

# بررسی عددی رفتار تک محوری فوم آلومینیومی بازتولیدی با ریزساختار منظم

مهرداد موسوی رحیمی<sup>۱\*</sup>، شریف شاه بیک<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه - دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار مهندسی سازه - دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

shahbeyk@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۱۲/۱۵]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۱۰/۱۱]

**چکیده-** در این پژوهش، خواص تک محوری فوم آلومینیومی بازتولیدی با ریزساختار منظم به صورت عددی محاسبه و ارزیابی شده است. به منظور شبیه سازی ساختار چنین ماده ای، سعی شده است فرآیند تولید آن با استفاده از روش های عددی مناسب شبیه سازی شود. به همین منظور و در گام نخست، روش اجزای محدود غیرخطی برای شبیه سازی فرایند تراکم کردن ماده ی مولد و تعیین هندسه ی ریزساختار آن در یک نسبت حفره ی مشخص به کار رفته است. در گام دوم، هندسه به دست آمده با به کارگیری المان های وکسل معکوس سازی می شود و با اعمال خصوصیات ارتجاعی - خمیری آلومینیوم و شرایط تکیه گاهی مناسب، آماده تحلیل نهایی می شود. در تولید ماده ی مولد از کره هایی با اندازه برابر و رفتار صلب خمیری کامل با سه قطر ۱/۰، ۱ و ۱۰ میلی متر و در سه آرایش استاندارد جامدات کریستالی sc، bcc و fcc استفاده شده که بر اساس هر یک از آن ها و با اعمال فشار هیدروستاتیکی مناسب، فوم هایی با پنج چگالی نسبی تقریبی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵٪ تولید شده است. در پایان و پس از اعمال فشار تک محوری به صورت جابه جایی-کنترل، خواص مکانیکی نمونه ها شامل مدول ارتجاعی، نسبت پواسون و نقطه تسلیم استخراج و بررسی می شود.

**واژگان کلیدی:** فوم بازتولیدی، مدل سازی عددی، فشار تک محوری، روش اجزا محدود، المان وکسل

## ۱- مقدمه

تولید فوم با حفره های بسیار ریز و در حد چند میکرون [۱۷-۱۳، ۹، ۱۰]، امکان تولید ماده با ساختار تقریباً بدون نقص و کاملاً یکنواخت به منظور انجام آزمایش های تکرارپذیر [۱۸-۱۶، ۱۰، ۶، ۸]، امکان به کار بردن انواع فلزات و آلیاژها در تولید فوم [۱۹، ۱۷، ۱۴، ۵، ۲] و همچنین سادگی در تولید مواد با ساختاری با چگالی لایه بندی شده [۲۱، ۲۰]، این روش را در بین پژوهشگران جامدات سلولی<sup>۲</sup> بسیار پر کاربرد کرده است. مارکی و مورتسن [۶] با تولید فوم آلومینیوم خالص

در دهه اخیر فرآیند بازتولید<sup>۱</sup> برای تولید فوم سلول باز کاربرد فراوانی یافته است [۵-۱]. این فرایند در آزمایشگاه به طور کلی مراحل ثابتی را شامل می شود، که عبارت است از تهیه مولد با ساختار متخلخل، پرکردن فضای خالی آن با ماده زمینه فوم و برداشتن و پاک کردن مولد (به وسیله فرآیند حل کردن) [۷، ۶، ۲]. برخی مزایای مهم روش بازتولید شامل کنترل اندازه حفره، شکل حفره و چگالی نسبی فوم به صورت مستقل [۱۲-۸، ۴، ۲، ۱]، امکان

<sup>۲</sup>. Cellular solids

<sup>۱</sup>. Replication

دارای سختی موثر پایین و مقاومت و شکل پذیری بالا است و نسبت به بافت‌های بدن رفتاری خنثی دارد.

رسانایی و مقاومت فوم Ag-Cu با چگالی نسبی ۳۶ تا ۵۰٪ و اندازه حفره ۳۰۰ میکرومتر به وسیله دیولوجنت و همکاران [۵] بررسی شد. نتایج برای کاربرد این ماده در مبدل‌های حرارتی راضی کننده بود. الشتی و رودینی [۲۶] روش جدیدی برای ساخت فوم بازتولیدی معرفی و با تولید فوم آلومینیوم با مولد نمک با اندازه دانه ۵۰۰ میکرومتر تنش تسلیم این نوع فوم را متناسب با  $\rho^3$  تشخیص دادند.

مک الواین و همکاران [۲۷ و ۲۸] با کاربرد اجزای محدود غیرخطی به تحلیل مواد متخلخل با چگالی نسبی متفاوت تحت شرایط بارگذاری چند محوری پرداخته و سطح تسلیمی را برای این مواد پیشنهاد کردند. روسل و مورتسن [۲۹] فضای خالی بین ماده مولد که با ماده مذاب فوم پر می‌شود را با دو ساختار متفاوت شبیه سازی کرده و به مقایسه رفتار تک محوری این دو ساختار پرداختند.

همان‌گونه که در بررسی ادبیات فنی فوم‌های بازتولیدی مرور شد، مشاهده می‌شود که حجم زیادی از پژوهش‌ها در حوزه مطالعه‌ی آزمایشگاهی متمرکز شده است و کارهای عددی و تحلیل بسیار محدود است. یکی از مشکلات اصلی در این راه، پیچیده بودن هندسه سه بعدی ساختار این مواد است. از این رو این مقاله سعی دارد که ابتدا فرایند تولید فوم‌های بازتولیدی را با به کارگیری ترکیبی ابزار اجزای محدود غیرخطی (در مرحله فشردن مولدها) و شبکه‌بندی المان‌های وکسل<sup>۶</sup> [۳۰] (در مرحله معکوس سازی مولدها) به صورت عددی شبیه‌سازی نماید. در گام بعد و با در نظر گرفتن سه آرایش منظم جامدات کریستالی fcc، bcc، و sc، برای مولد، نمونه‌های فوم بازتولیدی با ۵ چگالی نسبی متفاوت تولید شده است. در گام آخر نمونه‌های عددی فوم تحت بارگذاری تک محوری فشاری قرار گرفته و مدول ارتجاعی، نسبت پواسون و تنش تسلیم آنها استخراج و مقایسه می‌شود.

با مولد نمک طعام به مطالعه رفتار تک محوری فشاری آن پرداختند. این پژوهشگران نشان دادند که می‌توان منحنی‌های تنش- کرنش به دست آمده را در کرنش کمتر از ۱۰٪ با رابطه توانی ساده تقریب زد. ویژگی‌های مکانیکی فوم آلومینیوم با مولد کربامید<sup>۱</sup> و تولید شده با فرایند سینترینگ<sup>۲</sup> موضوع بررسی جیانگ و همکاران [۲۲-۲۴] بوده است. این پژوهشگران نشان دادند که فوم‌های تولید شده به کمک ذرات کروی نسبت به نمونه‌های دیگر مقاومت تسلیم بیشتری دارند. همچنین مشاهده شد که با کاهش اندازه حفره‌ها، ویژگی‌های فشاری فوم بهبود پیدا می‌کند.

دسیویس و همکاران [۱۴] به بررسی مدول ارتجاعی و تنش جاری شدگی فوم آلومینیوم بازتولیدی با اندازه حفره ۴۰۰ میکرومتر در کشش و فشار پرداختند. آنها نتایج مدول ارتجاعی به دست آمده را با نتایج چند مدل تحلیلی برای مواد مرکب و همچنین نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه کردند. گودال و همکاران [۴] با ذوب کردن دانه‌های نمک و پاشیدن آنها در هوا توانستند نمک با دانه‌های تقریباً کروی به دست آورند و در تولید فوم آلومینیومی به کار بردند. نتایج نشان داد برای فوم با حفرات هم محور<sup>۳</sup> (با چشم پوشی از کروی یا گوشه‌دار بودن)، مدول ارتجاعی و تنش تسلیم تنها به چگالی نسبی وابسته است و شکل حفره تاثیری در رفتار ندارد. برادرز و دوناند [۲۰] به مقایسه پاسخ فشاری تک محوری فوم یکنواخت و لایه بندی شده AI-6۰۶۱ پرداختند. در حالی که نمونه‌های با چگالی یکنواخت، ناحیه تنش ثابت<sup>۴</sup> از خود نشان دادند، نمونه‌های فوم لایه‌بندی شده دارای رفتار سخت شونده مشخص بودند. بندسیده‌ی و دوناند [۲۵] با ساخت فوم آلیاژ NiTi با استفاده از مولد نمک طعام، این فوم را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای ساخت ایمپلنت<sup>۵</sup> در پزشکی معرفی کردند. این ماده

۱. Carbamid

۲. Sintering

۳. Equiaxed

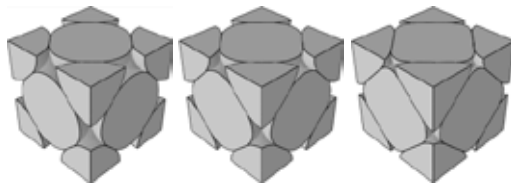
۴. Plateau stress

۵. Implant

۶. Voxel element

## ۲-۱- فشرده‌سازی مولد

با توجه به این که اولین گام در عددی سازی فرایند تولید فوم بازتولیدی، شبیه‌سازی فرایند فشرده سازی مولد است، نخست باید یک مدل هندسی سه بعدی از مولد فشرده شده تهیه شود. از آنجا که این هندسه فشرده شده مولد به پارامترهای عددی زیادی همچون چیدمان اولیه ذرات، ویژگی رفتاری ماده‌ی مولد، اندرکنش بین ذرات مولد و شرایط فشردن ذرات وابسته است، در این پژوهش از روش اجزای محدود غیرخطی و نرم افزار ABAQUS [۳۱]، در این بخش استفاده شده است. فرض می‌شود که ذرات مولد رفتاری دوخطی و از نوع صلب-خمیری کامل دارند. ضریب اصطکاک ۰/۲ بین سطوح تماس ذرات اعمال و سه قطر دانه ۰/۱، ۱ و ۱۰ میلی‌متر بررسی شده است. در گام نهایی واحدهای تک سلولی به صورت همسانگرد تحت شرایط بارگذاری هیدروستاتیکی ( $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} \neq 0$ ) قرار گرفته تا حجم فضای خالی مورد نظر حاصل شود. به عنوان مثال در شکل (۳) نمونه fcc در سه تراکم مختلف نشان داده شده است.



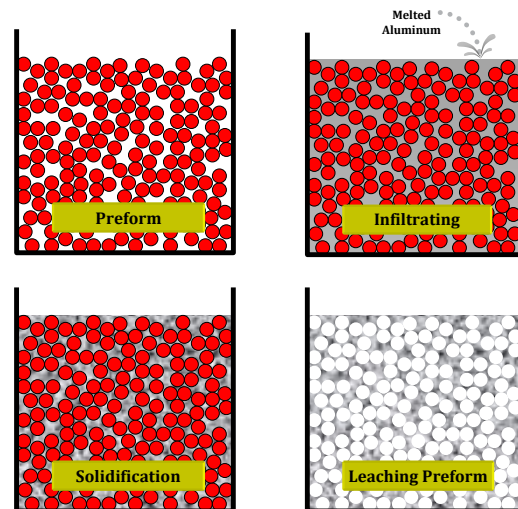
شکل ۳. مراحل فشرده‌سازی یک سلول fcc.

## ۲-۲- معکوس‌سازی هندسه مولد

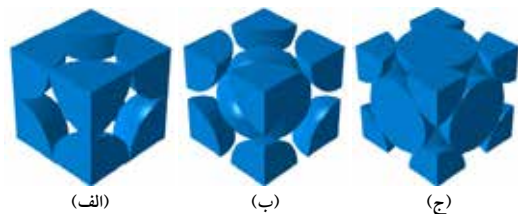
گام دوم در تولید مدل عددی فوم، برگرداندن (معکوس‌سازی) هندسه مولد فشرده است. برای انجام این کار از روش المان‌های وکسل استفاده شده است [۳۰]. ابتدا مدل عددی مولد در یک مکعب مستطیل هم اندازه محاط می‌شود، سپس این مکعب با المان‌های وکسل یک اندازه‌ی شبکه بندی می‌شود و در پایان با بررسی هم-پوشانی المان‌های وکسل با المان‌های مدل اجزای محدود مولد فشرده شده، المان‌های نامناسب حذف و هندسه معکوس به دست می‌آید (شکل ۴). لازم به ذکر است اندازه المان‌های وکسل تعیین کننده‌ی دقت هندسه فوم

## ۲-۲- فرایند شبیه‌سازی عددی فوم بازتولیدی

فرایند تولید فوم بازتولیدی به صورت کلی مراحل پیشرو را شامل می‌شود (شکل ۱): ۱- آماده‌سازی مولد، ۲- عبور دادن ماده مذاب سازنده فوم از بین ذرات مولد<sup>۱</sup> - ۳- سرد و جامد نمودن<sup>۲</sup> - ۴- حل کردن و زدودن مولد<sup>۳</sup>. در بیشتر موارد مولد ماده‌ی پودری شکلی است که به میزان دلخواه فشرده شده است. در این پژوهش فرض می‌شود ذرات مولد کره‌های هم اندازه در سه چیدمان bcc، sc و fcc است (شکل ۲). لازم به ذکر است شکل اولیه این سه آرایش در فرایند فشردن دچار تغییرات زیادی می‌شود. در ادامه خط مشی نظام‌مندی برای تولید مدل‌های عددی لازم معرفی می‌شود.



شکل ۱. مراحل تولید فوم آلومینیوم بازتولیدی.

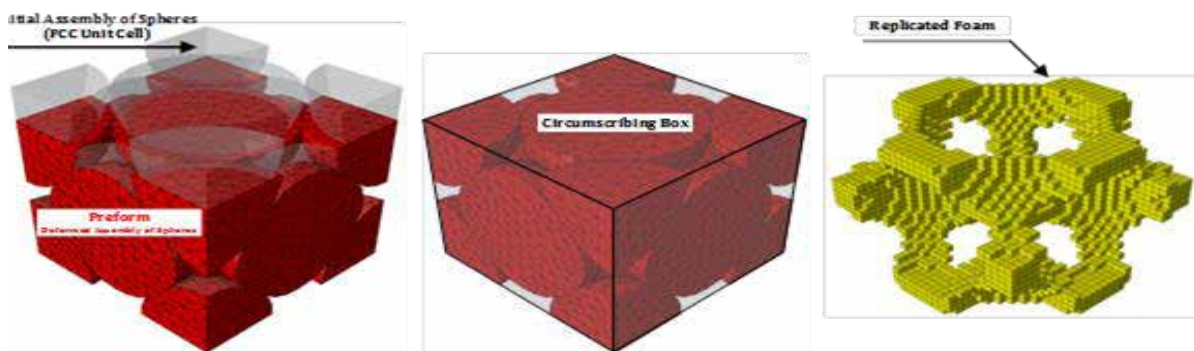


شکل ۲. چیدمان اولیه کره‌های هم اندازه. (الف) sc، (ب) bcc و (ج) fcc.

۱. Infiltration
۲. Solidification
۳. Leaching

مولد با ساختارهای دست نخورده  $sc$ ،  $bcc$  و  $fcc$  به کار رفته است.

نهایی و در نتیجه خواص مکانیکی به دست آمده خواهد بود. روش مشابهی به وسیله مک الواین و همکاران [۲۷ و ۲۸] برای تولید مدل عددی فوم از



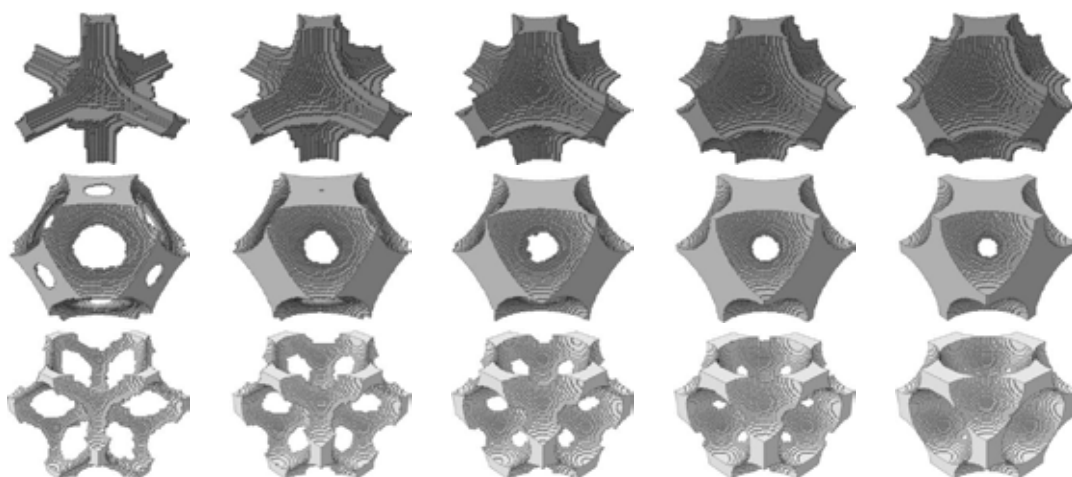
شکل ۴. معکوس سازی مدل اجزای محدود مولد فشرده شده به کمک المان‌های وکسل.

آلیاژ آلومینیوم  $Al_{60.61}-T_6$  به عنوان ماده سازنده (ماده زمینه) فوم بازتولیدی لحاظ شده است. مدول

داده شده‌اند. لازم به ذکر است همان‌گونه که مک الواین [۲۸] بیان کرده، مش‌بندی وکسل (با المان مکعبی) به اندازه‌ای ریز اختیار شده که وابستگی به اندازه المان در نتایج وجود نداشته باشد. جدول (۱) شرح دقیقی از اطلاعات مدل‌های اجزای محدود نمونه‌ها را ارائه می‌کند.

### ۳- تحلیل‌های عددی

با توجه به روش ارائه شده برای استخراج مدل عددی فوم بازتولیدی، مدل‌هایی متناظر برای سه ساختار سلولی در پنج چگالی نسبی تقریبی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد تولید شد. نمونه‌های تولید شده برای ذرات کروی ۱۰ میلی‌متری در شکل (۵) نشان



شکل ۵. مدل اجزای محدود واحدهای تک‌سلولی در چگالی نسبی متفاوت. ردیف بالا با ساختار  $sc$ ، ردیف میانی با ساختار  $bcc$  و ردیف پایین با ساختار  $fcc$ .

جدول ۱. مشخصات مدل‌های اجزای محدود.

	Relative Density (%)			Model Size (mm)			Element Size (mm)			Number of Elements		
	sc	bcc	fcc	sc	bcc	fcc	sc	bcc	fcc	sc	bcc	fcc
۰.۱ mm Preform	۵.۴۲	۵.۰۶	۵.۷۳	۰.۰۸۲۰	۰.۱۰۱۵	۰.۱۳۰۰	۰.۰۰۱۱۴	۰.۰۰۱۴۱	۰.۰۰۱۶۷	۱۹۶۷۰	۱۸۹۰۵	۲۷۱۹۲
	۱۰.۳۹	۹.۵۳	۱۰.۶۴	۰.۰۸۳۵	۰.۱۰۳۰	۰.۱۳۲۵	۰.۰۰۱۲۰	۰.۰۰۱۳۹	۰.۰۰۱۷۰	۳۶۶۵۸	۳۸۱۲۵	۵۰۰۰۲
	۱۵.۱۳	۱۴.۴۲	۱۵.۵۹	۰.۰۸۵۰	۰.۱۰۵۰	۰.۱۳۵۰	۰.۰۰۱۱۸	۰.۰۰۱۴۶	۰.۰۰۱۶۹	۵۶۴۷۱	۵۳۸۱۶	۷۹۷۹۶
	۲۰.۹۱	۲۰.۱۷	۲۰.۴۸	۰.۰۸۷۰	۰.۱۰۷۵	۰.۱۳۸۰	۰.۰۰۱۱۳	۰.۰۰۱۴۵	۰.۰۰۱۷۷	۹۹۱۸۰	۸۱۷۱۸	۹۷۲۱۰
	۲۴.۸۰	۲۵.۰۷	۲۵.۴۰	۰.۰۸۸۵	۰.۱۰۹۵	۰.۱۴۱۰	۰.۰۰۱۱۱	۰.۰۰۱۴۱	۰.۰۰۱۷۶	۱۲۶۹۵۵	۱۱۸۹۸۳	۱۳۰۰۶۱
۱ mm Preform	۵.۴۴	۷.۰۶	۵.۷۲	۰.۰۸۲۰	۱.۰۰۴۲	۱.۳۰۱	۰.۰۱۱۴	۰.۰۱۲۴	۰.۰۱۷۲	۲۰۳۰۳	۴۱۸۳۴	۲۵۱۰۰
	۱۰.۴۹	۱۱.۳۲	۱۰.۶۳	۰.۰۸۳۵	۱.۰۰۵۹	۱.۳۲۵	۰.۰۱۱۶	۰.۰۱۲۶	۰.۰۱۷۰	۳۹۴۴۷	۶۷۱۷۳	۵۰۴۵۸
	۱۵.۱۴	۱۴.۹۹	۱۵.۵۸	۰.۰۸۵۰	۱.۰۰۷۴	۱.۳۵۱	۰.۰۱۱۸	۰.۰۱۲۸	۰.۰۱۷۸	۵۶۵۱۰	۸۸۸۴۶	۶۸۲۷۶
	۲۰.۸۶	۱۹.۸۵	۲۰.۵۰	۰.۰۸۷۰	۱.۰۰۹۳	۱.۳۷۸	۰.۰۱۲۵	۰.۰۱۴۰	۰.۰۱۷۷	۷۳۶۱۰	۹۴۱۹۱	۹۷۲۶۸
	۲۴.۷۷	۲۶.۰۶	۲۵.۲۹	۰.۰۸۸۵	۱.۰۱۲۰	۱.۴۰۸	۰.۰۱۲۷	۰.۰۱۴۰	۰.۰۱۸۱	۸۴۶۶۱	۱۲۳۲۰۴	۱۲۰۰۱۴
۱۰ mm Preform	۵.۴۴	۶.۵۱	۵.۷۱	۸.۲۰۰	۱۰.۳۹۵	۱۳.۰۱۷	۰.۱۱۴	۰.۱۳۰	۰.۱۷۲	۲۰۳۸۱	۳۳۲۳۳	۲۵۰۷۵
	۱۰.۴۹	۱۱.۴۲	۱۰.۶۲	۸.۳۵۰	۱۰.۵۸۳	۱۳.۲۵۳	۰.۱۱۶	۰.۱۲۶	۰.۱۷۵	۳۹۰۰۶	۶۷۶۸۵	۴۶۶۲۴
	۱۵.۱۵	۱۵.۰۶	۱۵.۵۵	۸.۵۰۱	۱۰.۷۳۳	۱۳.۵۰۷	۰.۱۱۸	۰.۱۳۱	۰.۱۷۸	۵۶۵۴۹	۸۳۰۵۸	۶۸۲۷۴
	۲۰.۸۷	۲۰.۳۹	۲۰.۴۸	۸.۷۰۱	۱۰.۹۵۳	۱۳.۷۸۲	۰.۱۰۹	۰.۱۴۱	۰.۱۷۷	۱۰۶۸۶۸	۹۶۷۵۱	۹۷۱۷۴
	۲۴.۷۹	۲۴.۵۳	۲۵.۴۰	۸.۸۵۰	۱۱.۱۴۱	۱۴.۰۸۲	۰.۱۱۱	۰.۱۴۳	۰.۱۷۶	۱۲۶۹۲۷	۱۱۲۶۹۲	۱۳۰۰۶۱

#### ۴- نتایج

منحنی بار در برابر تغییر مکان،  $P-\delta$ ، مهم‌ترین نتیجه تحلیل‌های اجزای محدود صورت گرفته است، که به کمک روابط زیر می‌توان آن را به منحنی تنش- کرنش حقیقی،  $\sigma-\varepsilon$ ، تبدیل کرد.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1)$$

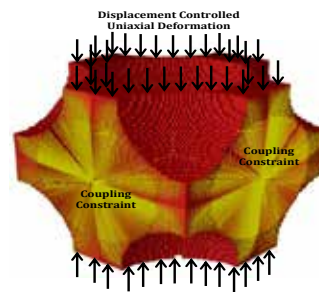
A سطح بارگیر واقعی،  $l$  طول اول و  $l_0$  طول دوم نمونه برای بارگذاری است. در شکل (۷) نمودارهای تنش- کرنش تمام نمونه‌ها ارائه شده است. مدول ارتجاعی،  $E$ ، و نسبت پواسون،  $\nu$ ، عبارتند از

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad \nu = \left. \frac{d\varepsilon}{d\varepsilon_l} \right|_{\sigma=0} \quad (2)$$

در این روابط  $\varepsilon_l$  کرنش جانبی است. در شکل‌های (۸) و (۹) مدول ارتجاعی و نسبت پواسون نمونه‌های فوم در مقابل چگالی نسبی برای سه ساختار sc، bcc و fcc ارائه شده است.

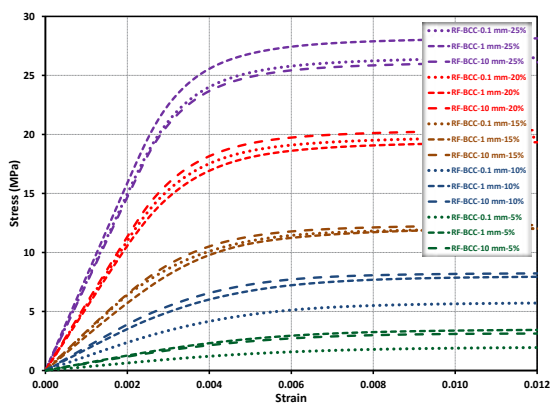
یانگ، نسبت پواسون و تنش تسلیم این آلیاژ به ترتیب ۷۰ گیگاپاسکال، ۰/۳۳ و ۲۴۰ مگاپاسکال است. همچنین به ماده زمینه فوم رفتار ارتجاعی-خمیری کامل اختصاص یافته است. همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شده، تغییر شکل محوری فشاری به صورت جابه‌جایی کنترل با لحاظ کردن قیدهای جانبی مناسب بر نمونه اعمال شده است.

قید جانبی اعمال شده بر نمونه شرط صفحه باقی ماندن وجوه جانبی را تضمین می‌کند (که خود شرط لازم برای در نظر گرفتن ساختار تناوبی فوم بازتولیدی است). از تحلیل ضمنی استاتیکی غیرخطی برای تعیین منحنی تنش-کرنش تک محوری استفاده شده است.

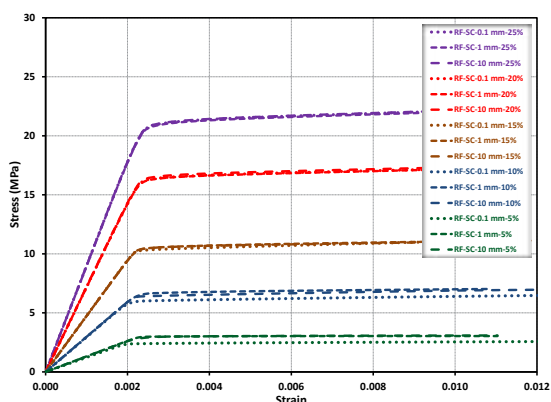


شکل ۶. نمایش بارگذاری و شرایط مرزی اعمالی بر سلول fcc.

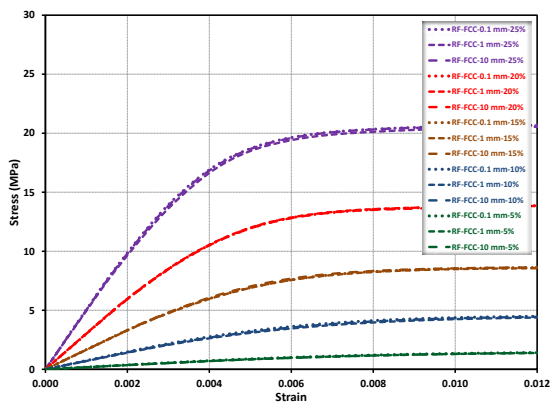
در شکل (۵) روشن شده است و می توان آن را به تغییر ساختار تیرها با افزایش چگالی به بیش از ۱۵٪ نسبت داد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷. منحنی تنش- کرنش حقیقی فوم بازتولیدی در چگالی نسبی مختلف. (الف) sc، (ب) bcc و (ج) fcc.

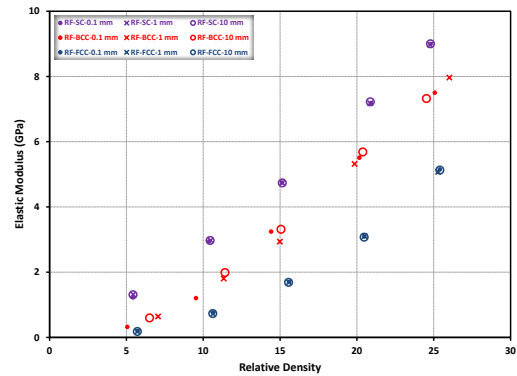
شکل (۸) نشان می دهد که ساختارهای سلولی sc و fcc به ترتیب بیشترین و کمترین سختی را در بین نمونه ها دارا است. علاوه بر این، در محدوده ی نمونه های بررسی شده، منحنی ها و نتایج به دست آمده مستقل از اندازه حفره است. نتیجه مشابهی در مرجع [۴] نیز گزارش شده است. با عبور دادن منحنی توانی از میان نقاط مربوط به مدول ارتجاعی در مقابل چگالی نسبی، روابط زیر حاصل می شوند.

$$E_f \cong \begin{cases} 0.702 E_s \bar{\rho}^{1.271} & R^2 = 0.999 \quad sc \quad (الف-۳) \\ 1.651 E_s \bar{\rho}^{1.905} & R^2 = 0.995 \quad bcc \quad (ب-۳) \\ 1.041 E_s \bar{\rho}^{2.232} & R^2 = 0.999 \quad fcc \quad (ج-۳) \end{cases}$$

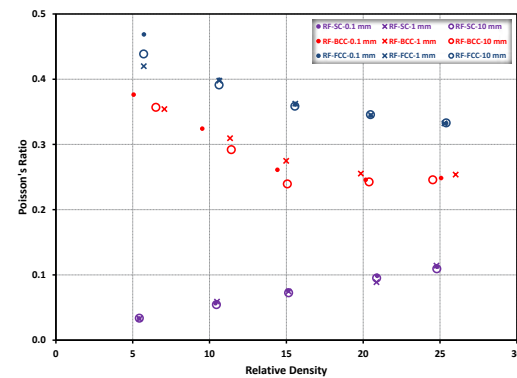
اندیس f و s به ترتیب نشانگر فوم و ماده جامد پایه (مانند آلومینیوم) است.  $R^2$  ضریب همبستگی است. همان گونه که از روابط بالا مشخص است وابستگی مدول ارتجاعی به چگالی نسبی در نمونه های sc تقریباً خطی است، که نشان می دهد سازوکار حاکم در تغییر شکل این نمونه ها از نوع محوری است. از طرفی معادله (۳-ج) با توان ۲/۲۳۲ بر این موضوع دلالت دارد که سازوکار تغییر شکل های نمونه fcc از نوع خمشی است [۳۲]. در تفسیر نتایج مربوط به نمونه های bcc باید دقت بیشتری شود زیرا ضریب همبستگی به دست آمده از عدد یک فاصله گرفته که نشانگر عدم انطباق کامل شکل تابع پیشنهادی (تابع توانی) با نتایج آزمایشگاهی است. به منظور بررسی دقیق تر، شکل (۱۰) مقادیر مدول ارتجاعی نمونه های با قطر مولد ۰/۱ میلی متر را نشان می دهد. همان گونه که مشخص است روند تغییرات مدول ارتجاعی برای دو دسته از نمونه های sc و fcc کاملاً هموار است، در حالی که در فاصله چگالی های نسبی ۱۰ تا ۱۵ درصد، جهشی در مقادیر مربوط به نمونه bcc مشاهده می شود. نکته جالب توجه دیگر آن که این اطلاعات نشان می دهند نمونه bcc در چگالی زیر ۱۰٪ مانند fcc و در چگالی بالای ۱۵٪ مانند sc رفتار می کند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که سازوکار تغییر شکل در نمونه های bcc در بازه ی چگالی نسبی ۱۰٪ <  $\bar{\rho}$  < ۱۵٪ از خمشی به محوری تغییر می یابد. دلیل هندسی این انتقال

مقادیر نسبت پواسون نیز همین پدیده‌ی فیزیکی را در مورد سازوکار تغییرشکل‌ها منعکس می‌کند. شکل (۹) نشان می‌دهد نسبت پواسون نمونه‌های sc با افزایش چگالی نسبی افزایش می‌یابد و از حدود صفر در  $\bar{\rho} = 0.5$  شروع و به تدریج افزایش می‌یابد. دلیل این رشد به طور واضح وابسته به تیر عمودی قرار گرفته در جهت بارگذاری در وسط این نمونه است، زیرا انبساط جانبی سلول است و بنابراین تعیین کننده انبساط جانبی سلول است و بنابراین چگالی نسبی بیشتر، معادل با ضخامت تیر میانی بیشتر و در نتیجه نسبت پواسون بیشتر است. نسبت پواسون fcc از حدود ۰/۵ در  $\bar{\rho} = 0.5$  شروع و با افزایش چگالی به تدریج کاهش یافته و به عددی حدود ۰/۳۳ که مربوط به نسبت پواسون فلز پایه (آلومینیوم) است نزدیک می‌شود. در مورد سلول bcc رفتار آن باز هم ترکیبی از رفتار دو ساختار دیگر است و ۷ از مقدار تقریبی ۰/۴ در  $\bar{\rho} = 0.5$  آغاز و با افزایش چگالی نسبی تا  $\bar{\rho} = 0.5$  به عددی نزدیک به ۰/۳ کاهش یافته ولی با افزایش بیشتر چگالی سیر صعودی می‌یابد.

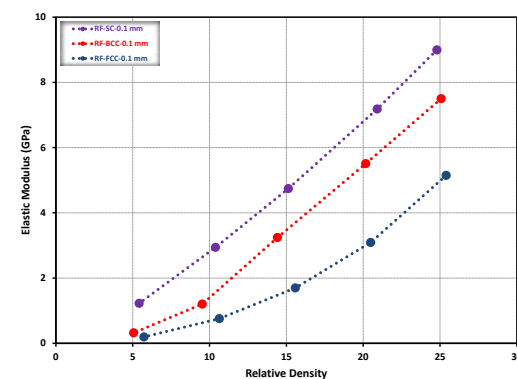
هنگامی که تعیین تنش تسلیم اولیه مطرح است، می‌توان روش‌های متفاوتی چون افسست کرنش خمیری، شیب منحنی معادل با نسبت مشخصی از شیب اولیه و تقاطع شیب پس از تسلیم با محور تنش [۳۳] به کار برد. در این پژوهش از روش شیب منحنی برابر با درصد خاصی از شیب اولیه منحنی تنش-کرنش استفاده شده و همان‌گونه که در شکل (۱۱) به صورت شماتیک نشان داده شده، تنش‌های متناظر با تغییر شیب‌های معادل با ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰٪ شیب اولیه استخراج شده‌اند. روند این نقاط از رفتار ارتجاعی خالص به سمت ناحیه تنش مسطح حرکت می‌کند. لازم به ذکر است مک الواین [۲۸] در پژوهش خود بر روی فوم‌های بازتولیدی از روشی مشابه اما تنها با نسبت ۹۵٪ استفاده کرده است.



شکل ۸. مدول ارتجاعی نمونه‌های فوم بازتولیدی.



شکل ۹. نسبت پواسون نمونه‌های فوم بازتولیدی.



شکل ۱۰. مدول ارتجاعی سه نمونه فوم مورد بررسی در قطر حفره ۰/۱ میلی‌متر.



می‌کند. درحالی که این اختلاف برای سلول bcc با فراتر رفتن چگالی نسبی از ۱۵٪ تقریباً ثابت می‌ماند.

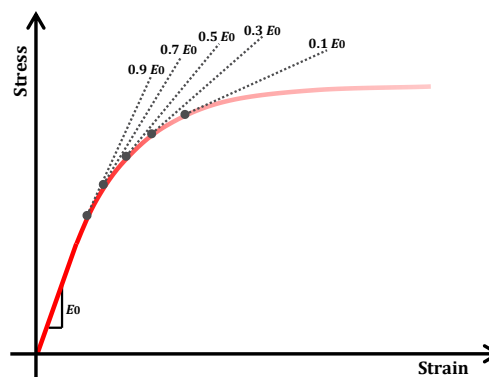
- تخمین تغییراتی<sup>۱</sup> کاستاندا و سوکت [۳۴] با  $E$  برگرفته شده از مدل GRF [۳۵]،  $n=0$  و ضریب افتادگی<sup>۲</sup> یک به عنوان حد بالا و معادله (۳۹) در مرجع [۱۴] (مدل G&A) به عنوان حد پایین داده‌های تنش تسلیم نمونه‌های fcc قابل استفاده است.

- تخمین تغییراتی کاستاندا و سوکت با  $E$  برگرفته شده از مدل G&A [۳۲] و  $n=0$  و معادله (۳۹) از مرجع [۱۴] به شکل راضی کننده‌ای حدود بالا و پایین داده‌های تنش تسلیم نمونه‌های bcc را برارود می‌کنند.

- سلول sc با سازوکار تغییرشکل‌های محوری، حساسیت کمتری به چگالی نسبی نشان می‌دهد.

- مقادیر  $\sigma_y(10\%)$  نمونه‌های عددی این پژوهش از نتایج آزمایشگاهی دسپویس و همکاران [۱۴] بزرگتر است. دلیل اصلی این اختلاف مربوط به وجود نقص‌های اولیه در ساختار نمونه‌های واقعی فوم است.

به منظور نتیجه‌گیری بهتر در این بخش، مانند آنچه برای مدول ارتجاعی انجام گرفت، مقادیر  $\sigma_y(10\%)$  با منحنی توانی بر حسب  $\bar{\rho}$  تقریب زده شده‌اند. توان این روابط و همچنین توان روابط مربوط به مدول ارتجاعی به همراه برخی اعداد گزارش شده در ادبیات فنی در جدول (۳) آورده شده است که این کار انجام مقایسه را آسان می‌کند. با نگاهی به این جدول دیده می‌شود که توان‌های مربوط به مطالعات آزمایشگاهی فوم بازتولیدی بزرگتر از توان‌های متناظر در نمونه‌های شبیه‌سازی شده است. این مساله را می‌توان به توزیع تصادفی حفرها و همچنین وجود نقص‌های مختلف در فوم‌های تولید شده در آزمایشگاه در مقایسه با ساختار منظم و بدون نقص مدل‌های عددی این پژوهش وابسته نمود.



شکل ۱۱. تعریف نقطه تسلیم در منحنی تنش-کرنش به عنوان نقطه متناظر با درصد شیب مشخصی نسبت شیب اولیه.

در جدول (۲) تنش‌های تسلیم محاسبه شده ارائه شده‌اند. اولین نکته مهمی که با بررسی این نتایج مشخص می‌شود، عدم وابستگی به اندازه حفره است. این در حالی است که در برخی از پژوهش‌ها مانند [۴، ۱۴، ۱۵] وابستگی به اندازه حفره مشاهده می‌شود. در این مطالعه اثر لایه اکسید سطحی بر ایجاد نابه‌جایی‌های هندسی و پدیده‌ی کمانش تیرها به عنوان عامل این وابستگی معرفی شده‌اند. طبیعی است که مدل‌های عددی این مقاله اثر لایه اکسید را لحاظ نمی‌کنند. همچنین در محدوده‌ی چگالی‌ها و ساختارهای بررسی شده، پدیده‌ی کمانش در تیرها مشاهده نشد. شکل (۱۲) نقاط تسلیم فوم‌ها با اندازه حفره ابتدایی ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. علاوه بر این، محدوده متنوعی از اطلاعات تحلیلی و آزمایشگاهی [۱۴] به منظور انجام مقایسه در شکل (۲) اضافه شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد:

- تفاوت قابل توجهی بین  $\sigma_y(10\%)$  و  $\sigma_y(90\%)$  نمونه‌های sc وجود ندارد. یعنی انتقال از ناحیه ارتجاعی به تنش مسطح ناگهانی رخ می‌دهد. در مقابل دو نمونه fcc و bcc انتقال تدریجی را تجربه می‌کنند.

- با افزایش چگالی نسبی، اختلاف بین  $\sigma_y(10\%)$  و  $\sigma_y(90\%)$  نمونه‌های fcc بدون وقفه افزایش پیدا

۱. Variational estimation

۲. Knock-down factor



جدول ۲. تنش‌های تسلیم محاسبه شده.

Simple Cubic (۰.۱ mm)						Body-Centered Cubic (۰.۱ mm)					Faced-Centered Cubic (۰.۱ mm)						
$\bar{\rho}$ (%)	Yield Stress (MPa)					$\bar{\rho}$ (%)	Yield Stress (MPa)					$\bar{\rho}$ (%)	Yield Stress (MPa)				
	۹.۰٪	۷.۰٪	۵.۰٪	۳.۰٪	۱.۰٪		۹.۰٪	۷.۰٪	۵.۰٪	۳.۰٪	۱.۰٪		۹.۰٪	۷.۰٪	۵.۰٪	۳.۰٪	۱.۰٪
۲۴.۸۰	۱۷.۶۴	۱۹.۵۸	۲۰.۲۳	۲۰.۵۶	۲۰.۹۰	۲۵.۰۷	۱۷.۵۵	۱۹.۸۸	۲۱.۷۸	۲۳.۵۳	۲۵.۲۸	۲۵.۴۰	۱۰.۰۱	۱۳.۴۲	۱۶.۲۷	۱۸.۴۵	۱۹.۷۷
۲۰.۹۱	۱۴.۳۲	۱۵.۵۸	۱۵.۸۳	۱۶.۰۸	۱۶.۲۹	۲۰.۱۷	۱۲.۰۷	۱۴.۱۶	۱۵.۷۸	۱۷.۳۵	۱۸.۸۰	۲۰.۴۸	۶.۱۹	۸.۹۱	۱۱.۰۱	۱۲.۴۳	۱۳.۱۷
۱۵.۱۳	۹.۴۶	۹.۹۵	۱۰.۰۵	۱۰.۱۵	۱۰.۲۷	۱۴.۴۲	۶.۰۶	۷.۴۵	۹.۱۳	۱۰.۳۹	۱۱.۴۵	۱۵.۵۹	۳.۹۳	۵.۴۴	۶.۷۰	۷.۶۸	۸.۲۹
۱۰.۳۹	۵.۲۸	۵.۵۹	۵.۷۷	۵.۸۸	۵.۹۸	۹.۵۳	۳.۵۵	۳.۵۹	۴.۲۷	۵.۰۰	۵.۴۸	۱۰.۲۴	۱.۹۵	۲.۷۵	۳.۴۴	۳.۹۹	۴.۳۶
۵.۴۲	۲.۱۶	۲.۱۹	۲.۲۸	۲.۳۵	۲.۳۸	۵.۰۶	۰.۹۵	۱.۲۶	۱.۵۱	۱.۷۲	۱.۹۰	۵.۷۲	۰.۶۲	۰.۸۹	۱.۱۲	۱.۲۲	۱.۴۶

Simple Cubic (۱ mm)						Body-Centered Cubic (۱ mm)					Faced-Centered Cubic (۱ mm)						
$\bar{\rho}$ (%)	Yield Stress (MPa)					$\bar{\rho}$ (%)	Yield Stress (MPa)					$\bar{\rho}$ (%)	Yield Stress (MPa)				
	۹.۰٪	۷.۰٪	۵.۰٪	۳.۰٪	۱.۰٪		۹.۰٪	۷.۰٪	۵.۰٪	۳.۰٪	۱.۰٪		۹.۰٪	۷.۰٪	۵.۰٪	۳.۰٪	۱.۰٪
۲۴.۷۷	۱۷.۴۵	۱۹.۵۰	۲۰.۱۶	۲۰.۴۶	۲۰.۸۳	۲۱.۰۲	۱۸.۹۳	۲۱.۲۰	۲۳.۱۵	۲۵.۰۱	۲۶.۸۸	۲۵.۲۹	۹.۵۵	۱۳.۲۱	۱۶.۱۸	۱۸.۳۵	۱۹.۵۷
۲۰.۸۶	۱۴.۱۴	۱۵.۳۴	۱۵.۷۴	۱۶.۰۲	۱۶.۲۶	۱۹.۸۵	۱۱.۱۷	۱۳.۵۸	۱۵.۳۰	۱۶.۹۱	۱۸.۳۹	۲۰.۵۰	۶.۱۷	۸.۹۰	۱۱.۰۱	۱۲.۴۶	۱۳.۲۱
۱۵.۱۴	۹.۴۱	۹.۹۸	۱۰.۱۴	۱۰.۲۹	۱۰.۴۵	۱۴.۹۹	۵.۶۸	۸.۰۵	۹.۴۴	۱۰.۴۶	۱۱.۳۸	۱۵.۵۸	۳.۸۴	۵.۴۱	۶.۷۰	۷.۶۷	۸.۲۳
۱۰.۴۹	۵.۸۸	۶.۲۱	۶.۳۸	۶.۵۳	۶.۶۴	۱۱.۳۳	۳.۵۶	۴.۸۷	۵.۹۶	۶.۸۷	۷.۶۰	۱۰.۶۳	۱.۸۸	۲.۶۴	۳.۳۱	۳.۸۷	۴.۳۱
۵.۴۴	۲.۷۳	۲.۸۴	۲.۹۱	۲.۹۴	۲.۹۷	۷.۰۶	۱.۵۶	۲.۱۸	۲.۲۷	۳.۰۳	۳.۳۲	۵.۷۲	۰.۶۶	۰.۹۰	۱.۱۲	۱.۳۰	۱.۴۴

Simple Cubic (۱۰ mm)						Body-Centered Cubic (۱۰ mm)					Faced-Centered Cubic (۱۰ mm)						
$\bar{\rho}$ (%)	Yield Stress (MPa)					$\bar{\rho}$ (%)	Yield Stress (MPa)					$\bar{\rho}$ (%)	Yield Stress (MPa)				
	۹.۰٪	۷.۰٪	۵.۰٪	۳.۰٪	۱.۰٪		۹.۰٪	۷.۰٪	۵.۰٪	۳.۰٪	۱.۰٪		۹.۰٪	۷.۰٪	۵.۰٪	۳.۰٪	۱.۰٪
۲۴.۷۹	۱۷.۵۸	۱۹.۶۴	۲۰.۲۸	۲۰.۲۰	۲۰.۹۴	۲۴.۵۳	۱۷.۸۵	۱۹.۶۶	۲۱.۴۷	۲۳.۲۰	۲۴.۹۴	۲۵.۴۰	۹.۹۴	۱۳.۳۹	۱۶.۲۶	۱۸.۴۵	۱۹.۷۵
۲۰.۸۷	۱۴.۳۳	۱۵.۲۷	۱۵.۹۴	۱۶.۲۰	۱۶.۴۴	۲۰.۳۹	۱۳.۰۴	۱۴.۷۳	۱۶.۴۰	۱۷.۹۳	۱۹.۴۲	۲۰.۴۸	۶.۲۹	۸.۹۳	۱۰.۹۹	۱۲.۴۳	۱۳.۱۸
۱۵.۱۵	۹.۴۹	۱۰.۰۱	۱۰.۱۵	۱۰.۲۹	۱۰.۴۴	۱۵.۰۶	۶.۰۸	۸.۲۳	۹.۶۳	۱۰.۷۴	۱۱.۷۳	۱۵.۵۵	۴.۱۳	۵.۶۳	۶.۸۶	۷.۷۷	۸.۳۰
۱۰.۴۵	۵.۹۷	۶.۱۰	۶.۲۲	۶.۳۱	۶.۳۷	۱۱.۴۲	۴.۰۲	۵.۲۰	۶.۲۴	۷.۲۲	۷.۸۹	۱۰.۶۲	۱.۹۵	۲.۷۳	۳.۴۰	۳.۹۵	۴.۳۷
۵.۴۳	۲.۵۳	۲.۶۸	۲.۷۹	۲.۸۸	۲.۹۷	۶.۵۱	۱.۴۴	۲.۰۰	۲.۴۴	۲.۷۸	۳.۰۴	۵.۷۱	۰.۶۵	۰.۹۰	۱.۱۲	۱.۳۱	۱.۴۶

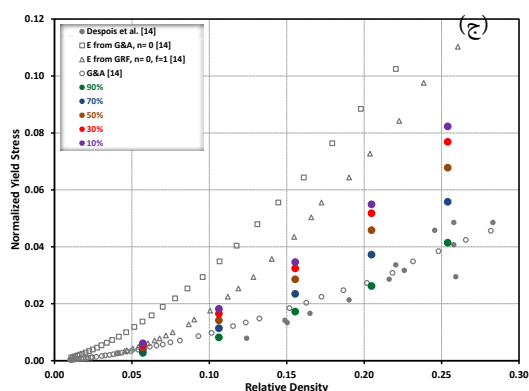
جدول ۲. توان روابط مربوط به مدول ارتجاعی و تنش تسلیم.

Reference	Foaming Material	Preform Type	Relative Density	Pore Size	Exponent - E	Exponent - $\sigma_{y(10\%)}$
Goodall et al. (۲۰۰۶) [۲]	Al ۹۹.۹۹٪	NaCl - Angular	۱۰.۳۰٪	۴۰۰ $\mu\text{m}$	۲.۷۰	۲.۲۰
Goodall et al. (۲۰۰۶) [۲]	Al ۹۹.۹۹٪	NaCl - Angular	۱۰.۳۰٪	۷۵ $\mu\text{m}$	۳.۲۰	۲.۷۰
Despois et al. (۲۰۰۶) [۱۴]	Al ۹۹.۹۹٪	NaCl - Angular	۱۳.۳۳٪	۴۰۰ $\mu\text{m}$	۲.۶۰	۲.۲۰
Goodall et al. (۲۰۰۷) [۴]	Al ۹۹.۹۹٪	NaCl - Spherical	۱۰.۳۵٪	۴۰۰ $\mu\text{m}$	۲.۷۰	۲.۷۰
Goodall et al. (۲۰۰۷) [۴]	Al ۹۹.۹۹٪	NaCl - Spherical	۱۰.۳۵٪	۷۵ $\mu\text{m}$	۲.۶۰	۲.۰۰
Alashti and Roudini [۱۶]	Al ۹۷.۴۰٪	NaCl - Angular	۱۵.۳۳٪	۵۰۰ $\mu\text{m}$	---	۲.۹۴
Current Study	AA ۶۰۶۱-T6	sc structure	۵.۲۵٪	۱۰۰-۱۰۰۰ $\mu\text{m}$	۱.۲۷	۱.۲۹
Current Study	AA ۶۰۶۱-T6	bcc structure	۵.۲۵٪	۱۰۰-۱۰۰۰ $\mu\text{m}$	۱.۹۱	۱.۵۹
Current Study	AA ۶۰۶۱-T6	fcc structure	۵.۲۵٪	۱۰۰-۱۰۰۰ $\mu\text{m}$	۲.۲۳	۱.۷۳

## نتیجه گیری و پیشنهادها

است. نتایج نشان می‌دهد:  
 - در محدوده اندازه مولدهای مورد استفاده، وابستگی به اندازه حفره در نتایج دیده نمی‌شود.  
 - نمونه سلول fcc با داشتن المان‌های شبیه تیر مورب انعطاف پذیرترین رفتار را از خود نشان می‌دهد.  
 - نمونه sc به عنوان سخت‌ترین نمونه در بین سایر نمونه‌ها شناخته شد که علت آن حاکم بودن مد تغییرشکل‌های محوری در سازوکار باربری آن است.  
 - وابستگی ویژگی‌های ارتجاعی و تسلیم نمونه‌ها به چگالی نسبی با حرکت از sc به سمت bcc و پس از آن fcc افزایش پیدا می‌کند.  
 - با دقیق شدن بیشتر در نتایج متوجه می‌شویم که

در این مقاله فرایند فیزیکی فشرده کردن و پاک کردن (حل کردن) مولد در تولید فوم بازتولیدی به ترتیب به کمک روش المان محدود غیرخطی و روش المان‌های وکسل به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. این رویکرد برای تولید فوم‌هایی با سه ساختار اولیه منظم bcc، sc و fcc در سه قطر مولد ۱/۰، ۱ و ۱۰ میلی‌متر به کار رفته است. این تک سلول‌ها تا رسیدن به چگالی نسبی مورد نظر (در بازه ۵ تا ۲۵٪) فشرده شده‌اند. با اختصاص رفتار آلیاژ آلومینیوم به ماده سازنده فوم و اعمال بارگذاری تک محوری فشاری به نمونه‌ها مدول ارتجاعی، نسبت پواسون و تنش تسلیم آن‌ها به دست آمده



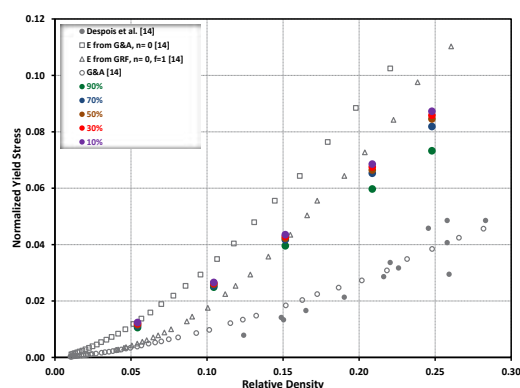
شکل ۱۲. تنش‌های تسلیم محاسبه شده. (الف) sc، (ب) bcc و (ج) fcc.

ماهیت رفتار ارتجاعی نمونه bcc در چگالی نسبی بالاتر مشابه سلول sc است.

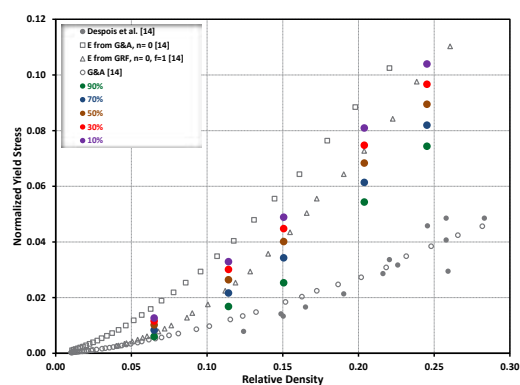
از نقطه نظر تنش تسلیم نمونه bcc و fcc به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین مقادیر را دارند. تنش تسلیم محاسبه شده در این پژوهش با نتایج تحلیلی مطالعات پیشین دیگران مقایسه شده است. توان روابط مربوط به تنش تسلیم نمونه‌هایی که به صورت عددی شبیه‌سازی شده‌اند کمتر از نتایج آزمایشگاهی دیگران به دست آمده است. این کاهش به وجود ساختار تصادفی و عیب و نقص موجود در نمونه‌های واقعی مرتبط دانسته شد. با توجه به ایجاد بستر عددی مناسب در این پژوهش برای شبیه‌سازی فرایند تولید فوم‌های بازتولیدی، گام بعدی ورود به شبیه‌سازی رفتار این دسته از مواد با ساختار غیرمنظم است.

### مراجع

- [1] Despois J.F., Conde Y., Marchi C.S., Mortensen A., "Tensile behaviour of replicated aluminium foams", *Advanced Engineering Materials*, 6(2004), pp.444-7.
- [2] Goodall R., Despois J.F., Marmottant A., Salvo L., Mortensen A., "The effect of preform processing on replicated aluminium foam structure and mechanical properties", *Scripta Materialia*, 54 (2006), pp.206-73.
- [3] Despois J.F., Marmottant A., Salvo L., Mortensen A., "Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminium foams", *Materials Science and Engineering A*, 2007 (462), pp.75-68.
- [4] Goodall R., Marmottant A., Salvo L., Mortensen A., "Spherical pore replicated microcellular aluminium: Processing and influence on properties", *Materials Science and Engineering A*, 465 (2007), pp. 35-124.
- [5] Diologent F., Combaz E., Laporte V., Goodall R., Weber L., Duc F., Mortensen A., "Processing of Ag-Cu alloy foam by the replication process", *Scripta Materialia*, 61 (2009), pp. 54-351.
- [6] Marchi C.S., Mortensen A., "Deformation of open-cell aluminum foam", *Acta Materialia*, 49



(الف)



(ب)

- of aluminium–magnesium open cell foam”, *Acta Materialia*, 57 (2009), pp. 830–7.
- [17] Combaz E., Rossoll A., Mortensen A., “*Hole and notch sensitivity of aluminium replicated foam*”, *Acta Materialia*, 59 (2011), pp. 572–81.
- [18] Soubielle S., Salvo L., Diologent F., Mortensen A., “*Fatigue and cyclic creep of replicated microcellular aluminium*”, *Materials Science and Engineering A*, 528 (2011), pp. 2657–63.
- [19] Abdulla T., Yerokhin A., Goodall R., “*Effect of Plasma Electrolytic Oxidation coating on the specific strength of open-cell aluminium foams*”, *Materials and Design*, 32 (2011), pp. 3742–9.
- [20] Brothers A.H., Dunand D.C., “*Mechanical properties of a density-graded replicated aluminum foam*”, *Materials Science and Engineering A*, 489 (2008), pp. 439–43.
- [21] Pollien A., Conde Y., Pambaguian L., Mortensen A., “*Graded open-cell aluminium foam core sandwich beams*”, *Materials Science and Engineering A*, 404 (2005), pp. 9–18.
- [22] Jiang B., Zhao N.Q., Shi C.S., Du X.W., Li J.J., Man H.C., “*A novel method for making open cell aluminum foams by powder sintering process*”, *Material Letters*, 59 (2005), pp. 3333–6.
- [23] Jiang B., Zhao N.Q., Shi C.S., Li J.J., “*Processing of open cell aluminum foams with tailored porous morphology*”, *Scripta Materialia*, 53 (2005), pp. 781–5.
- [24] Jiang B., Wang Z., Zhao N.Q.; “*Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open cell aluminum foams*”; *Scripta Materialia*; Vol.56, 2007, pp.169–72.
- [25] Bansiddhi A., Dunand D.C., “*Shape-memory NiTi foams produced by replication of NaCl space-holders*”, *Acta Biomaterialia*, 4 (2008), pp. 1996–2007.
- [26] Alashti R.J., Roudini G., “*Producing replicated open-cell aluminum foams by a novel method of melt*” (2001), pp. 3959–69.
- [7] Conde Y., Despois J.F., Goodall R., Marmottant A., Salvo A., Marchi C.S., Mortensen A., “*Replication processing of highly porous materials*”, *Advanced Engineering Materials*, 8 (2006), pp. 795–803.
- [8] Kadar C., Chmellk F., Cieslar M., Lendvai J., “*Acoustic emission of salt-replicated foams during compression*”, *Scripta Materialia*, 59 (2008), pp. 987–90.
- [9] Gaillard C., Despois J.F., Mortensen A., “*Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminium foams*”, *Materials Science and Engineering A*, 374 (2004), pp. 250–62.
- [10] Hakamada M., Watanabe H., Kuromura T., Chen Y., Kusuda H., Mabuchi M., “*Effects of pore characteristics finely-controlled by spacer method on damping capacity of porous aluminum*”, *Materials Transactions*, 50 (2009), pp. 427–29.
- [11] Combaz E., Bacciarini C., Charvet R., Dufour W., Dauphin F., Mortensen A., “*Yield surface of polyurethane and aluminium replicated foam*”, *Acta Materialia*, 58 (2010), pp. 5168–83.
- [12] Hua L., Benitez R., Basu R., Karaman I., Radovic M., “*Processing and characterization of porous Ti<sub>2</sub>AlC with controlled porosity and pore size*”, *Acta Materialia*, 60, (2012), pp.6266–77.
- [13] Marchi C.S., Despois J.F., Mortensen A., “*Uniaxial deformation of open-cell aluminum foam: the role of internal damage*”, *Acta Materialia*, 52 (2004), pp. 2895–902.
- [14] Despois J.F., Mueller R., Mortensen A., “*Uniaxial deformation of microcellular metals*”, *Acta Materialia*, 54 (2006), pp. 4129–42.
- [15] Diologent F., Goodall R., Mortensen A., “*Surface oxide in replicated microcellular aluminium and its influence on the plasticity size effect*”, *Acta Materialia*, 57 (2009), pp. 286–94.
- [16] Diologent F., Goodall R., Mortensen A., “*Creep*

- [32] Gibson L.J., Ashby M.F., Cellular Solids-Structure and Properties, Cambridge UK, Cambridge University Press, 1997.
- [33] Shahbeyk S., "Yield/failure criteria, constitutive models and crashworthiness applications of metal foams", in: Dukhan N. (Ed.), Metal Foams: Fundamentals and Applications, Pennsylvania, DEStech Publications, 2012, pp. 131-214.
- [34] Castaneda P.P., Suquet P., "Nonlinear composites", in: Van Der Giessen E., Wu T.Y. (Eds.), Advances in Applied Mechanics 34, SanDiego, Academic Press, 1998, pp. 171-302.
- [35] Roberts A.P., Garboczi E.J., "Elastic properties of model random three dimensional open-cell solids", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 50 (2002), pp. 33-55.
- "squeezing procedure", Material Letters, 76 (2012), pp. 233-6.
- [27] McElwain D.L.S., Roberts A.P., Wilkins A.H., "Yield criterion of porous materials subjected to complex stress states", Acta Materialia, 54 (2006), pp. 1995-2002.
- [28] McElwain D.L.S., Roberts A.P., Wilkins A.H., "Yield functions for porous materials with cubic symmetry using different definitions of yield", Advanced Engineering Materials, 8 (2006), pp. 870-6.
- [29] Rossol A., Mortensen A., "On the load-bearing efficiency of open-cell foams: A comparison of two architectures related to two processes", Scripta Materialia, 68 (2013), pp. 44-9.
- [30] Miller K., Nielsen P.M.F., Computational Biomechanics for Medicine, New York US, Springer, 2010.
- [31] ABAQUS 6.11, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2012.