



## مدل سازی هندسی فوم های فلزی سلول بسته به روش تولید سلول های اتفاقی

محمد حسین پور گلو<sup>۱\*</sup>، مسعود عباس زاده<sup>۲</sup>، ایرج میرزایی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه  
۳- استادیار گروه تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه  
\*تهران، صندوق پستی: ۱۳۶-۱۶۷۸۵، [m.hoseinpour@srttu.edu](mailto:m.hoseinpour@srttu.edu)

### چکیده

فوم های فلزی دسته ی جدیدی از مواد هستند که در دهه ی اخیر به دلیل مشخصات مکانیکی و فیزیکی خوب مانند چگالی کم و در عین حال مقاومت فشاری بالا، و همچنین مشخصات حرارتی خوب، که آن ها را به عایق حرارتی خوب مبدل کرده است، مورد استفاده محققان قرار گرفته اند. دلیل عمده خاصیت فوم ها، وجود حفره در درون آن ها است که به صورت تصادفی در آن ها پخش شده اند. با توجه به اهمیت این مواد در مهندسی و دیگر کاربردهای آن، مدل سازی این مواد مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، روش جدیدی برای مدل کردن فوم های سلول بسته ارائه شده و یک برنامه در محیط ماکروی نرم افزار کتیا به زبان ویژوال بیسیک نوشته شده است که مدل کردن فوم های فلزی را با اندازه ی حفره و چگالی کنترل شده، ممکن ساخته است. در گام بعدی تأثیر اندازه ی حفره ها و تعداد حفره ها بر روی چگالی نسبی این فوم ها مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه ی خواص فوم های مدل شده با استفاده از الگوریتم ارائه شده و فوم های واقعی مطابقت خوبی را نشان داده است. همچنین فوم های مدل شده امکان وارد شدن در نرم افزار های روش های اجزای محدود را دارند.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۰۹ شهریور ۱۳۹۲  
پذیرش: ۱۴ مهر ۱۳۹۲  
ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳  
کلید واژگان:  
فوم های فلزی  
فوم های سلول بسته  
چگالی نسبی  
مدل سازی

## Geometrical modeling of closed-cell metal foams using Stochastic cells generation

Mohammad Hosseinpour Gollo<sup>1</sup>, Masoud Abbaszadeh<sup>2</sup>, Iraj Mirzaee<sup>3</sup>

1- Assistant Prof., Dept. of Mech. Eng., Shahid Rajaee Teacher training Univ., Tehran, Iran  
2- M.Sc. Student, Dept. of Mech. Eng., Urmia Univ. of Tech., Urmia, Iran  
3- Prof., Urmia Univ. of Tech., Urmia, Iran  
\* Iran, Tehran, P.O.B.: 16785-136, [m.hoseinpour@srttu.edu](mailto:m.hoseinpour@srttu.edu)

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 31 August 2013  
Accepted 06 October 2013  
Available Online 11 May 2014

#### Keywords:

Metal Foams  
Closed-Cell Foams  
Relative Density  
Modeling

### ABSTRACT

Metal foams are a new class of materials which are being used excessively in recent decade for their good physical and mechanical properties such as low density yet high strength, as well as their good thermal properties which turned them to a good thermal insulator. The main reason for offering such characteristic is the existence of pores in them which are distributed randomly. Regarding their importance in engineering and other applications, efforts have been dedicated to model these materials. In this paper, a new method has been presented to model closed-cell foams and a Visual Basic code has been developed in macro environment of CATIA software which made it possible to model metallic foams with controllable pore size and density. In the next step, the effect of the pore size and number of the holes on the relative density of the foams have been studied. Properties of the modeled foams using presented algorithm and real foams has shown a good agreement. It is also possible to export these modeled foams into finite-element software.

### ۱- مقدمه

آن ها، مانعی برای استفاده ی موثر از این مواد شده است. استفاده از قطعات ساخته شده از فوم های فلزی و یا استفاده ی آن ها به عنوان پرکننده برای سازه های توخالی نیازمند دانش عمیق از رفتار ساختاری آن ها است. طراحان برای محاسبه ی تنش های وارده و پیش بینی شکست و شکل دهی قطعات فوم فلزی علاوه بر نتایج تجربی، نیازمند روش هایی تحلیلی یا عددی نسبتاً ساده و قابل اعتماد هستند. از این رو محققان بر آن شده اند تا روش هایی عددی و تئوری برای این دسته از مواد ارائه دهند. سنتوسا و ویرزبیک [۱] مدلی را برای تحلیل ورق های فوم حفره بسته

فوم های فلزی موادی با چگالی اندک و خواص فیزیکی، مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی ویژه هستند که هنوز به طور کامل و جامع مورد مطالعه و تحقیق قرار نگرفته اند. این مواد انتخاب مناسبی برای تولید ساختارهای سبک، سازه های جاذب انرژی، امواج و همچنین مدیریت حرارتی هستند. از جمله کاربردهای عمده فوم های فلزی و به خصوص فوم های آلومینیومی در صنایع خودروسازی، صنایع دفاعی و هوافضا است. با وجود کاربردهای فراوان این گروه از مواد، نبود روش های عددی خوب برای مدل سازی و شبیه سازی

### Please cite this article using:

M. Hosseinpour Gollo, M. Abbaszadeh, I. Mirzaee, Geometrical modeling of closed-cell metal foams using Stochastic cells generation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 129-135, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پلاستیکی فوم های آلومینیومی حفره بسته را تحت بارهای فشاری تک محوره مورد مطالعه قرار داد. آن ها به این نتیجه رسیدند که کنترل خواص پلاستیکی مواد دیواره سلول ها با افزودن یک فلز مناسب، روش موثر و کارآمدی برای بهبود ظرفیت جذب انرژی فوم ها است. ویل و همکارانش [۱۰] با روندی مشابه به آنچه که ژنون [۷] به کار برده بود، توانست فوم آلومینیومی حفره باز و بسته را مدل کند و به این ترتیب، توانست مشخصات مکانیکی ماکروسکوپی این فوم ها را تحت بارهای فشاری تک محوری مورد بررسی قرار دهد. آن ها دریافتند که چگالی نسبی<sup>۱</sup> رابطه ای مستقیم با خصوصیت ماده دارد. میدزینسکا به همراه همکارانش [۱۱] با استفاده از دستگاه ایکس-ری<sup>۲</sup> و با روندی مشابه به روند ژنون [۷] توانستند فوم های حفره باز با تعداد پرز بر اینچ های<sup>۳</sup> مختلف را مدل کنند. آن ها همچنین رفتار تنش-کرنش این فوم ها را بررسی کرده و نتایج به دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند که مطابقت خوبی باهم داشت. داودی کیا و شاه بیک [۱۲] با استفاده از روش عددی، اثر ساختار سلولی بر سطح تسلیم فوم های فلزی دو بعدی را بررسی کردند. آن ها به این نتیجه رسیدند که سطح تسلیم فوم ها به میزان قابل توجهی متأثر از خمیدگی یال ها است. آن ها همچنین دریافتند که در یک چگالی نسبی ثابت با افزایش اندازه ی حفره ها، سطح تسلیم افزایش می یابد.

هدف این مقاله ارائه ی روشی جدید برای مدل سازی ورق های فوم حفره بسته است که قابلیت وارد شدن در نرم افزارهای اجزا محدود را برای تحلیل های عددی بعدی ممکن می سازد. در این مقاله همچنین، تأثیر اندازه ی حفره ها و تعداد حفره ها بر روی چگالی نسبی این فوم ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه، چگالی نسبی به دست آمده از فوم های مدل شده، با نمونه ی واقعی فوم مورد مقایسه قرار می گیرد. این مقایسه نشان داده است که روش ارائه شده، روش مناسبی برای مدل کردن فوم های فلزی است.

## ۲- روش مدل سازی

اساس مدل سازی فوم با این روش، خارج کردن حفره هایی که از یک حجم مشخص و تبدیل آن به فوم فلزی است. برای رسیدن به این هدف، برنامه ای در محیط ماکروی نرم افزار تجاری کتیا<sup>۴</sup>، که به زبان ویژوال بیسیک<sup>۵</sup> است، نوشته شد که قادر است پارامترهایی تصادفی برای تولید یک کره در محدوده شعاع های مشخص تولید کند. قابلیت های برنامه ی نوشته شده برای مدل کردن فوم حفره بسته عبارتند از:

- حفره ها به صورت تصادفی تولید می شوند.
- توزیع حفره ها در ورق فوم مدل شده یکنواخت است.
- بیشترین و کمترین اندازه حفره های موجود در ورق فوم مدل شده، قابل کنترل است.
- اندازه ی ضخامت دیواره ی فوم قابل کنترل است.
- چگالی فوم قابل کنترل است.

## ۳- الگوریتم برنامه

ابتدا برنامه، مشخصات فوم که عبارتند از، باز یا بسته بودن حفره ها، ابعاد فوم، محدوده ی اندازه حفره ها و میزان تخلخل حفره ها را دریافت کرده و معیبه ای با همین ابعاد تولید می کند، (شکل ۱).

ارائه کرده اند که از کنار هم قرار گرفتن شبکه های کوچک و بزرگ تشکیل می شد. این مدل شامل بخش های صلیبی و هرمی بود. آن ها با مدل ارائه شده رفتار فوم های آلومینیومی حفره بسته را تحت بارهای فشاری مورد بررسی قرار دادند که نتایج حاصل از آزمایشات تجربی مطابقت خوبی با نتایج عددی داشت. اندروس و همکارانش [۲] با استفاده از یک مدل دوبعدی لانه زنبوری رفتار خزشی فوم های آلومینیومی حفره بسته را مورد مطالعه قرار داده اند و نتایج به دست آمده را با داده های تجربی مورد مقایسه قرار دادند. آن ها نتیجه گرفتند که مدل آن ها، مدل مناسبی برای توصیف رفتار خزشی فوم های فلزی در تنش ها و دماهای پایین است. سنتوسا و همکارانش [۳] از یک کد غیرخطی متحرک صریح به نام پام کراش<sup>۶</sup> ۹۷ برای شبیه سازی عددی فرآیند خرد شدن ستون های پر شده از فوم، تحت بارهای محوری استفاده کردند و نتایج حاصل از این شبیه سازی را با نتایج تجربی خود مقایسه کردند. آن ها دریافتند که افزایش متوسط نیروی فشاری یک ستون پر شده وابستگی خطی با مقاومت فشاری فوم و سطح مقطع ستون دارد. میگیود و همکارانش [۴] مدلی شبیه به مدل سنتوسا و ویرزبیک برای تغییر شکل محلی فوم های فلزی بر اثر تغییرات چگالی و عیوب مواد آن ها ارائه کردند. در مدل آن ها بخش هرم صلیبی با یک بخش نیم کره جایگزین شده است. زیرا اعتقاد داشتند که سلول های فوم های فلزی به دلیل سطح بالای تنش در طول فرآیند انجماد، در طبیعت عمدتاً کره ای است. کونستانینیس و همکارانش [۵] یک مدل تحلیلی برای ارزیابی تأثیر هندسه حفره ها (دایروی، بیضوی، مستطیلی و مربعی) بر روی مدول یانگ و تنش در ورق های فوم آلومینیومی حفره بسته ارائه کردند.

آن ها دریافتند که نتایج حاصل از مدل ارائه شده توسط آن ها با حفره های بیضوی، نزدیکی بیشتری به نتایج تجربی دارد. استیلیس و همکارانش [۶] برای بررسی رفتار فوم های ساندویچی با هسته ی آلومینیومی تحت بارهای موجی، مدلی با استفاده از یک کد اجزا محدود ال-اس-دینا<sup>۷</sup> ارائه کردند. آن ها عملکرد مدل خود را با استفاده از مشاهدات تجربی مورد بررسی قرار دادند که تطابق نزدیکی با مدل ارائه شده توسط آن ها دارد. ژنون و همکارانش [۷] به صورت تجربی و با استفاده از تحلیل المان محدود، مشخصات مکانیکی دیواره ی سلول ها را برای فوم های حفره بسته مورد بررسی قرار دادند. آن ها با استفاده از دستگاه رادیو گرافی با دقت تمرکز بالا، تعداد ۲۵۷ عکس از ساختار درونی و بیرونی قطعه ی مورد بررسی تهیه کردند و سپس این عکس ها را با استفاده از برنامه تری/دی-بن<sup>۸</sup>، نرم افزار پردازش داده های اسکن شده ی سه بعدی و برنامه تجاری تولید مش، بازسازی کردند. دگیورگی و همکارانش [۸] مدلی ارائه کردند که قادر بود سادگی سلول هندسی ابتدائی و همچنین امکان تصادفی بودن سلول ها را فراهم کند. آن ها برای مدل کردن فوم مورد نظرشان، با استفاده از نرم افزار مطلب، به صورت یکنواخت و تصادفی، یک دسته از پارامترها را برای ایجاد بیضی گون های مدل خود تولید کردند. آن ها برای مدل کردن بیضی گون ها از یک نرم افزار طراحی به کمک رایانه<sup>۹</sup> استفاده کردند که قادر بود پارامترهای تولیدی آن ها را به صورتی که قابل استفاده در نرم افزار آباکوس باشد، تبدیل کند. نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت که نزدیکی خوبی به هم داشتند. ژنون در مطالعه ای دیگر به همراه همکارانش [۹] با استفاده از مدل خود [۷] فروپاشی

5- pRelative  
6- X-Ray  
7- PPI  
8- CATIA V5R18  
9- MS VBA

1- PAM CRASH 97  
2- LS-DYNA  
3- TRI/3D-BON  
4- Computer Aided Design (CAD)

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است مرکز دستگاه مختصات کروی بر روی مرکز کره ای اول قرار گرفته و کره ای دوم دقیقاً از محل  $\theta = 0$  و  $\varphi = 0$  و با شعاع تصادفی ایجاد می شود. دستگاه مختصات کروی در هر مرحله بر روی مرکز کره ای مرجع قرار می گیرد.

$$NR = ((Max\_R - Min\_R) \times Rnd + Min\_R) \quad (1)$$

$$Max\_dr = (NR + RR) \times \alpha \quad (2)$$

$$Min\_dr = (NR + RR) \times \beta \quad (3)$$

$$dr = (Max\_dr - Min\_dr) \times Rnd + Min\_dr \quad (4)$$

میزان تداخل کره های اطراف با کره ای مرجع، همان طور که در معادله ۲ و ۳ مشاهده می شود، توسط ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  مشخص می شود. برای فوم های حفره بسته تمامی ضرایب مربوط به تداخل کره ها، ۱ در نظر گرفته می شود. با ضرایب  $\alpha = 1$  و  $\beta = 1$  در معادله ۴، برابر جمع شعاع مرجع و شعاع جدید خواهد بود. در واقع، فاصله ی بین کره ها به سمت صفر میل می کند و به حالت واقعی نزدیک تر می شود، (شکل ۴).

کدهای مربوط به تولید کره های اطراف در روابط (۴-۱) آورده شده است. که در آن  $NR$ ، شعاع کره ای مرجع،  $NR$ ، شعاع تصادفی تولید شده برای کره ای جدید،  $dr$ ، فاصله مراکز کره های اطراف با مرکز کره ای مرجع،  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب بیشترین و کمترین ضریب تداخل کره های اطراف با کره ای مرجع هستند. در ادامه، برنامه برای ایجاد کره ای سوم،  $\theta$  را صفر گرفته و برای  $\varphi$ ، عددی تصادفی بین صفر و ۱۵ تولید می کند و با دیگر پارامترهای تولیدی،  $NX$ ،  $NY$ ،  $NZ$ ،  $NR$  (روابط ۸-۵) کره ای ایجاد می کند که اگر با کره های اطراف تداخل نداشته باشد، به عبارت دیگر اگر پارامتر  $L$  بزرگ تر از صفر باشد، کره از حجم کم می شود. پارامتر  $L$  با رابطه ی (۵) به  $\gamma$  که میزان تداخل کره های اطراف با یکدیگر است، مربوط می شود.  $NX$ ،  $NY$  و  $NZ$ ، موقعیت مرکز کره ای جدید را مشخص می کند، (شکل ۵).

$$L = \sqrt{(x_n - x(Ref))^2 + (y_n - y(Ref))^2 + (z_n - z(Ref))^2} - (R_n + R(ref)) \times \gamma \quad (5)$$

$$NX = dr \times \cos(\theta) \times \sin(\theta) + x(Ref) \quad (6)$$

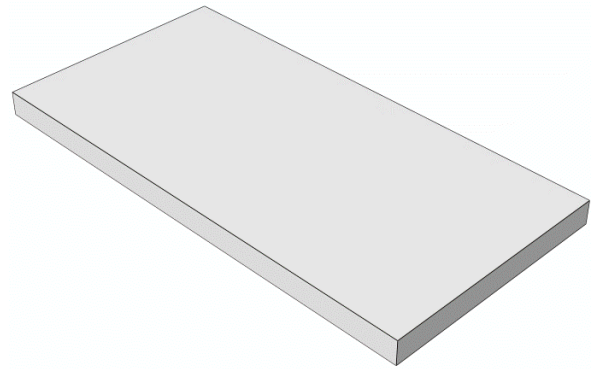
$$NY = dr \times \cos(\theta) \times \cos(\varphi) + x(Ref) \quad (7)$$

$$NZ = dr \times \sin(\theta) + z(Ref) \quad (8)$$

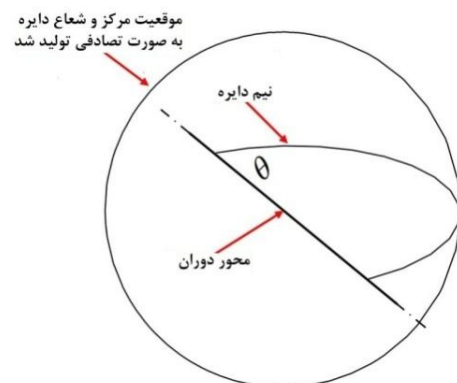
اگر کره ای مورد نظر نتواند شرط موجود را ارضا کند، زاویه ی  $\varphi$  به اندازه ی گام زاویه ای، که در اینجا برابر ۱۵ است، افزایش می یابد؛ به این معنی که برنامه، عددی تصادفی برای  $\varphi$  بین ۱۵ و ۳۰ تولید می کند و همان طور که در فلوجارت شکل ۶ مشخص شده است، این روند تا زمانی ادامه می یابد که  $\varphi$  به ۳۶۰ برسد. شکل ۷ وضعیت کره ها را برای کره ای مرجع ۱، از  $\varphi = 0$  تا ۳۶۰ و  $\theta = 0$  نشان می دهد.

این بار برنامه،  $\theta$  را به اندازه گام زاویه ای افزایش می دهد و عددی تصادفی برای  $\theta$  بین ۹۰ و ۷۵- تولید می کند، و همین روند را ادامه می دهد تا  $\theta$  به ۹۰ برسد. شکل ۸ وضعیت کره ها را برای کره ای مرجع ۱، و یک حلقه کامل نشان می دهد.

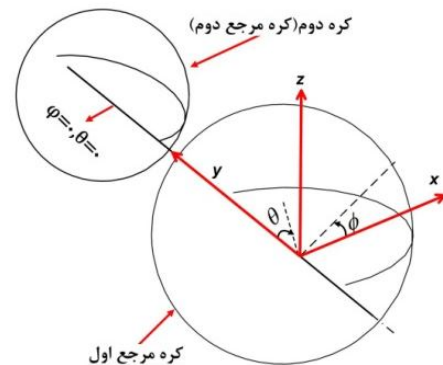
برنامه بعد از یک حلقه کامل، اگر دیگر نتواند کره ای کم کند، کره ای مرجع را تغییر داده و کره ای دوم را به عنوان کره ای مرجع گرفته و کره ها را این بار از اطراف کره ای دوم کم می کند.



شکل ۱ مکعب تولید شده (حجم فوم)

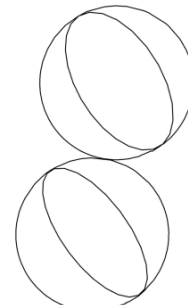


شکل ۲ کره مرجع اول



شکل ۳ وضعیت کره ای دوم نسبت به کره ای اول

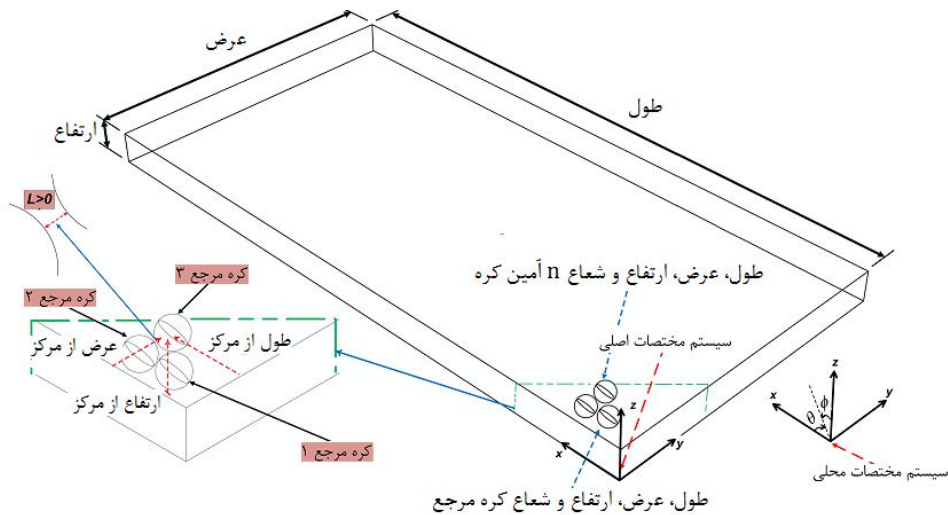
ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  برابر با ۱



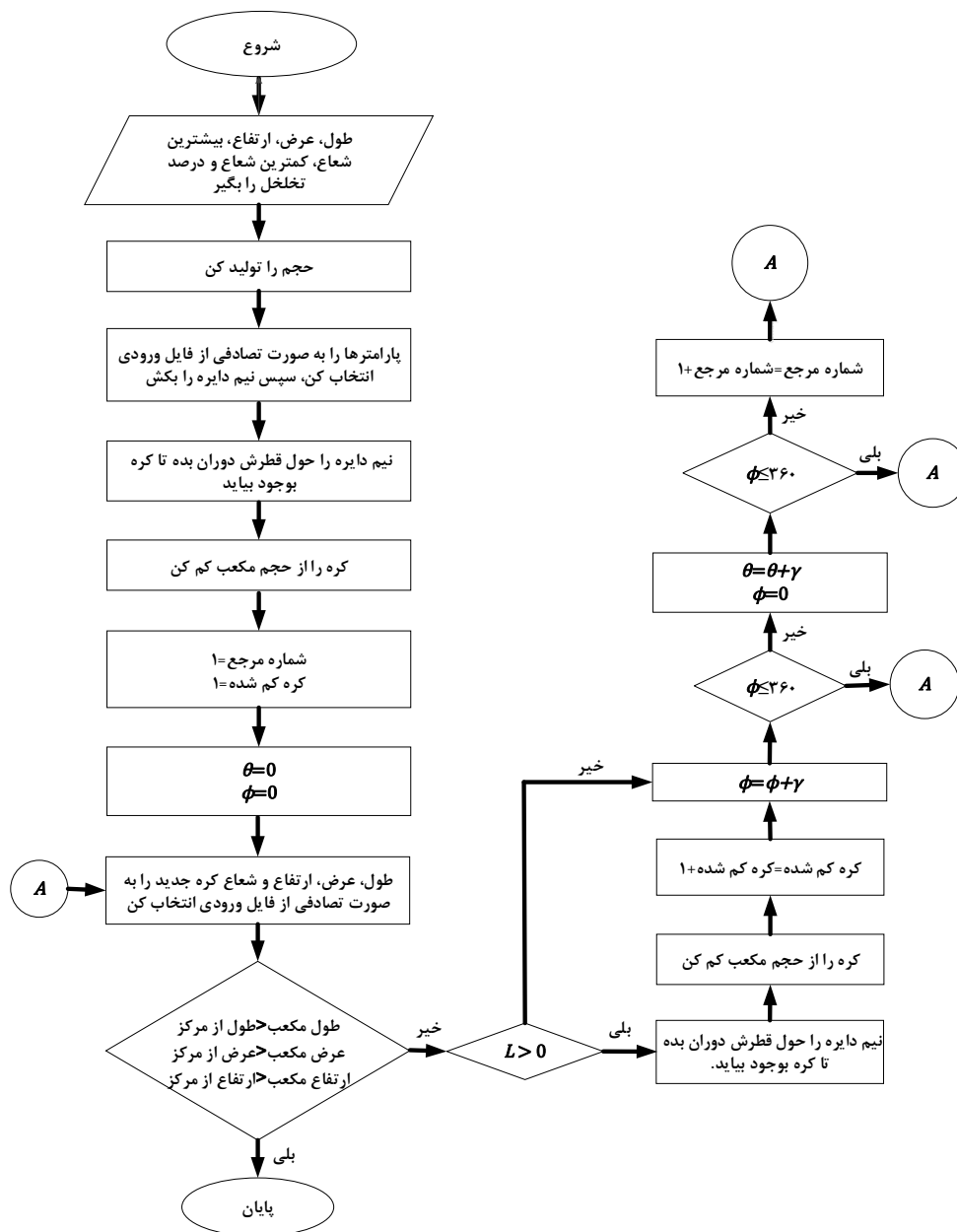
شکل ۴ وضعیت کره ها را برای  $\alpha$  و  $\beta$  برابر ۱

برنامه با تولید تصادفی پارامترهای مربوط به کره ای اول، نیم دایره ای تولید کرده و آن را به اندازه ی ۳۶۰ درجه حول قطرش دوران می دهد تا کره مورد نظر، که همان کره ای مرجع اول است را، تولید کند، (شکل ۲). در ادامه این کره از حجم مکعب کم می شود.

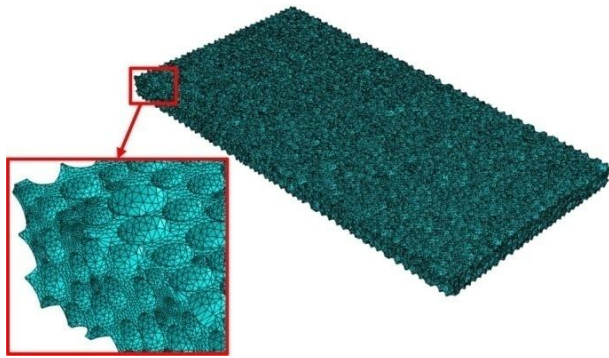
1- Radius(Reference)  
2- New\_Radius  
3- New\_x  
4- New\_y  
5- New\_z



شکل ۵ موقعیت کره‌ی سوم در اطراف کره‌ی اول و دوم



شکل ۶ فلوجارت الگوریتم نوشته شده برای تولید فوم



شکل ۱۱ مش‌بندی ایجاد شده برای فوم مدل شده

#### ۴- شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند

به منظور نشان دادن نحوه‌ی به‌کارگیری فوم مدل شده در نرم افزار اجزای محدود یک نمونه از تحلیل کوپل حرارتی - مکانیکی خم‌کاری این ورق با استفاده از پرتو لیزر در نرم افزار اجزای محدود آباکوس<sup>۱</sup> در این بخش ارائه می‌شود. به این منظور، فوم مدل شده به صورت فایلی با قالب استی‌پی<sup>۲</sup> و قابل خواندن برای نرم‌افزار آباکوس ذخیره می‌شود؛ سپس این فایل وارد این نرم‌افزار می‌شود. به دلیل وجود برخی ناهمواری‌ها در گوشه‌های فوم و لبه‌ی حفره‌ها، فوم مدل شده به منظور مش‌بندی ابتدا باید به صورت قابل تحلیل<sup>۳</sup> تبدیل شود.

#### ۴-۱- مش‌بندی

برای مش‌بندی فوم مدل شده از المان چهار نقطه‌ای<sup>۴</sup> تتراگونال<sup>۵</sup> استفاده شده است. به منظور کم شدن تعداد المان‌ها و رسیدن سریع به جواب مسئله‌ی مورد نظر، استقلال از تعداد مش برای این شبیه‌سازی بررسی شده و مش‌بندی فوم با تعداد بهینه انجام شده است. شکل ۱۱ مش‌بندی ایجاد شده برای فوم مدل شده را نشان می‌دهد.

#### ۴-۲- شرایط مرزی حرارتی

شرایط مرزی حرارتی به صورت همرفت و تابش بر سطوح ورق به صورت متغیر با دما اعمال شده است که همرفت بر اساس قانون نیوتن بوده و در معادله زیر آورده شده است و واحد آن  $Wm^{-2}$  است.

$$q = h_c(T_S - T_E) \quad (9)$$

که  $h_c$  ضریب انتقال حرارت،  $T_S$  دمای ورق است.  $T_E$  نیز دمای محیط است که  $25^\circ C$  در نظر گرفته شد. انتقال حرارت به صورت تشعشع در معادله زیر اعمال شده است و واحد آن  $Wm^{-2}$  است.

$$Q = 5.67 \times 10^{-8} \varepsilon (T_S^4 - T_E^4) \quad (10)$$

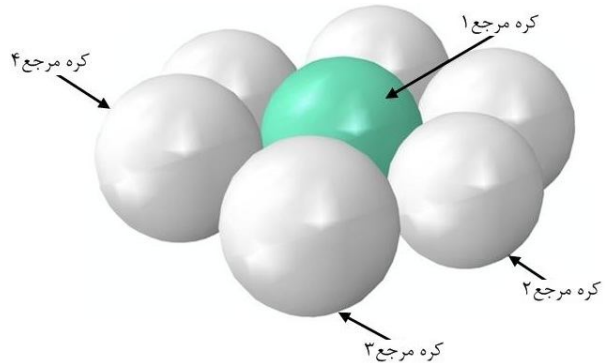
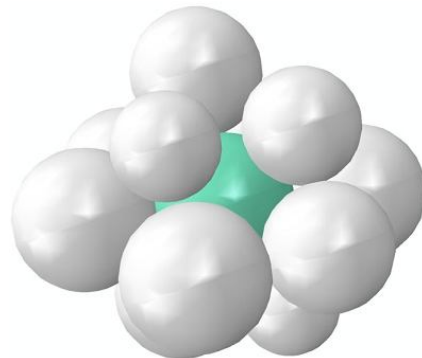
که  $\varepsilon$  ضریب تشعشع است. برای حفظ پیوستگی تأثیر حرکت پرتو لیزر سعی شده است که در هر مرحله زمانی تغییر دما از  $20$  درجه سانتیگراد تجاوز نکند.

#### ۴-۳- خصوصیات جنس قطعه

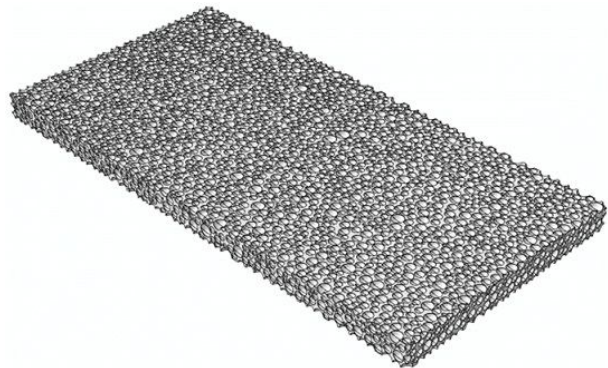
جنس ماده، الاستیک-پلاستیک چند خطی در نظر گرفته شد. همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، خصوصیات حرارتی (ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه) و خصوصیات مکانیکی (مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و چگالی) وابسته به دما در نظر گرفته شده است [۹].

در نهایت برنامه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که فوم مدل شده باشد و کره‌ای که می‌خواهد از حجم مکعب کم شود در بیرون از مکعب قرار گیرد؛ به این معنی که کره با مکعب هیچ گونه تداخلی نداشته باشد. شکل ۹ فوم مدل شده را نشان می‌دهد.

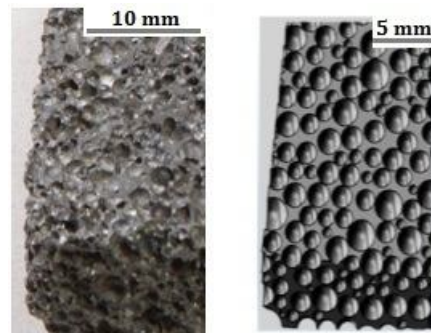
در شکل ۱۰ فوم مدل شده، با فوم واقعی مورد مقایسه قرار گرفته است.

شکل ۷ وضعیت کره‌ها در اطراف کره‌ی مرجع ۱، از  $\varphi = 0$  تا  $360$  و  $\theta = 0$ 

شکل ۸ وضعیت کره‌ها در اطراف کره‌ی مرجع ۱، برای یک حلقه‌ی کامل



شکل ۹ فوم مدل شده

شکل ۱۰ مقایسه فوم مدل شده با نمونه واقعی، سایز متوسط حفره‌ها  $1/28$  میلی‌متر

1- ABAQUS. 6. 10. 1  
2- STP  
3- Analytical  
4- C3D4T  
5- Tetragonal

## ۴-۴- نمونه‌ای از تحلیل انجام شده

فرآیند خم‌کاری ورق فوم مدل شده در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۳ کانتور دمای این تحلیل را نشان می‌دهد.

## ۵- ارزیابی و مقایسه مدل پیشنهادی با فوم واقعی

در شکل ۹ و ۱۰ مدل ارائه شده برای تولید فوم به کار برده شده نشان داده شده است. ابتدا، اعتبار مدل، در مقایسه با چگالی نسبی اندازه‌گیری شده از مدل واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. چگالی نسبی، همان طور که در معادله ۱۱ نشان داده شده است، برابر نسبت چگالی فوم به چگالی ماده‌ای است که فوم از آن تشکیل شده است [۱۳].

$$(11) \quad \text{چگالی نسبی} = \frac{\text{چگالی فوم}}{\text{چگالی ماده جامد}}$$

به منظور بررسی این مقایسه، ابتدا، چگالی نسبی شش نمونه از فوم واقعی با استفاده از معادله ۱۲ اندازه‌گیری شد.

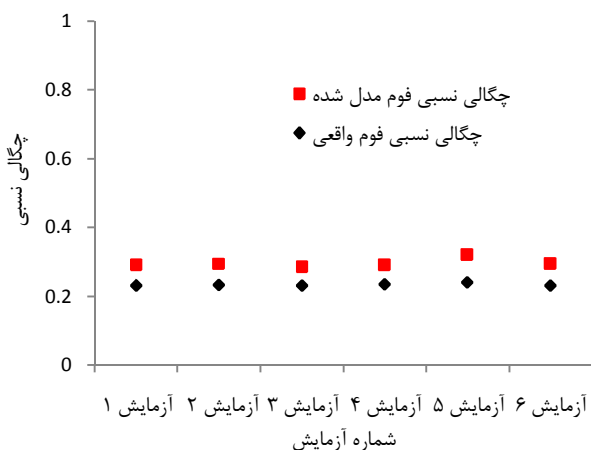
$$(12) \quad \text{چگالی فوم واقعی} = \frac{\text{وزن فوم}}{\text{حجم فوم}}$$

چگالی ورق فوم مدل شده نیز با استفاده از فرمول ۱۲ و با استفاده از نرم‌افزار کتیا محاسبه شد. همان طور که در نمودار شکل ۱۴ نشان داده شده است چگالی اندازه‌گیری شده از مدل ارائه شده نزدیکی خوبی با چگالی فوم واقعی دارد. مقدار خطای به دست آمده برای فوم‌های مختلف مدل شده برابر ۹/۶ درصد است. قابل ذکر است که در این نمودار اندازه متوسط حفره‌ها ۱/۲۸۸mm است.

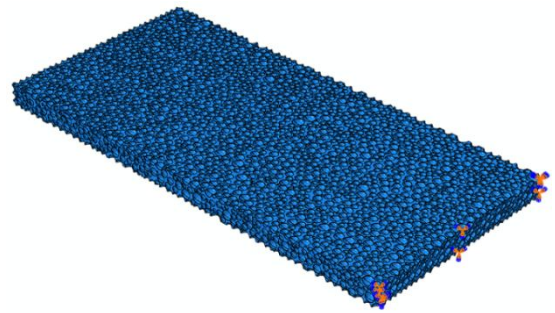
شکل ۱۵ توزیع حجم حفره‌ها را برای فوم مدل شده با استفاده از این الگوریتم نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده است، این روش حفره‌ها را تقریباً به طور یکنواخت در حجم ورق پخش می‌کند. این روش نشان می‌دهد که سهم حفره‌های با اندازه بزرگ‌تر بیشتر از سهم دیگر حفره‌هاست؛ بنابراین برای مدل کردن یک فوم واقعی، مقدار سایز متوسط فوم واقعی باید به بیشترین مقدار وارد شده در برنامه نزدیک باشد. جدول ۲، پارامترهای هندسی فوم مدل شده را با نمونه واقعی گزارش می‌دهد.

جدول ۲ مقایسه ورق فوم مدل شده با نمونه واقعی

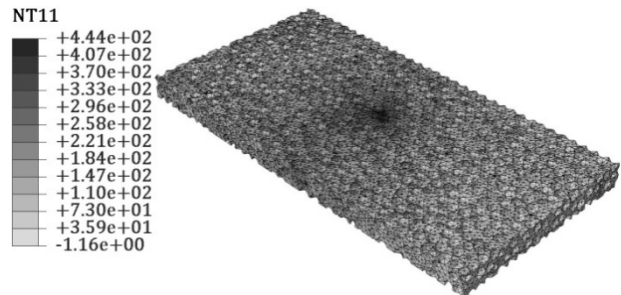
پارامترها	فوم واقعی	فوم مدل شده
چگالی نسبی	۰/۳۳	۰/۳۹
قطر متوسط حفره‌ها (میلیمتر)	۱/۳	۱/۲۸۸
تعداد حفره‌ها (بر سانتیمتر مربع)	۳۱	۲۶
ضخامت دیواره‌ها (میلیمتر)	۰/۱	۰/۱۱۳



شکل ۱۴ مقایسه چگالی فوم مدل شده با فوم واقعی



شکل ۱۲ شرایط مرزی مکانیکی و نحوه اعمال بار حرارتی بر ورق



شکل ۱۳ کانتور توزیع دمایی، قدرت لیزر ۱۰۰W، سرعت ۲mm/s، قطر اشعه لیزر ۱/۵mm و تعداد پاس ۱ پاس، زاویه خمش ۰/۸۸۲ درجه

جدول ۱ خصوصیات حرارتی و مکانیکی آلومینیوم ۶۰۶۱

تنش تسلیم (MPa)	ضریب انبساط (10 <sup>-6</sup> 1/°C)	مدول الاستیسیته (GPa)	گرمای ویژه (J/kg <sup>-1</sup> )	ضریب هدایت حرارتی (Wm <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> )	دما (°C)
۲۸۱/۲	۲۳/۱	۷۰/۳	۸۷۵	۱۳۷	۲۰
۲۷۴	۲۳/۵	۶۸/۵	۹۴۵	۱۶۲	۳۷/۸
۲۶۵	۲۴/۶	۶۶/۲	۹۷۸	۱۷۷	۹۳/۳
۲۴۸	۲۵/۷	۶۳/۱	۱۰۰۰	۱۸۴	۱۴۸/۹
۲۱۹	۲۶/۶	۵۹/۲	۱۰۳۰	۱۹۲	۲۰۴/۴
۱۶۰	۲۷/۶	۵۴	۱۰۵۲	۲۰۱	۲۶۰
۶۶/۲	۲۸/۵	۴۷/۵	۱۰۸۰	۲۰۷	۳۱۵/۶
۳۴/۵	۲۹/۶	۴۰/۳	۱۱۰۰	۲۱۷	۳۷۱/۱
۱۷/۹	۳۰/۷	۳۱/۷	۱۱۳۰	۲۲۳	۴۲۶/۷

## ۴-۳- شرایط مرزی مکانیکی

در تحلیل کوپل حرارتی مکانیکی، همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، برای جلوگیری از حرکت صلب جسم یکی از سطوح کناری ورق در حال شکل‌دهی، در سه جهت اصلی مقید شده و جابه‌جایی صفر در سه جهت اصلی اعمال شده است.

## ۴-۳-۴- شرایط بارگذاری

در فرآیند شکل‌دهی فلزات با استفاده از پرتو لیزر، با توجه به حرکت پرتو لیزر و قطعه‌ی کار نسبت به هم، باید این پرتو به صورت متحرک شبیه‌سازی شود. توزیع حرارت این منبع متحرک در سطح بالایی ورق به صورت گوسی بوده و برای شبیه‌سازی پرتو لیزر به صورت متحرک، برنامه‌ای در بخش زیر روال<sup>۱</sup> نرم افزار آباکوس نوشته شد که شبیه‌سازی حرکت منبع لیزر را در مسیر مشخص انجام داده است.

فلزی ارائه شد. برای این منظور پارامترهای تصادفی برای تولید کره‌ها تولید شد، سپس این کره‌ها از حجم یک مکعب کم شدند. در این مقاله همچنین تأثیر سایز حفره‌ها و تعداد حفره‌ها بر روی چگالی فوم حفره بسته مورد بررسی قرار گرفت، و نتایج زیر حاصل شد:

۱- با افزایش سایز حفره‌ها از ۱/۲۵mm تا ۲/۷۵mm، چگالی نسبی از ۰/۲۹۸ تا ۰/۲۸۱ کاهش می‌یابد. به این معنی که چگالی نسبی به اندازه ۵/۷ درصد کاهش پیدا کرده است.

۲- با افزایش تعداد حفره‌ها از ۳۳۰ تا ۴۳۵، چگالی نسبی فوم از ۰/۳۶ تا ۰/۲۸۲ کاهش می‌یابد. به این معنی که چگالی نسبی به اندازه‌ی ۴۲ درصد کاهش یافته است.

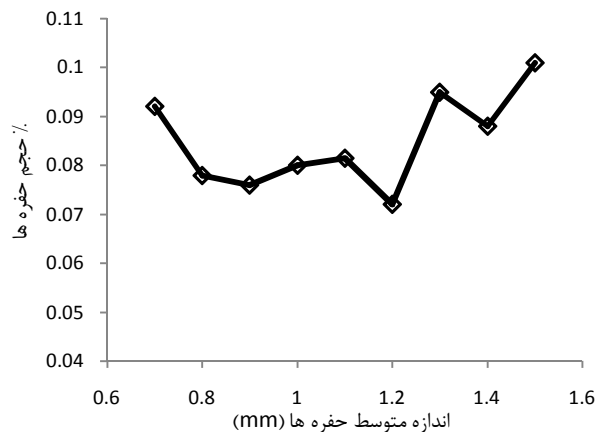
۳- قابلیت وارد شدن مدل ساخته شده در نرم افزارهای روش‌های اجزا محدود، انجام تحلیل‌های عددی را در ادامه ممکن ساخته است.

مقایسه‌ی چگالی اندازه‌گیری شده از مدل فوم با چگالی فوم واقعی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده نزدیکی خوبی با فوم واقعی دارد.

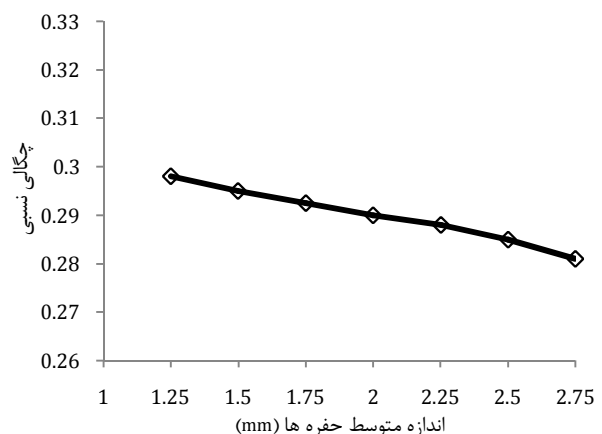
فوم حفره بسته‌ی مدل شده در این مطالعه، به منظور بررسی رفتار مکانیکی و مطابقت آن با رفتار فوم واقعی، در یک نرم‌افزار المان محدود در مطالعات آینده مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

## ۷- مراجع

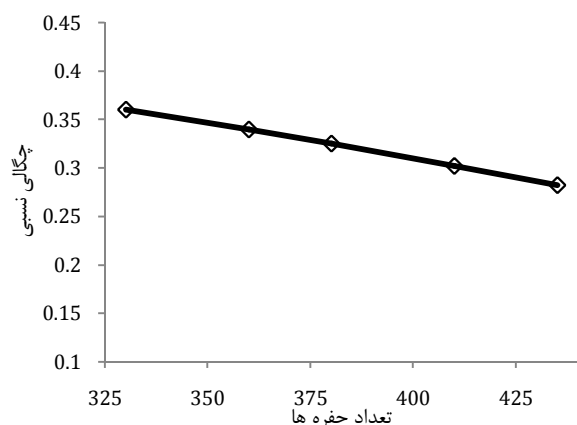
- [1] S. P. Santosa, T. Wierzbicki, On The Modeling Of Crush Behavior Of a Closed-Cell Aluminum Foam Structure, *Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 46, No. 4, pp. 64-669, 1998.
- [2] E. W. Andrews, J.-S. Huang, L. J. Gibson, Creep Behavior Of a Closed-Cell Aluminum Foam, *Acta Materialia*, Vol. 47, No. 10, pp. 2927-2935, 1999.
- [3] S. P. Santosa, T. Wierzbicki, A. G. Hanssen, M. Langseth, Experimental and numerical studies of foam-filled sections, *Impact Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 509-534, 2000.
- [4] S. A. Meguid, S. S. Cheon, N. El-Abbasi, FE modelling of deformation localization in metallic foams, *finite elements in analysis and design*, Vol. 38, No. 7, pp. 631-643, 2002.
- [5] I. Ch. Konstantinidis, D. P. Papadopoulos, H. Lefakis, D. N. Tsipas, Model for determining mechanical properties of aluminum closed-cell foams, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 43, No. 2, pp. 157-167, 2005.
- [6] M. Styles, P. Compston, S. Kalyanasundaram, Finite element modeling of core thickness effects in aluminum foam/composite sandwich structures under flexural loading, *Composite Structures*, Vol. 86, No. 1-3, pp. 227-232, 2008.
- [7] I. Jeon, K. Katou, T. Sonoda, T. Asahina, K. J. Kang, Cell wall mechanical properties of closed-cell Al foam, *Mechanics of Materials*, Vol. 41, No. 1, pp. 60-73, 2009.
- [8] M. De Giorgi, A. Carofalo, V. Dattoma, R. Nobile, F. Palano, Aluminium foams structural modeling, *Computers and Structures*, Vol. 88, No. 1-2, pp. 25-35, 2010.
- [9] I. Jeon, T. Asahina, K. J. Kang, S. Im, T. J. Lu, Finite element simulation of the plastic collapse of closed-cell aluminum foams with X-ray computed tomography, *Mechanics of Materials*, Vol. 42, No. 3, pp. 227-236, 2010.
- [10] C. Veyhl, I. V. Belova, G. E. Murch, T. Fiedler, Finite element analysis of the mechanical properties of cellular aluminium based on micro-computed tomography, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 13-14, pp. 4550-4555, 2011.
- [11] D. Miedzinska, T. Niezgoda, R. Gieleta, Numerical and experimental aluminum foam microstructure testing with the use of computed tomography, Proceedings of the 21st International Workshop on Computational Mechanics of Materials (IWCMM 21), *Computational Materials Science*, Vol. 64, pp. 90-95, 2012.
- [12] A. Davoudikia, Sh. Shahbeik, Effects of cellular structure on the yield surface of the two-dimensional metal foam, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 21-32, 2012. (In Persian)
- [13] C. R. Fortier, *Modeling of a porous metal foam cryogenic counter flow heat exchanger*, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Clemson University, 2010.



شکل ۱۵ توزیع حجم حفره‌ها در فوم مدل شده



شکل ۱۶ چگالی نسبی فوم مدل شده برای سایز حفره‌های متفاوت



شکل ۱۷ مقایسه‌ی چگالی نسبی فوم مدل شده برای تعداد حفره‌ها، با سایز حفره‌های متوسط ۰/۷۶۸ میلی‌متر

چگالی فوم‌های مدل شده برای سایز متوسط حفره‌های مختلف به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، با افزایش سایز حفره‌ها، چگالی نسبی فوم مدل شده کاهش می‌یابد.

شکل ۱۷ چگالی فوم‌های مدل شده را برای تعداد حفره‌های موجود در فوم نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش تعداد حفره‌های موجود در فوم، چگالی نسبی ورق مدل شده کاهش می‌یابد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش جدید برای مدل‌سازی ساختار سلولی نامنظم فوم‌های