

## اثر ساختار، چگالی و ارتفاع بر روی خواص مکانیکی فوم فلزی سلول بسته

جمال زمانی<sup>۱\*</sup>، احسان یآوری<sup>۲</sup> و میثم غیاثوند<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۱۱)

### چکیده

در این تحقیق نسل جدیدی از فوم‌های فلزی کامپوزیتی به‌عنوان ماده جاذب انرژی معرفی می‌شود. فوم فلزی کامپوزیتی به‌روش ریخته‌گری آلومینیوم اطراف کره‌های توخالی سرامیکی ساخته شده است. خواص مکانیکی توسط آزمون فشار تک محوری مورد ارزیابی قرار گرفت. تأثیر ساختار، تغییرات چگالی و اندازه نمونه روی خواص مکانیکی مطالعه شد و مشخص گردید که ساختار، تغییرات چگالی و اندازه نمونه روی خواص مکانیکی تأثیر به‌سزایی دارند. با افزایش چگالی، تنش پایا افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش اندازه نمونه، تنش پایا کاهش می‌یابد. نتایج تنش تسلیم با روابط تجربی ارائه شده تطابق خوبی دارند.

**واژه‌های کلیدی:** فوم فلزی، کره‌های توخالی سرامیکی، تنش پایا، جذب انرژی

## The Effect of Arrangement, Density and Sample Size on Mechanical Properties of Closed Cell Metal Foam

J. Zamani, E. Yavari and M. Ghiasvand

Mechanical Engineering Department

K.N. Toosi University Of Technology

(Received: 02/November/2013; Accepted: 21/April/2014)

### ABSTRACT

In this study a new group of metal composite foam was demonstrated as absorption material. Closed cell metal foam was produced by casting around ceramic hollow spheres and mechanical properties were verified by uni-axial compressive test. The effect of random and ordered arrangement, density variation and sample size on mechanical properties were studied and indicated that arrangement and density significantly affect on mechanical properties and by increase density, plateau stress increased and sample size affects on plateau stress. Results of yield stresses have relatively good match by experimental formula.

**Keyword:** Metal Foam, Ceramic Hollow Sphere, Stress Plateau, Absorption Energy

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): zamani@kntu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: ehsanyavari@hotmail.com

۳- کارشناس ارشد

## ۱- مقدمه

شکست ساختار مکعبی ساده (SC) با ستاره مشخص گردیده است.  $\rho_s$  و  $\sigma_{ys}$  به ترتیب تنش شکست و چگالی نمونه فلزی فاقد حفره است.

مساحت زیر منحنی تنش کرنش برابر مقدار جذب انرژی بر واحد حجم فوم است. بهینه بودن این پارامتر موجب کاهش حجم سازه و هزینه ساخت جاذب انرژی می‌شود.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق فوم فلزی با ریخته‌گری آلومینیوم اطراف کره‌های توخالی ساخته شد. کره‌های توخالی از جنس پودر نسوز شاموت و چسب سیلیکات سدیم، با ایجاد یک لایه سرامیکی بر روی دانه‌های پلی‌استایرن ساخته شده است. گلوله‌ها پس از خشک شدن دوغاب سرامیکی برای افزایش استحکام و خروج دانه‌های پلی‌استایرن درون کوره قرار می‌گیرند. با خشک شدن پوسته سرامیکی ابتدا ژل اسید سیلیسیک تولید شده و سیلیس از ژل حاوی یون‌های سدیم رسوب می‌کند. با افزایش دما سیلیس به صورت رشته‌ای در آمده و ذرات نسوز را به هم پیوند می‌دهد. در مرحله بعد کره‌های توخالی سرامیکی بر روی شبکه فولادی که از قبل تهیه شده و در قالب قرار گرفته و منظم شده، قرار گرفته و در مرحله آخر ریخته‌گری انجام می‌شود. آلیاژ مورد استفاده آلومینیوم A356 بوده که مهمترین عناصر آلیاژی آن سیلیسیوم و منیزیم می‌باشد. دمای ذوب این محلول ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد بوده و برای نفوذ بهتر قالب پیش‌گرم می‌شود.

## ۲-۱- چیدمان کره‌های سرامیکی

در این مرحله جهت ایجاد فضای خالی درون فلز، کره‌های سرامیکی توخالی ایجاد می‌شود که جداره این کره‌ها دارای ضخامتی حدود ۰/۳ میلی‌متر است.

جهت بررسی اثر آرایش کره‌ها در پر شدن قالب دو چیدمان مختلف کره‌ها استفاده شد. در یکی کره‌ها روی هم قرار گرفته که با توجه به شکل قرار گرفتن اتم‌ها در شبکه ماده به نام‌های مکعبی ساده (simple cubic یا به‌طور مخفف SC) نام نهاده و در حالت دوم کره‌های ردیف دوم در حفره‌های ردیف اول قرار گرفته و به این آرایش مکعبی مرکز پر یا (body center cubic) و به صورت مخفف (BCC) گویند. شکل ۱ چند نمونه ساخته‌شده را قبل و بعد از ماشین‌کاری و شکل ۲ این دو نوع آرایش را نشان می‌دهد. به‌منظور تعیین آرایش دلخواه کره‌های سرامیکی دو مشخصه

فوم‌های فلزی به‌عنوان موادی جاذب انرژی اخیراً مطرح بوده و در سازه‌هایی مانند اتومبیل و صنعت هوافضا کاربرد پیدا کرده‌اند [۱]. این مواد به‌دلیل منطقه تنش پایای وسیع، جذب انرژی زیادی داشته و از مهم‌ترین موضوعات در جذب انرژی مواد، انتخاب تنش پایای مشخص در کاربردهای جاذب انرژی می‌باشد [۳-۱]. در آزمون فشار، نمودار تنش-کرنش فوم‌های فلزی شامل ۳ مرحله است: ۱- منطقه الاستیک خطی ۲- منطقه فروپاشی پلاستیک که در آن تنش پایا تقریباً ثابت است ۳- منطقه کرنش-چگالش که در این مرحله فوم فلزی کاملاً فشرده شده و منافذ توخالی از بین رفته و تنش افزایش ناگهانی پیدا می‌کند. در منطقه دوم، فوم در تنش پایا دچار کرنش پلاستیک زیادی می‌شود، به این معنی که مقدار زیادی از انرژی بدون افزایش تنش تا مرحله بحرانی می‌تواند جذب شود [۲]. تنش پایا در این مواد از پارامترهای مختلفی مانند تغییر چگالی، تغییر ضخامت دیواره و اندازه حفره‌ها تأثیر می‌پذیرد [۱۰-۴]. محققین خواص جذب انرژی فوم‌های مختلف را در آزمون فشار شبه استاتیک و ضربه بررسی کرده‌اند [۱۱-۱۳]. یکی از پارامترهای قابل تغییر در فوم‌های فلزی نظم حفره‌ها است که در این تحقیق روش جدیدی برای کنترل نظم ارائه شده است. نمونه‌های فوم فلزی کامپوزیتی به‌روش ریخته‌گری آلومینیوم اطراف کره‌های توخالی ساخته شده است. نتایج آزمون فشار عمدتاً شامل منحنی‌های تنش کرنش است زیرا همان‌طور که قبلاً گفته شد مهم‌ترین مشخصه‌های فوم آلومینیومی که در جذب انرژی مؤثرند از این آزمایش به‌دست می‌آید. این مشخصه‌ها شامل تنش پایا  $\sigma_p$  و مقدار کرنش چگالش فوم  $\epsilon_D$  هستند. در این تحقیق ابتدا فوم کامپوزیتی با ساختار منظم ساخته شده سپس با استفاده از آزمون فشار اثر تغییر آرایش، نظم کره‌های توخالی، تغییر چگالی و ارتفاع نمونه آزمون بر روی خواص مکانیکی بررسی گردیده است.

گیبسون<sup>۱</sup> و همکاران روابط تجربی (۱ و ۲) را به ترتیب برای پیش‌بینی تنش پایا ساختار مکعبی ساده (SC) و تنش پایا فوم فلزی ارائه داده‌اند [۱۴-۱۵].

$$\sigma_y^*/\sigma_{ys} = 0.65(\rho^*/\rho_s)^{1.36} \quad (1)$$

$$\sigma_{pl} \approx (0.25 \text{ to } 0.35)\sigma_{y,s} \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^m \quad (2)$$

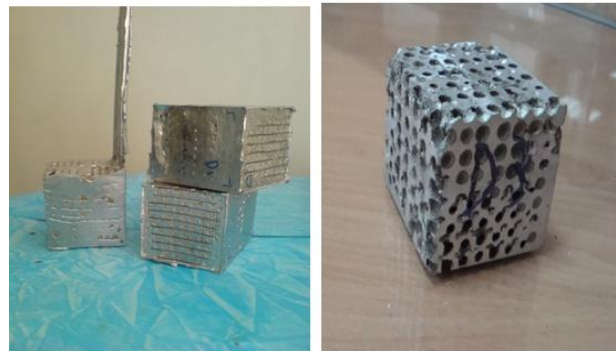
که در آن ضریب m برابر ۱/۶ در نظر گرفته شده و چگالی و تنش

اندازه و فاصله حفره‌های شبکه فولادی و مکان قرار گرفتن هر لایه نسبت به لایه قبل تغییر داده شده است. جهت بررسی اثر آرایش بر روی پر شدن قالب از دو آرایش BCC و SC و کره‌های توخالی با قطر ۵/۵ میلی‌متر و به فاصله ۱ میلی‌متر که هر لایه بر روی لایه زیرین قرار گرفته، استفاده شد.

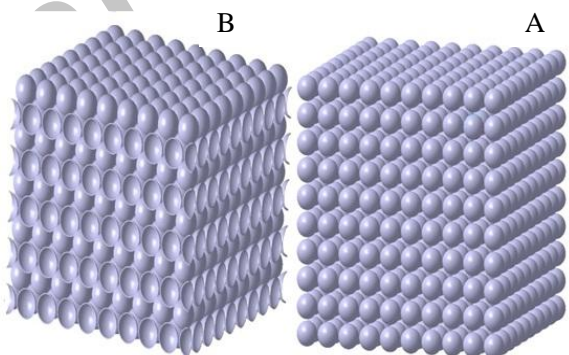
اندازه و فاصله حفره‌های شبکه فولادی و مکان قرار گرفتن هر لایه نسبت به لایه قبل تغییر داده شده است. جهت بررسی اثر آرایش بر روی پر شدن قالب از دو آرایش BCC و SC و کره‌های توخالی با قطر ۵/۵ میلی‌متر و به فاصله ۱ میلی‌متر که هر لایه بر روی لایه زیرین قرار گرفته، استفاده شد.



شکل (۳): دستگاه آزمون فشار بتن مورد استفاده جهت آزمایش نمونه‌ها



شکل (۱): نمونه‌های ساخته شده (قبل و بعد از ماشین کاری)



شکل (۲): نمایش دو نوع آرایش کره‌های تو خالی: A کره‌های تو خالی بر روی هم قرار گرفته‌اند به اختصار SC نامیده می‌شود و شکل B هر کره تو خالی در حفره تشکیل شده از چهار کره پایینی قرار می‌گیرد که به اختصار BCC نامیده می‌شود.

ابعاد سطح نمونه‌های ماشین کاری شده برابر  $40 \times 50 \text{ mm}$  و ارتفاع آنها برابر ۳۰، ۴۰ و ۴۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. قطر کره‌های توخالی بیشینه ۵ میلی‌متر بوده و برای جلوگیری از تأثیر اثر اندازه باید کمترین بعد نمونه ۷ برابر بزرگ‌تر از میانگین اندازه سلول‌های تو خالی در نظر گرفته شود.

به منظور بررسی خواص مکانیکی فوم‌های فلزی ساخته شده، از آزمون فشار استفاده شده است. دستگاه آزمون فشار مورد استفاده، دستگاه آزمون فشار بتن، مدل D از شرکت W+B

### ۳- نتایج و بحث

برای بحث و بررسی پیرامون نمونه‌های ساخته شده، ۳ اثر ساختار، چگالی و ارتفاع به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرند.

#### ۳-۱- اثر ساختار

در مواد جاذب انرژی، تنش به نام تنش پایا تعریف می‌شود و طبق این تعریف تنش ثابتی است که در آن نمونه کرنش زیادی داشته باشد و در نمونه‌های BCC این تنش به خوبی مشخص است ولی در نمونه‌های با ساختار SC تنش ثابتی وجود نداشته و فاقد تنش پایا است. تنش پایا در طراحی سازه‌های جاذب انرژی از مهم‌ترین پارامترها می‌باشد که در آن طراح مطمئن است که نمونه مورد استفاده در حدود تنش پایا تسلیم شده و به صورت تقریب و با اختلاف کم با این تنش، کرنش زیادی خواهد داشت که در نتیجه جذب انرژی زیاد خواهد بود. در نمونه‌های با ساختار SC این تنش به خوبی مشخص نیست و مقدار تنش بعد از تسلیم افت زیادی دارد که کاربرد این نمونه‌ها را به عنوان ماده جاذب انرژی مشکل می‌کند. با توجه به نمودار تنش کرنش شکل (۴B)،

اگر چگالی فوم با ساختار SC در فرمول (۱) که برای تنش شکست این ساختار ارائه شده است قرار داده شود، آنگاه:

$$\sigma_{y^*} / \sigma_{ys} = [(0.65(\rho^* / \rho_s))]^{1.36}$$

$$\sigma_{y^*} = 250 \times 0.65 \times (1.6/2.7)^{1.36} = 79.7 \text{ MPa}$$

همان طور که مشاهده می شود نتایج عملی با فرمول ارائه شده تطابق خوبی دارد.

با توجه به شکل ۴ فوم با ساختار BCC نیز دارای تنش پایا و شکست ۴۲ مگاپاسکال است.

اگر چگالی فوم با ساختار BCC در فرمول ۲ که برای تنش پایا این ساختار ارائه شده است قرار داده شود، آنگاه:

$$\sigma_{pl} \approx (0.25 \text{ to } 0.35) \sigma_{y,s} (\rho / \rho_s)^m$$

$$\sigma_{pl} \approx (0.25 \text{ to } 0.35) \times 250 \times (1.6/2.7)^{1.6} = 27.6 \text{ to } 38.6$$

### ۳-۲ اثر چگالی

در شکل ۵ نمودار تنش- کرنش برای فوم با سه چگالی مختلف ۲، ۱/۶ و ۱/۴ گرم بر سانتی متر مربع نشان داده شده است. همان طور که از شکل ۵ مشخص است در نمونه های ساخته شده این تحقیق، چگالی تأثیر بسیار زیادی روی تنش شکست و تنش پایا دارد. با افزایش چگالی، تنش شکست و پایا افزایش زیادی می یابند.

همان طور که انتظار می رفت کرنش نهایی با افزایش چگالی کاهش یافته است. البته در فوم با چگالی ۱/۶ این کاهش کرنش کمتر دیده شده است؛ زیرا در آزمون فشار فوم از کناره های نمونه نیز تغییر ابعاد داده و بزرگ تر شده است اما با تغییر زیاد چگالی این کاهش کرنش نهایی مشهود است.

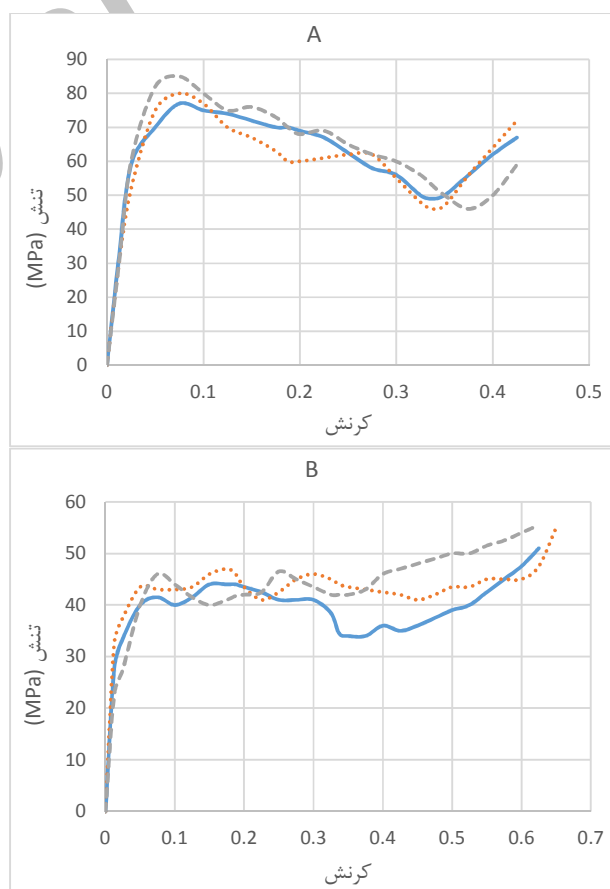
نتایج مربوط به آزمایش نمونه ها با چگالی مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱): تنش پایا و کرنش نهایی نمونه ها با چگالی های مختلف

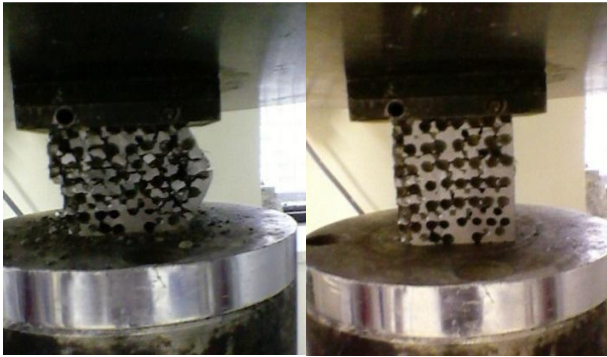
	$\rho$ (g/cm <sup>2</sup> )	$\rho/\rho_0$	$\sigma_{pl}$ (MPa)	$\sigma_{pl}/\sigma_0$
۱	۱/۴	۰/۵۲	۲۰-۱۵	۰/۱
۲	۱/۶	۰/۶	۴۵-۴۰	۰/۱۸
۳	۲	۰/۷۴	۱۰۰-۹۵	۰/۴

در نمونه های BCC کرنش قبل از فروپاشی تا مقدار ۰/۶ و در نمونه SC با توجه به نمودار شکل (۴A) کرنش تا مقدار ۰/۴۵ انجام شده است که معمولاً برای مواد جاذب انرژی کرنش کمی است. در هر دو نمونه جذب انرژی تا کرنش قبل از فروپاشی کامل یعنی ۰/۴ برای ساختار SC و ۰/۶ برای ساختار BCC نسبتاً یکسان و  $24 \text{ MJ/m}^3$  می باشد، که با توجه به مقدار جذب انرژی سایر فوم های صنعتی و پژوهشی ساخته شده این نمونه جزء مواد با جذب انرژی بسیار بالا قرار گرفته است [۱۶]. شباهت زیاد نمودارهای به دست آمده در آزمایش های مختلف می تواند ناشی از نظم نسبی موجود در حفره های فوم باشد، و یکی از دلایل اختلاف بین نمودارها از یک نوع آرایش انحراف از نظم پیش بینی شده در اثر جابه جایی کره ها در حین ریخته گری است.

با توجه به شکل ۴ می توان نتیجه گرفت که فوم با ساختار SC فاقد تنش پایا است و تنش شکست آن حدود ۶۰ تا ۸۰ مگاپاسکال است.

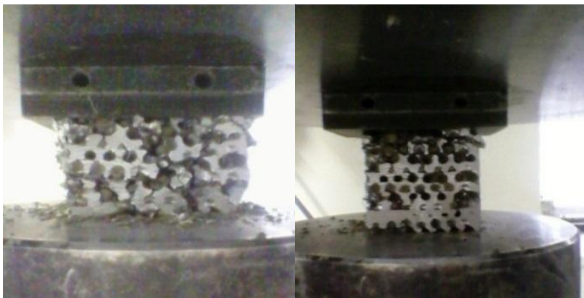


شکل (۴): نمودار تنش کرنش آزمون فشار برای دو نوع A: آرایش کره ها مکعبی ساده یا SC، B: آرایش کره ها مکعبی مرکز پر یا BCC.

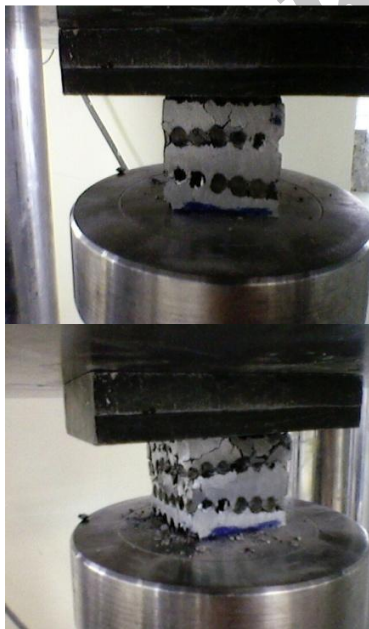


شکل (۶): نمونه‌ای با نسبت ارتفاع به عرض ۱/۳ پس از بارگذاری.

در نمونه‌های با ارتفاع برابر ۱ و ۰/۹ عرض، فشردگی دیواره بیرونی با شکستگی کمتری همراه است که شکل‌های ۷ و ۸ این نمونه‌ها را قبل و بعد از فشردگی نشان می‌دهد.



شکل (۷): نمونه‌ای با نسبت ارتفاع به عرض ۱ پس از بارگذاری.



شکل (۸): نمونه‌ای با نسبت ارتفاع به عرض ۰/۹ پس از بارگذاری.

اگر اعداد مربوط به فوم با چگالی مختلف از جدول ۱ در رابطه (۲) جایگذاری شوند، تنش پایا ( $\sigma_{pl}$ ) برای هر چگالی به صورت زیر به دست می‌آید:

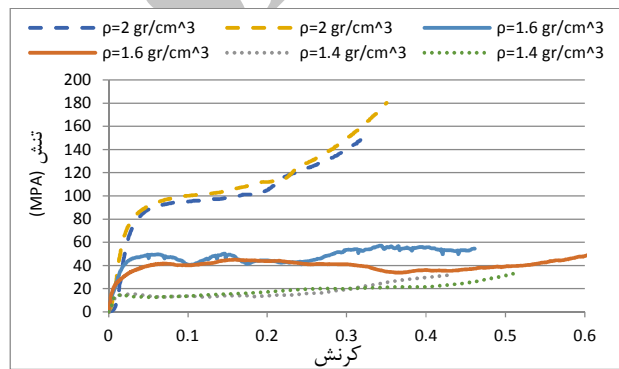
$$\rho=1.4 \quad \Rightarrow \quad \sigma_{pl} = (0.25 \text{ to } 0.35)250 (0.52)^{1.6} = 21.9 \text{ to } 30$$

$$\rho=1.6 \quad \Rightarrow \quad \sigma_{pl} = (0.25 \text{ to } 0.35)250 (0.60)^{1.6} = 27.6 \text{ to } 38.6$$

$$\rho=2 \quad \Rightarrow \quad \sigma_{pl} = (0.25 \text{ to } 0.35)250 (0.74)^{1.6} = 38.6 \text{ to } 54$$

با توجه به نتایج به دست آمده تنش پایای فوم با چگالی ۱/۴ و ۱/۶ در بازه فرمول‌های ارائه شده قرار دارند.

اما تنش پایای فوم با چگالی ۱/۴ اختلاف زیادی با تنش پیش‌بینی شده دارد.



شکل (۵): تأثیر چگالی روی تنش شکست و تنش پایا

### ۳-۳ اثر ارتفاع

برای طراحی و محاسبه ابعادی سازه‌های فومی مقاوم و یا محافظت کننده در برابر ضربه دانستن شروع و نحوه شکست دیواره سلول‌ها هنگام فشردگی ضروری است. در این مطالعه تأثیر نسبت پارامترهای ارتفاع و عرض نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام این آزمایش نمونه‌های آزمون فشار در مقادیر H/L مختلف بررسی شد، H ارتفاع نمونه و L طول و عرض نمونه است. نمونه‌ها در مقادیر H/L برابر با ۰/۸، ۰/۹، ۱ و ۱/۳ آزمایش شدند. نتایج آزمون فشار نشان می‌دهد در نمونه‌هایی که ارتفاع نمونه ۱/۳ عرض آنها است شروع شکست از وسط نمونه و قسمتی که خمش در شرف وقوع است اتفاق می‌افتد. در این حالت دیواره از یک طرف دچار شکست شده و اثر بشکتهای شدن دیده می‌شود این پدیده در شکل ۶ نشان داده شده است. اگر از روانکاری بین نمونه و فک استفاده شود این اثر و شکست دیواره کمتر تأثیر گذار است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- فوم با ساختار sc دارای تنش شکست  $80 \text{ MPa}$  است. طبق پیش‌بینی این ساختار فاقد تنش پایا بوده و مقدار تنش شکست آن با رابطه تجربی ارائه‌شده توسط گیسون تطابق بسیار خوبی دارد. مقدار جذب انرژی در این نوع فوم برابر  $24 \text{ MJ/m}^3$  بر واحد حجم بوده و مقدار جذب انرژی الاستیک آن برابر  $4 \text{ MJ/m}^3$  بر واحد حجم است.

۲- فوم با ساختار bcc با چگالی  $1/6$  گرم بر سانتی‌متر مکعب دارای تنش پایای  $40-45 \text{ MPa}$  و کرنش نهایی بالا و بسیار خوب است. در این ساختار جذب انرژی بر واحد حجم برابر  $24$  و مقدار جذب انرژی بر واحد حجم الاستیک آن برابر  $2 \text{ MJ/m}^3$  است.

۳- با توجه به برابر بودن مقدار جذب انرژی دو ساختار و کمتر بودن تنش شکست ساختار BCC این ساختار برای محافظت از تنش ناشی از ضربه مناسب‌تر است.

۴- فوم با ساختار تصادفی و چگالی  $1/4$  دارای تنش پایای  $15-18$  و کرنش  $0/4$  بود این فوم برای محافظت از سازه‌هایی که مقاومت‌شان در برابر ضربه کم است مناسب‌تر است زیرا تنشی که به سازه محافظت شده وارد می‌شود تقریباً برابر تنش پایای فوم فلزی است.

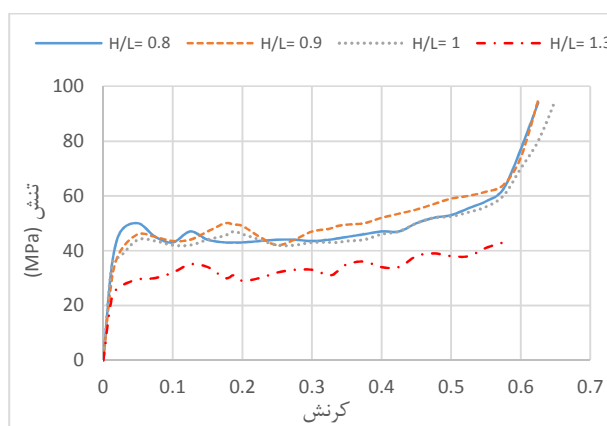
۶- مقایسه سه ساختار BCC و SC و تصادفی نشان می‌دهد که فوم با ساختار تصادفی با وجود کمتر بودن چگالی دارای کرنش نهایی کمتری است دلیل این امر پر نشدن مقدار بیشتری از سلول‌های توخالی در ساختار تصادفی در مقایسه با ساختار BCC است زیرا در ساختار منظم احتمال خرد شدن و پر شدن سلول‌ها تقریباً یکسان است و این کرنش نهایی در ساختار SC از همه کمتر است زیرا سلول‌ها درست زیر هم قرار دارند.

۷- با تغییر ارتفاع نمونه آزمون فشار مشاهده شد که اگر ارتفاع نمونه بیشتر از ۱ برابر عرض نمونه گردد تنش پایای فوم دچار افت می‌شود که دلیل این امر بیشتر شدن احتمال کمانش دیواره‌های خارجی نمونه است.

#### ۸- مراجع

- Banhart, J. "Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams", Progress in Materials Sci, Vol. 46, No. 6, pp. 559-632, 2001.
- Digischer, H. and Kriszt, B. "Handbook of Cellular Metal: Production", Processing, Application. 2002 Wiley-Vch.

نتایج آزمون فشار نشان می‌دهد در نمونه‌های با ارتفاع  $1/3$  عرض تنش پایا به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد دلیل این امر احتمالاً وجود کمانش در دیواره سلول‌های فوم است. شکل ۹ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های با  $H/L$  برابر  $1/3$ ،  $1$ ،  $0/9$  و  $0/8$  مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است در نمونه با ارتفاع زیاد علاوه بر کاهش تنش پایا، کرنش نهایی کمی کاهش یافته و به دلیل فروریزش دیواره‌ها آزمون فشار تا کرنش‌های بالا قابل انجام نیست.



شکل (۹): نمودار تنش-کرنش فوم با چهار ارتفاع  $1/3$ ،  $1$ ،  $0/9$  و  $0/8$  عرض نمونه.

یکی از عواملی که بر ارتفاع مجاز برای آزمون فشار و پایداری دیواره‌های بیرونی مؤثر است چگالی یا همان تخلخل است در شکل ۱۰ نمونه‌ای با چگالی  $2 \text{ gr/cm}^3$  و ارتفاع برابر  $0/9$  عرض بعد از کرنش نشان داده شده است همان‌طور که می‌بینید دیواره‌های بیرونی آسیب بسیار کمی دیده‌اند و نمونه انسجام و پیوستگی خود را کاملاً حفظ نموده است.



شکل (۱۰): نمونه‌ای با نسبت ارتفاع به عرض  $0/8$  پس از بارگذاری

10. Goodall, R., Marmottant, A., Salvo, L., and Mortensen, A. "Spherical Pore Replicated Microcellular Aluminium: Processing and Influence On Properties," *Materials Sci. and Eng.: A*, Vol. 465, No. 1, pp. 124-135, 2007.
11. Tan, P., Reid, S., Harrigan, J., Zou, Z., and Li, S. "Dynamic Compressive Strength Properties of Aluminium Foams. Part I—Experimental Data and Observations," *J. the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 53, No. 10, pp. 2174-2205, 2005.
12. Zhang, Y., Tang, Y., Zhou, G., Wei, J., and Han, F. "Dynamic Compression Properties of Porous Aluminum," *Materials Letters*, Vol. 56, No. 5, pp. 728-731, 2002.
13. Liu, J., Yu, S., Zhu, X., Wei, M., Luo, Y., and Liu, Y. "The Compressive Properties of Closed-Cell Zn-22Al foams," *Materials Letters*, Vol. 62, No. 4, pp. 683-685, 2008.
14. Sanders, W. and Gibson, L. "Mechanics of hollow Sphere Foams," *Materials Sci. and Eng.: A*, Vol. 347, No. 1, pp. 70-85, 2003.
15. Sanders, W. and Gibson, L. "Mechanics of BCC and FCC Hollow-Sphere Foams," *Materials Sci. and Eng.: A*, Vol. 352, No. 1, pp. 150-161, 2003.
16. Vendra, L.J. and Rabiei, A. "A study on Aluminum-Steel Composite Metal foam processed by Casting," *Materials Sci. and Eng.: A*, Vol. 465, No. 1, pp. 59-67, 2007.
3. Maiti, S., Gibson, L., and Ashby, M. "Deformation and Energy Absorption Diagrams for Cellular Solids," *Acta Metallurgica*, Vol. 32, No. 11, pp. 1963-1975, 1984.
4. Mu, Y., Yao, G., and Luo, H. "Anisotropic Damping Behavior of Closed-Cell Aluminum Foam," *Materials & Design*, Vol. 31, No. 1, pp. 610-612, 2010.
5. Yu, H., Guo, Z., Li, B., Yao, G., Luo, H., and Liu, Y. "Research into the Effect of Cell Diameter of Aluminum Foam on Its Compressive and Energy Absorption Properties," *Materials Sci. and Eng.: A*, Vol. 454, pp. 542-546, 2007.
6. Brothers, A.H. and Dunand, D.C. "Mechanical Properties of a Density-Graded Replicated Aluminum Foam," *Materials Sci. and Eng.: A*, Vol. 489, No. 1, pp. 439-443, 2008.
7. Gaillard, C., Despois, J.F., and Mortensen, A. "Processing of NaCl Powders of Controlled Size and Shape For the Microstructural Tailoring of Aluminium Foams," *Materials Sci. and Eng.: Vol. 374*, No. 1, pp. 250-262, 2004.
8. Tao, X., Zhang, L., and Zhao, Y. "Al matrix Syntactic Foam Fabricated With Bimodal Ceramic Microspheres," *Materials & Design*, Vol. 30, No. 7, pp. 2732-2736, 2009.
9. Campana, F. and Pilone, D. "Effect of wall Microstructure and Morphometric Parameters on the Crush Behaviour of Al Alloy Foams," *Materials Sci. and Eng.: A*, Vol. 479, No. 1, pp. 58-64, 2008.

Archive