 2008.
17. Solórzano, E., Reglero, J.A., Rodríguez-Pérez, M.A., Saja, J.A. and Porras, E., "Design and Testing of an Energy Absorber Prototype based on Aluminium

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]

Foams", *Materials & Design*, Vol. 31, pp. 3568-3573, 2010.
18. Thambiratnam, D.P. and Ahmad, Z., "Crushing Response of Foam-Filled Conical Tubes under Quasi-Static Axial Loading", *Materials & Design*, Vol. 30, pp. 2393–2403, 2009.
19. Vendra, L.J. and Rabiei, A., "A Comparison of Composite Metal Foam's Properties and Other Comparable Metal Foams", *Materials Letters*, Vol. 63, pp. 533–536, 2009.
۲۰. طباطبائیان، ی، "بررسی ساختار سلولی فوم‌های فلزی و مدل‌سازی آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۷.
21. Akiyama, S. et al., *European Patent*, 0210803, 1986.
22. Stanzick, H., Wichmann, M., Weise, J., Helfen, L., Baumbach, T. and Banhart, J., "Process Control in Aluminum Foam Using Real-Time X-ray Radioscopy", *Advanced Engineering Materials,* Vol. 4(10), pp. 814-823, 2002.
23. Banhart, J., Stanzick, H., Helfen, L. and Baumbach, T., "Metal Foam Evolution Studied by Synchrotron Radioscopy", *Applied Physics Letters*, Vol. 78(8), pp. 1152-1154, 2001.
24. Ip, S.W., Wang, Y. and Toguri, J.M., "Aluminum Foam Stabilization by Solid Particles, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 38, pp. 81-92, 1999.
۲۵. دانشمند، م، "ساخت هسته فوم آلومینیمی و مدل‌سازی تغییر فرم لوله‌های پرشده توسط هسته فومی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بهمن ۱۳۸۹.
26. Matijasevic-Lux, B., Banhart, J., Fiechter, S., Gorke, O. and Wanderka, N., "Modification of Titanium Hydride for Improved Aluminum Foam Manufacture", *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 1887-1900, 2006.
27. Akhlaghi, F., Lajevardi, A. and Maghanaki, H.M., "Effects of Casting Temperature on the Microstructure and Wear Resistance of Compo-Cast A356/SiCp Composites: A Comparison between SS and SL Routes", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 155–156, pp. 1874–1880, 2004.
28. Rajendran, R., Prem Sai, K., Chandrasekar, B., Gokhale, A. and Basu, S., "Impact Energy Absorption of Aluminum Foam Fitted AISI 304L Stainless Steel Tube", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 1777–1784, 2009.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.9.9]