

بررسی عددی خواص مکانیکی تک محوری فوم‌های فلزی با ساختار سلولی کروی

امیر سوری^۱، شریف شاه‌بیک^{۲*}، داود رحیمی‌نژاد^۳

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

۳- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت

shahbeyk@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۱۸

چکیده- فوم‌های فلزی به دلیل داشتن ترکیبی از خواص مناسب مانند نسبت سختی و مقاومت به وزن بالا، امکان جذب انرژی ناشی از برخورد و یا انفجار و قابلیت بازیافت، به سرعت در حال گسترش در کاربردهای مهندسی است و در هر سازه‌ای که استفاده شوند این خواص را برای آن به ارمغان می‌آورند. یکی از روش‌های تولید چنین موادی استفاده از روش بریزینگ است که در آن ابتدا پوسته‌های کروی فلزی در کنار هم قرار گرفته و سپس با فرآیندی مشابه لحیم‌کاری به هم متصل می‌شوند و تشکیل فومی با ساختار سلولی بسته می‌دهند. این پژوهش قصد دارد با شبیه‌سازی ریزساختار چنین فوم‌هایی به روش اجزای محدود غیرخطی، به مطالعه رفتار تک محوری فشاری آن‌ها بپردازد و اثر توزیع اندازه‌ی سلول‌های ریزساختار و همچنین ضخامت جداره سلولی را بر مقاومت و سختی ماده بررسی کند.

واژگان کلیدی: فوم فلزی سلول بسته، بریزینگ، ریزساختار، روش اجزای محدود، توزیع گاما

۱- مقدمه

تشکیل می‌شوند. بر پایه‌ی خواص مورد نیاز، ماده‌ی سازنده‌ی هر دو دسته از این مواد می‌تواند پلیمر، فلز و ... انتخاب شود [۱ و ۲]. فوم‌ها موادی هستند که در بیشتر موارد با محبوس کردن حباب‌های یک گاز در داخل یک مایع یا جامد تولید می‌شوند. این مواد سلولی که به تقریب دارای تخلخل ۷۵ تا ۹۵ درصد هستند، بسته به نوع فرآیند شکل‌گیری، به دو دسته فوم‌های سلول بسته^۴ و سلول

مصالح سلولی^۱ را می‌توان به دو دسته‌ی لانه زنبوری‌ها^۲ و فوم‌ها^۳ تفکیک کرد. ریزساختار لانه زنبوری‌ها چیدمانی متناوب از منشورهای با قاعده‌ی همسان است در حالی که فوم‌ها دارای ساختاری غیرمتناوب و تصادفی بوده و به لحاظ هندسی از کنار هم قرارگیری چند وجهی‌های متفاوت

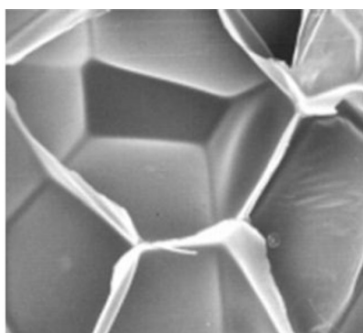
1- Cellular Materials

2- Honeycomb

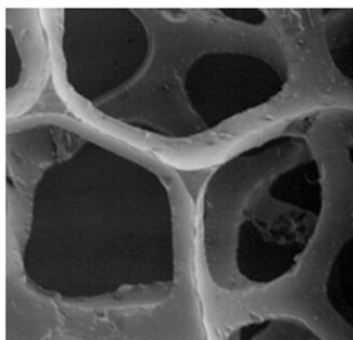
3- Foam

4- Closed-cell

می‌شود در ابتدا فوم رفتار ارتجاعی خطی دارد و سپس به علت کمایش ارتجاعی یال‌ها/دیواره‌های سلولی، ایجاد لولا-ها/خطوط خمیری و یا خردشدگی ترد یال‌ها/دیواره‌های سلولی، ناحیه تنش پایا^۲ شروع می‌شود و تا کرنش چگالش ادامه پیدا می‌کند [۷]. پس از آن و با از بین رفتن کامل تخلخل و به هم فشردن شدن ماده سازنده فوم، رفتار به رفتار ماده‌ی پایه نزدیک می‌شود. در شکل ۲-ب قابلیت تحمل تغییر شکل‌های بزرگ فوم‌ها بدون ایجاد کرنش‌های جانبی، که یکی از ویژگی‌های بسیار مناسب فوم‌ها برای جذب انرژی می‌باشد نشان داده شده است.



الف



ب

شکل (۱) تصویر فوم پلیمری زیر میکروسکوپ الکترونی [۷].

(الف) سلول بسته و (ب) سلول باز.

از روش‌های نوینی که برای تولید فوم‌های فلزی معرفی شده است باید به روش بریزینگ^۳ اشاره نمود. این روش با به هم متصل نمودن سلول‌های مجزای فلزی توخالی، ماده-

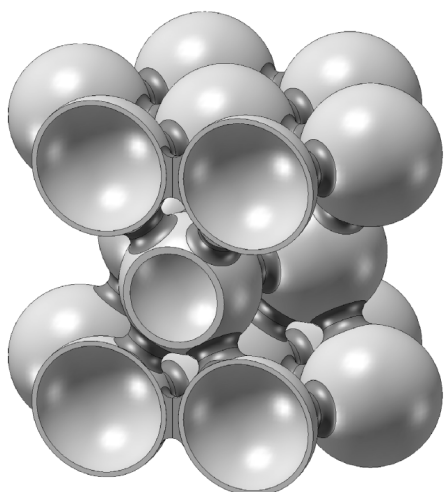
باز^۱ تقسیم می‌شوند [۲]. در یک فوم سلول باز، مانند اسفنج، فضای سلول‌ها به هم مرتبط است اما در فوم‌های سلول بسته فضای هر سلول به وسیله‌ی جداره‌های سلولی از بخش‌های دیگر مجزا می‌شود [۲]. در شکل ۱ دو ریزساختار سلول باز و بسته برای فوم‌های پلیمری که به کمک میکروسکوپ الکترونی به دست آمده نشان داده شده است. در این میان، فوم‌های فلزی موادی نو محسوب می‌شوند که به دلیل نسبت سختی و مقاومت به وزن بالا، چگالی بسیار کم، مقاومت برشی و گسیختگی مناسب، قابلیت جذب انرژی بالا، فرکانس ارتعاش طبیعی بالاتر نسبت به فلز پایه، جذب صدا، قابلیت جذب بارهای ضربه‌ای و خاصیت بسیار مهم امکان بازیافت [۲ و ۳]، به سرعت در حال گسترش در کاربردهای مهندسی مانند ساخت اتومبیل‌ها [۳]، صنایع هوایی [۴]، صنعت ساختمان-سازی [۲]، صنایع دریایی [۲] و صنایع ریلی [۵] می‌باشند. در مرجع [۶] بسیاری از کاربردهای فوم‌های فلزی سلول باز و بسته تشریح شده است.

نخستین تلاش برای ساخت فوم‌های فلزی به سال ۱۹۴۳ برمی‌گردد که با افزودن جیوه به آلومینیوم مذاب انجام می‌گرفت و محصول آن را فلز اسفنجی نامیدند. امروزه روش‌های گوناگونی برای تولید فوم‌های فلزی به کار می‌رود که هر یک از آن‌ها چگالی نسبی، اندازه و هندسه‌ی سلولی و در نتیجه رفتار مکانیکی مربوط به خود را دارند. دمیدن گاز در فلز مذاب، تجزیه‌ی ذرات گاززا در ظرف حاوی فلز مذاب و تجزیه‌ی ذرات گاززا در ظرف حاوی فلز نیمه جامد برخی از این روش‌ها است [۷ و ۸].

رفتار تنش-کرنش مواد سلولی با چگالی نسبی پایین تحت بارگذاری‌های فشاری تک محوری شامل سه مرحله‌ی کلی است. همان‌گونه که در شکل ۲-الف مشاهده

2- Plateau
3- Brazing

1- Open-cell



شکل (۳) نمایش شماتیک اتصال سلول‌های فوم در روش بریزینگ [۸].

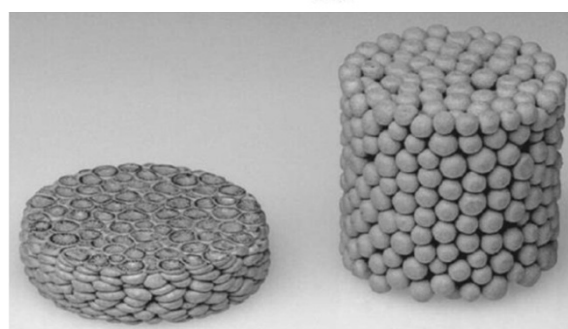
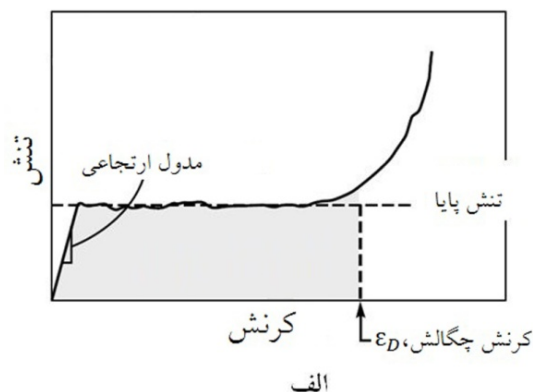
یکی از تفاوت‌های اصلی در این روش تولید فوم‌های فلزی نسبت به روش‌های مرسوم دیگر آن است که در این روش اندازه سلول‌ها و حتی ضخامت جداره‌ی آن‌ها از قبل به صورت دقیق قابل تعیین است و بنابراین می‌توان از این خاصیت برای تغییر عملکرد ماده‌ی سلولی استفاده کرد، عاملی که ایده‌ی اصلی برای پژوهشی است که در این مقاله به آن پرداخته شده است. در این مقاله ریزساختار فوم فلزی تولید شده به روش بریزینگ به صورت پوسته‌های کروی مماس بر هم که دانه‌بندی آن‌ها از تابع توزیع گاما^۲ پیروی می‌کند، در چارچوب روش اجزای محدود غیرخطی شبیه‌سازی شده و در دو حالت نسبت شعاع به ضخامت یکسان و ضخامت ثابت سلول‌ها تحت بارگذاری تک محوری فشاری بررسی قرار می‌گیرد. دیگر عوامل مورد بررسی برای تعیین اثر آن‌ها بر رفتار مکانیکی عبارتند از: اندازه‌ی میانگین سلول‌ها، پراکندگی اندازه‌ی سلول‌ها و چگالی نسبی.

۲- ریزمدل سازی ساختار فوم

۲-۱- تولید هندسه ریزساختار

اولین گام در شبیه سازی فوم تولید شده به روش بریزینگ،

ای به شدت متخلخل ایجاد می‌کند [۸]. در اغلب نمونه‌ها، سلول‌های مجزا پوسته‌های کروی^۱ هستند که تولید آن‌ها به سادگی امکان‌پذیر است. در روش بریزینگ ابتدا کره‌های تشکیل دهنده‌ی ریزساختار بر روی هم انباشته می‌شوند و عامل متصل کننده به صورت یک پودر فلزی در محل تماس کره‌ها اضافه می‌شود. با حرارت دادن مجموعه تا حد دمای ذوب فلز پودری، پودر حالت خمیری به خود گرفته و در محل تماس کره‌ها پخش می‌شود که با سرد کردن مجموعه، ساختاری یکپارچه ایجاد می‌کند. بنابراین در این روش ماده سازنده‌ی سلول‌های پایه دست نخورده باقی می‌ماند در حالی که در روش جوش دادن، دما بالاتر از دمای ذوب فلز پایه است [۹]. شکل ۳ نحوه‌ی اتصال کره‌های مماس در روش تولید بریزینگ را نشان می‌دهد.



ب

شکل (۲) فوم تحت بارگذاری فشاری تک محوری [۶]. (الف) منحنی تنش-کرنش فشاری و (ب) قابلیت تحمل تغییر شکل بزرگ.

2- Gamma distribution

1- Hollow sphere

مکعبی باید حداقل شش تا هفت برابر بزرگترین سلول سازنده ریزساختار باشد تا آثار تصادفی بودن حذف شود. از آن جایی که هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر ساختار سلولی بر رفتار فوم تولید شده به روش بریزینگ است، از تابع توزیع گاما به منظور کنترل ریزساختار استفاده شده است. تابع توزیع گاما عبارت است از

$$P_{x,x+dx} = \frac{x^{a-1}}{b^a \Gamma(a)} e^{-\frac{x}{b}} dx, x > 0 \quad (1)$$

در این تابع توزیع، ab برابر میانگین و ab^2 انحراف معیار می‌باشند و $\Gamma(a)$ تابع گاما است و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty t^{a-1} e^{-t} dt \quad (2)$$

بنابراین با تغییر دو پارامتر a و b می‌توان ساختارهای متفاوتی از سلول‌های کروی ایجاد کرد.

در این پژوهش از سه اندازه‌ی کاربردی شعاع میانگین ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر و دو انحراف معیار ۰/۵ و ۱ میلی‌متر استفاده شده است. به همین دلیل ابعاد نمونه‌های مکعبی برابر با ۵۰ میلی‌متر لحاظ شده تا ملاحظات RVE منظور شود.

دو حالت متفاوت برای ضخامت پوسته‌های کروی در نظر گرفته می‌شود.

• **حالت (الف):** در این حالت نسبت ضخامت دیواره به شعاع، α ، برای تمام کره‌ها ثابت فرض می‌شود. در این صورت و با فرض کوچک بودن مقدار α ، می‌توان ضخامت جداره را برای هر کره از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$t = \frac{1}{3} R \frac{\rho}{\rho_M} = \frac{1}{3} R \rho^* \quad (3)$$

در این رابطه ρ_M ، ρ و ρ^* به ترتیب چگالی ماده‌ی سازنده‌ی فوم، چگالی فوم و چگالی نسبی فوم است.

تولید هندسه‌ی آن است، یعنی در گام ابتدایی باید انباشته‌ای از کره‌هایی که از منحنی سلول‌بندی خاصی تبعیت می‌کنند به صورت عددی تهیه شود. مسئله انباشتن^۱ فضا به کمک اشکال هندسی مختلف، با توجه به نیاز بسیاری از رشته‌های گوناگون، مسأله‌ای کاربردی است که تاکنون پژوهش‌های انبوهی در آن صورت گرفته است. در این میان پرکردن سطوح با مجموعه‌ای از دایره‌ها و یا انباشتن فضای سه بعدی با کره‌ها، از ویژگی و اهمیت خاصی برخوردار بوده و روش‌های متنوعی برای این منظور پیشنهاد شده است. به صورت کلی تمامی این روش‌ها را می‌توان در دو گروه مجزا دسته بندی نمود [۹]: (۱) روش‌های پویا^۲ و (۲) روش‌های ساختاری^۳. در روش‌های پویا موقعیت اجزا بر پایه‌ی حل معادلات تعادل و اعمال نیرو و جا به جایی در دامنه‌ی ابتدایی محاسبه می‌شود و به همین دلیل روش‌های پویا از دیدگاه محاسباتی و مدت زمان حل مسأله پرهزینه است. اما در روش‌های ساختاری موقعیت هر دانه تنها با کمک محاسبات هندسی تعیین می‌شود و بنابراین در مقایسه با روش‌های پویا حجم محاسبات کمتری را دارند.

از جمله‌ی بهترین روش‌های ساختاری برای پرکردن فضا به وسیله‌ی کره‌ها می‌توان به روش آکنندن درون‌سو^۴ اشاره کرد که در سال ۲۰۰۵ توسط بگی ارائه شد [۱۰]. این روش در سال ۲۰۰۹ به وسیله‌ی بنابو و همکاران [۱۱] به لحاظ سرعت و درصد انباشتن ارتقاء یافت. در این پژوهش برای ایجاد انباشته‌ای از کره‌های مماس برهم برنامه‌ای بر اساس آخرین نسخه این روش تهیه شده که قادر است هر فضای مکعبی را از کره‌های متفاوت پر کند. لازم به ذکر است که، با توجه به مفهوم RVE^۵، اندازه ابعاد نمونه‌ی

1- Packing
2- Dynamic methods
3- Constructive methods
4- Inwards packing method
5- Representative Volume Element

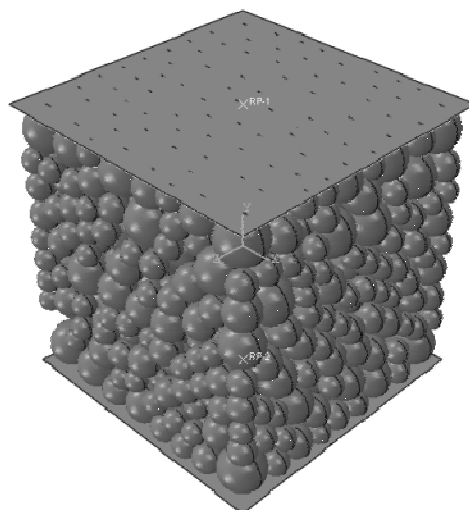
• **حالت (ب):** در این حالت ضخامت تمام پوسته‌ها یکسان فرض می‌شود. بنابراین ضخامت را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$t = \frac{1}{\sum_{i=1}^n 4\pi R_i^2} V \rho^* \quad (4)$$

در این رابطه n تعداد کره‌های تشکیل‌دهنده‌ی ریزساختار و V حجم فضای پر شده توسط کره‌ها است. در این مقاله دو چگالی نسبی ۵ و ۱۰ درصد مطالعه شده است.

۲-۲- مدل سازی هندسی نمونه‌ها در نرم افزار اجزای محدود آباکوس

با توجه به تعداد زیاد کره‌های شبیه سازی شده، فرایند انتقال آن‌ها به نرم افزار آباکوس از طریق دستی امکان پذیر نبوده و لازم است که این امر به وسیله‌ی نگارش یک برنامه به صورت خودکار انجام شود این اطلاعات در نرم‌افزار آباکوس به فرمت زبان برنامه نویسی پایتون^۱ قابل خواندن است.



شکل (۴) ریز مدل مکعبی ساخته شده برای فوم به وسیله‌ی کره‌های مماس بر هم با بعد ۵۰ میلی‌متر و اعمال بارگذاری تک محوری فشاری.

نگارش پایتون مورد نیاز در این پژوهش به وسیله‌ی یک برنامه‌ی کمکی صورت می‌گیرد. در ساختار کلی، این برنامه بر اساس شعاع و مختصات مرکز هر کره اقدام به تولید آن نموده و اطلاعات آن را در ساختار زبان برنامه‌نویسی پایتون قرار می‌دهد. در گام بعدی این فایل که شامل هندسه‌ی کره‌های مماس بر هم، مشخصات ماده‌ی پایه‌ی آن و ضخامت کره‌ها می‌باشد به عنوان یک فایل ورودی در داخل نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفته و پس از تکمیل مدل‌سازی، برنامه اجرا می‌شود. در شکل ۴ یک نمونه از مدل‌های ساخته شده نشان داده شده است.

۲-۳- مش بندی نمونه‌ها و کنترل حد پایداری

کره‌ها با المان پوسته‌ای S4R [۱۲] با اندازه‌ی متوسط المان ۱ میلی‌متر مش‌بندی شده‌اند به گونه‌ای که مدل کوچک-ترین کره هم دارای حداقل ۵۰ المان باشد. برای اطمینان از کفایت مش‌بندی انجام شده برای یکی از نمونه‌ها مش‌بندی دو برابر ریزتر شد اما مقایسه نتایج با یکدیگر تفاوت محسوسی را نشان نداد. مدل ساخته شده دارای تعداد زیادی کره می‌باشد و همچنین به دلیل نوع تماس تعریف شده بین کره‌ها اجرای برنامه زمان‌بر بوده و به همین دلیل برای سرعت در زمان اجرای برنامه از مقیاس دهی جرمی^۲ استفاده شده است. باید توجه داشت که به منظور جلوگیری از ایجاد خطای غیرقابل قبول در محاسبات، مقادیر انرژی جنبشی و انرژی داخلی کنترل گردیده است به گونه‌ای که انرژی جنبشی از ۵ درصد انرژی کل تجاوز نکند.

۲-۴- تعریف تماس‌ها در ریز مدل

برای شبیه سازی اتصال بریزینگ بین کرات مماس بر هم، از قید گره^۳ استفاده شده است. برای این منظور در مدل-

2- Mass scaling
3- Tie constraint

1- Python

همان‌گونه که اشاره شد، نمونه‌های بررسی شده مکعب‌هایی به ابعاد ۵۰ میلی‌متر از کره‌های مماس بر هم است. به منظور بارگذاری یکنواخت بر روی نمونه از دو سطح صلب در دو وجه بالایی و پایینی استفاده شده است (شکل ۴). هر دوازده نمونه‌ی مدل‌سازی شده به صورت کنترل شونده‌ی تغییر مکانی تحت بارگذاری تک محوری فشاری استاتیکی قرار گرفته‌اند.

۳- تحلیل‌ها و ارایه‌ی نتایج

همان‌گونه که بیان شد، نمونه‌های مکعبی از کره‌هایی با شعاع‌های میانگین ۳، ۴ و ۵ با دو واریانس ۰/۵ و ۱ میلی‌متر که دانه‌بندی آن‌ها طبق تابع توزیع گاما به دست آمده است با دو چگالی نسبی ۵ و ۱۰ درصد در دو حالت نسبت ضخامت به شعاع ثابت و ضخامت ثابت در نرم افزار اجزای محدود آباکوس شبیه‌سازی و طبق شرایط بیان شده در بخش قبل تحت بارگذاری تک محوری فشاری قرار گرفتند. نتایج خروجی‌های به دست آمده برای هر نمونه که به شکل نمودار تنش-کرنش است با هم مقایسه شدند. شکل کلی نمودار تنش-کرنش تک محوری فشاری برای نمونه‌ها مانند شکل ۵ است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که نمودار شامل یک ناحیه‌ی ارتجاعی و یک ناحیه‌ی تنش پایا است.

در شکل (۶) نیز تغییر شکل یکی از نمونه‌های فوم تحت بارگذاری تک محوری فشاری نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که نمونه‌های فومی قابلیت تحمل تغییر شکل‌های بزرگ را دارند و مشاهده می‌شود که نمونه بدون ایجاد تغییر شکل جانبی قابل توجه تنها فشرده شده است که این به معنای وجود ضریب پواسون نزدیک به صفر این دسته از مواد و قابلیت جذب انرژی است.

نتایج تحلیل‌های انجام شده روی نمونه‌ها در جدول (۲) در دو حالت الف و ب آورده شده است. این نتایج شامل مدول ارتجاعی اولیه و تنش تسلیم است.

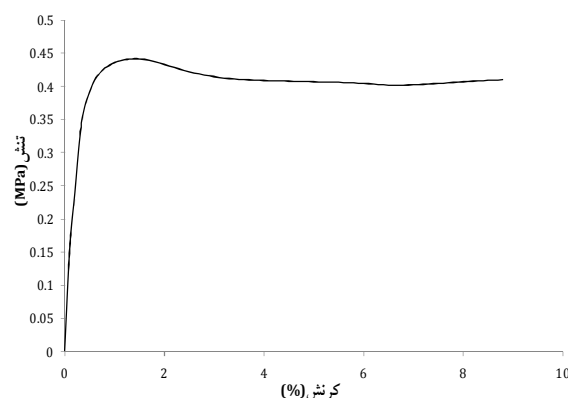
سازی انجام شده، این به هم پیوستگی به صورت وابسته کردن درجات آزادی گره‌های نزدیک به محل تماس در دو کره‌ی مرتبط انجام می‌شود. با اعمال این نوع تماس بین کره‌ها علاوه بر این‌که درجات آزادی هر دو کره در محل تماس یکی می‌شود از فرو رفتن دو کره در هم نیز جلوگیری به عمل می‌آید. همچنین تماس بین تمام اجزای تشکیل دهنده‌ی مدل از نوع تماس با خود^۱ تعریف شده است تا هیچ‌گونه در هم فرو رفتگی به وجود نیاید.

۲-۵ ویژگی‌های مکانیکی فلز پایه، بارگذاری نمونه‌ها و شرایط مرزی

از آلیاژ آلومینیوم با نام تجاری AL 3003 H12 در شبیه‌سازی فلز پایه استفاده شده است. با توجه به دقت مناسب سطح تسلیم فوم میسر برای فلزاتی مانند آلومینیم از این مدل با ویژگی‌های ارائه شده در جدول (۱) استفاده شده است.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی و مکانیکی AL 3003 H12 [۱۳]

چگالی (Kg/m^3)	۲۷۰۰
مدول ارتجاعی (MPa)	۶۹۰۰۰
ضریب پواسون	۰/۳۳
تنش تسلیم (MPa)	۱۲۵



شکل (۵) نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی فومی مدل شده تحت بارگذاری فشاری تک محوری برای نمونه‌ی ۱ در حالت الف

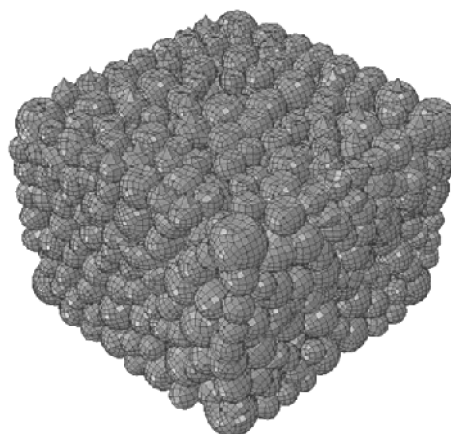
1- Self contact

نوع کاربری آن به دست می‌آید.

- در یک شعاع و چگالی نسبی ثابت با افزایش واریانس شعاع‌ها، به دلیل این که کره‌های با شعاع‌های متفاوت بیشتری به وجود می‌آیند و کره‌های کوچک‌تر با قرارگیری در بین کره‌های بزرگ‌تر قفل و بست بیشتری تولید می‌کنند، میزان سختی ماده افزایش می‌یابد.

- در یک واریانس شعاع و چگالی نسبی ثابت، با افزایش شعاع نمونه‌ها مقدار مدول ارتجاعی و تنش تسلیم نمونه‌ها به دلیل کم شدن تعداد کره‌ها و درگیری کمتر کره‌ها کاهش می‌یابد.

- در یک شعاع و چگالی نسبی ثابت با افزایش واریانس شعاع‌ها، مقدار تنش تسلیم در نمونه‌های با شعاع متوسط ۳ و ۴ کاهش یافته اما در نمونه‌ی با شعاع متوسط ۵ افزایش یافته است. دلیل این امر این است که در حالت نمونه‌ی با شعاع متوسط ۵ تعداد کره‌های بیشتری با شعاع بیشتر از شعاع میانگین وجود دارد که موجب بالا رفتن مقدار تنش تسلیم می‌شوند.



شکل (۶) شکل تغییر شکل یافته‌ی نمونه‌ی فومی مدل شده تحت بارگذاری فشاری تک محوری.

با توجه به مقادیر به دست آمده برای حالت الف و ب، نتایج زیر قابل استخراج است.

- افزایش چگالی نسبی به شدت مدول ارتجاعی و تنش تسلیم را افزایش می‌دهد، اما افزایش چگالی نسبی با افزایش وزن سازه همراه است که مقدار بهینه‌ی چگالی نسبی با کمینه کردن وزن سازه‌ی مورد نظر با در نظر گرفتن

جدول (۲) نتایج بارگذاری‌های تک محوری فشاری انجام شده روی نمونه‌ها در دو حالت الف و ب

نمونه	شعاع میانگین (میلی متر)	واریانس	چگالی نسبی (%)	مدول ارتجاعی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مدول ارتجاعی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
				حالت الف		حالت ب	
۱	۳	۰/۵	۵	۱۰۸/۴۹	۰/۴۰	۳۱۱/۰۸	۰/۸۳
۲		۰/۵	۱۰	۲۶۸/۳۷	۱/۰۷	۷۳۱/۴۹	۲/۶۰
۳		۱/۰	۵	۱۱۸/۷۷	۰/۳۹	۳۳۱/۵۸	۰/۸۱
۴		۱/۰	۱۰	۲۹۹/۷۱	۱/۰۵	۸۱۱/۷۸	۲/۵۰
۵	۴	۰/۵	۵	۱۰۲/۱۰	۰/۳۹	۳۰۳/۹۲	۰/۸۱
۶		۰/۵	۱۰	۲۵۰/۷۴	۱/۰۰	۷۱۰/۱۱	۲/۳۰
۷		۱/۰	۵	۱۰۳/۸۰	۰/۳۵	۳۲۷/۹۸	۰/۸۰
۸		۱/۰	۱۰	۲۵۱/۰۹	۰/۹۵	۸۰۱/۸۲	۲/۱۰
۹	۵	۰/۵	۵	۷۶/۰۸	۰/۲۶	۲۷۶/۸۲	۰/۶۰
۱۰		۰/۵	۱۰	۲۱۵/۵۳	۰/۷۴	۶۵۹/۵۴	۱/۹۰
۱۱		۱/۰	۵	۹۵/۱۰	۰/۳۲	۳۱۳/۲۶	۰/۷۳
۱۲		۱/۰	۱۰	۲۳۰/۴۴	۰/۹۱	۷۸۱/۲۰	۲/۰

دلیل به وجود آوردن قفل و بست بیشتر در نمونه‌ها موجب افزایش مدول ارتجاعی و تنش تسلیم می‌شود و افزایش شعاع میانگین دانه‌های ریزساختار، کاهش مدول ارتجاعی و تنش تسلیم نمونه را به دلیل کم شدن تعداد کره‌ها، به همراه دارد همچنین مشاهده شد که در حالت ب به دلیل این که کره‌های با شعاع کوچک دارای ضخامت‌های بزرگی می‌باشند و رفتاری به تقریب مانند کره‌های توپر پیدا می‌کنند موجب افزایش مدول ارتجاعی و تنش تسلیم به میزان بسیار زیادی می‌شوند.

۵- فهرست مراجع

[۱] داودی کیا عبدالله، (۱۳۸۹)، "تعیین رفتار ارتجاعی-خمیری فوم‌های فلزی به کمک روش ریزمدل‌سازی"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد گروه مهندسی سازه، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

- [2] Banhart, J., (2001), "Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams," Progress in Materials Science, 46, 559-632.
- [3] Branner, K., (1995), "Capacity and Lifetime of Foam Core Sandwich Structures," Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark.
- [4] Jang, W.Y., (2008), "On the Compressive Response of Open Cell Aluminum Foams," Ph.D Dissertation, Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, University of Texas at Austin.
- [5] Manalo, A., (2011), "Behaviour of Fibre Composite Sandwich Structures: A Case Study on Railway Sleeper Application", Ph.D Dissertation, Department of Engineering and Surveying, Southern Queensland University.
- [6] Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G., (2000), "Metal Foams: A Design Guide," Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [7] Mills, N.J., (2007), "Polymer Foams Handbook, Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide," Butterworth-Heinemann, Oxford.

• در یک شعاع و چگالی نسبی ثابت با افزایش واریانس شعاع‌ها، مقدار افزایش مدول ارتجاعی برای نمونه‌های با شعاع متوسط ۳ و ۵ نسبت به نمونه‌ی با شعاع متوسط ۴ تغییرات محسوس‌تری دارد. دلیل این امر این است که چون شعاع نمونه‌ها بین ۲ و ۶ قرار دارد، نمونه‌ی با شعاع متوسط ۴ روی میانگین بیشترین و کمترین شعاع قرار دارد. با مقایسه‌ی مدول ارتجاعی و تنش تسلیم برای هر دوازده نمونه‌ی حالت الف با حالت ب مشاهده می‌شود که مقادیر حالت ب نسبت به حالت الف بسیار بیشتر است به گونه‌ای که به تقریب تنش تسلیم دو برابر و مدول ارتجاعی سه برابر افزایش پیدا کرده است. دلیل این امر این است که در این حالت کره‌های با شعاع کوچک دارای ضخامت‌های بسیار بزرگی می‌باشند و به تقریب مانند کره‌های توپر رفتار می‌کنند. این کره‌ها بیشترین سهم را در تحمل بارهای وارده دارند و موجب افزایش مقاومت و مدول ارتجاعی به میزان بسیار زیادی می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ریزساختار فوم‌های فلزی سلول بسته تولید شده به روش بریزینگ به صورت پوسته‌های کروی مماس بر هم در دو حالت الف (نسبت شعاع به ضخامت یکسان برای هر نمونه) و ب (ضخامت یکسان در هر نمونه برای تمام کره‌ها) در چارچوب روش اجزای محدود غیرخطی شبیه‌سازی شده و تأثیر نحوه‌ی دانه‌بندی، اندازه و ضخامت دیواره‌ی دانه‌های تشکیل دهنده‌ی ریزساختار و همچنین چگالی نسبی، بر مقاومت و سختی ماده مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های شبیه‌سازی شده تحت بارگذاری تک محوری فشاری استاتیکی قرار داده شدند. نتایج تحلیل‌های انجام شده روی نمونه‌ها در هر دو حالت الف و ب نشان می‌دهند که واریانس بیشتر شعاع دانه‌های ریزساختار به

- [11] Benabbou, A., Borouchaki, H., Laug, P., Lu, J., (2009), "Geometrical Modeling of Granular Structures in Two and Three Dimensions. Application to Nanostructures," International Journal for Numerical Methods in Engineering, 80, 425-454.
- [12] Abaqus Analysis User Manual, Abaqus 6.10.1.
- [8] Öechsner, A., Augustin, C., (2009), "Multifunctional Metallic Hollow Sphere Structures: Manufacturing, Properties and Application," Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [9] Ainali, M., (2007), "Brazing Handbook," American Welding Society, 5th Edition.
- [10] Bagi, K., (2005), "An Algorithm to Generate Random Dense Arrangements for Discrete Element Simulations of Granular Assemblies," Granular Matter, 7, 31-43.

A Numerical Study on the Uniaxial Mechanical Properties of Metal Foams with Spherical Cellular Structure

A. Souri¹, S. Shahbeyk^{2*}, D. Rahiminejad³

1- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Assistant Prof. of Structural Eng., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

3- M.Sc. in Mechanical Engineering, School of Mechanical Eng., Iran University of Sciences & Technology

shahbeyk@modares.ac.ir

Abstract:

Metal foams as a new class of materials with interesting properties such as high stiffness and strength to density ratios, capacity to absorb impact energy, and reproducibility, are rapidly growing their share in advanced materials market. However, due to their porous microstructure, experimental investigations of their properties are not trivial and normally need rigorous procedures and high end equipments. Accordingly, there is a growing research interest towards the numerical modeling of their cellular structure in which the following three kinds of models have been commonly employed: (1) structures based on a unit cell or a building block, (2) random Voronoi diagrams, and (3) CAD data provided by X-ray micro-computed tomography. In the current study, the mesostructure of aluminum foam produced by the brazing technique is simulated as a connected assembly of spherical shells. The latest inward packing scheme from the set of constructive algorithms is incorporated to efficiently pack the spheres in space. The Gamma distribution is used to control the cell diameters. Three mean values of 3, 4, and 5 mm and two variances of 0.5 and 1.0 mm are assumed for the radii of spheres and cubic specimens of 50 mm are generated. Two assumptions of constant thickness and constant thickness to radius ratio have been applied to the spherical shells. Two relative densities of 0.05 and 0.1 have been examined in the current study. A code is written to automatically transfer these geometrical data to ABAQUS FE program. The models are then meshed in 1 mm S4R shell elements. Tie contacts are defined between neighbor spheres. Furthermore, self contact is used to prevent any probable penetrations in the models. The foaming material is assumed to be AL 3003 H12 with elastic-perfectly plastic behavior. Next, the uniaxial load is applied by means of two rigid planes and the stress-strain curves are extracted. Main attention has been paid to the elastic modulus and initial yield stress of foam. It is observed that keeping the mean value of the radius and increasing its variance lead to the generation of more small spheres within the microstructure which itself increases the number of interactions inside the foam and thus increases elastic modulus and yield stress. The results also show that, for both thickness assumptions made here, increasing the mean radius of spheres decreases the number of spheres and their interaction points and subsequently weakens their uniaxial mechanical properties. Furthermore, compared to foams generated based on the constant thickness to radius ratio assumption, the presence of thick small spheres in foams with cells of constant thickness makes them stiffer and stronger. This effect is more pronounced in foam with higher densities.

Keywords: Closed-cell Metal Foam, Brazing, Microstructure, Finite Element Method, Gamma Distribution