



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

محمد حسین پور گلو^{۱*}، مسعود عباس زاده^۲، ایرج میرزایی^۳

۱- استادیار گروه ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

۳- استاد گروه تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

*تهران، صندوق پستی: ۱۳۶-۱۶۷۸۵، m.hoseinpour@srttu.edu

چکیده

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

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.

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

Mohammad Hosseinpour Gollo¹, Masoud Abbaszadeh², Iraj Mirzaee³

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

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:

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 ۹۷^۱ برای شبیه سازی عددی فرایند 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 ویرزبکی 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 فرایند انجماد، در طبیعت عمدتاً کروی 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^۲ 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. ژئون 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/۳-دی-بن^۳، 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^۴ 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. ژئون در مطالعه ای دیگر به همراه همکارانش [۹] با استفاده از مدل خود [۷] فروپاشی

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 ژئون [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^۵ رابطه ای مستقیم با خصوصیت ماده دارد. میدزینسکا به همراه همکارانش [۱۱] با استفاده از دستگاه ایکس-ری^۶ و با روندی مشابه به روند ژئون [۷] توانستند فوم های حفره باز با تعداد پرز بر اینچ های^۷ 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 کروی 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^۸، که به زبان ویژوال بیسیک^۹ 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).

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 کرهی اول قرار گرفته و کرهی دوم دقیقاً از محل $\theta = 0$ و $\varphi = 0$ و با شعاع تصادفی ایجاد می‌شود. دستگاه مختصات کروی در هر مرحله بر روی مرکز کرهی مرجع قرار می‌گیرد.

$$NR = ((Max_R - Min_R) \times Rnd + Min_R) \quad (1)$$

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

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

$$dr = (Max_dr - Min_dr) \times Rnd + Min_dr \quad (4)$$

میزان تداخل کره‌های اطراف با کرهی مرجع، همان طور که در معادله ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، توسط ضرایب α و β مشخص می‌شود. برای فوم‌های حفره بسته تمامی ضرایب مربوط به تداخل کره‌ها، ۱ در نظر گرفته می‌شود. با ضرایب $\alpha = 1$ و $\beta = 1$ ، dr در معادله ۴، برابر جمع شعاع مرجع و شعاع جدید خواهد بود. در واقع، فاصله بین کره‌ها به سمت صفر میل می‌کند و به حالت واقعی نزدیک‌تر می‌شود، (شکل ۴).

کدهای مربوط به تولید کره‌های اطراف در روابط (۴-۱) آورده شده است. که در آن NR ، شعاع کرهی مرجع، NR ، شعاع تصادفی تولید شده برای کرهی جدید، dr ، فاصله مراکز کره‌های اطراف با مرکز کرهی مرجع، α و β به ترتیب بیشترین و کمترین ضریب تداخل کره‌های اطراف با کرهی مرجع هستند. در ادامه، برنامه برای ایجاد کرهی سوم، θ را صفر گرفته و برای φ ، عددی تصادفی بین صفر و ۱۵ تولید می‌کند و با دیگر پارامترهای تولیدی، NX ، NY ، NZ ، (روابط ۸-۵) کرهی ایجاد می‌کند که اگر با کره‌های اطراف تداخل نداشته باشد، به عبارت دیگر اگر پارامتر L بزرگ‌تر از صفر باشد، کره از حجم کم می‌شود. پارامتر L با رابطه ۵ به γ که میزان تداخل کره‌های اطراف با یکدیگر است، مربوط می‌شود. NX ، NY و NZ ، موقعیت مرکز کرهی جدید را مشخص می‌کند، (شکل ۵).

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

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

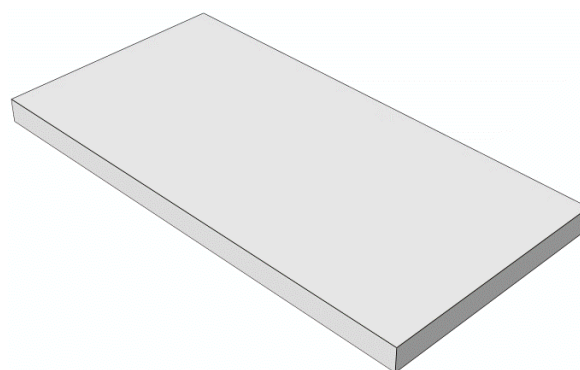
$$NY = dr \times \cos(\theta) \times \cos(\varphi) + y(Ref) \quad (7)$$

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

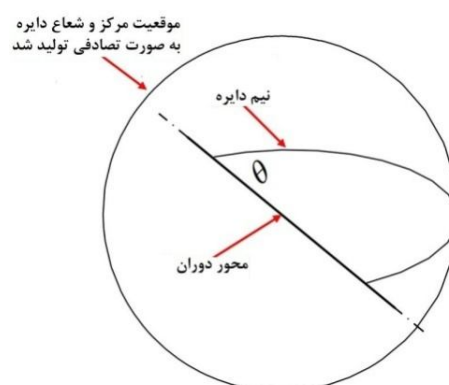
اگر کرهی مورد نظر نتواند شرط موجود را ارضا کند، زاویه‌ی φ به اندازه‌ی گام زاویه‌ای، که در اینجا برابر ۱۵ است، افزایش می‌یابد؛ به این معنی که برنامه، عددی تصادفی برای φ بین ۱۵ و ۳۰ تولید می‌کند و همان طور که در فلوچارت شکل ۶ مشخص شده است، این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که φ به ۳۶۰ برسد. شکل ۷ وضعیت کره‌ها را برای کرهی مرجع ۱، از $\varphi = 0$ تا $\varphi = 360$ و $\theta = 0$ نشان می‌دهد.

این بار برنامه، θ را به اندازه گام زاویه‌ای افزایش می‌دهد و عددی تصادفی برای θ بین ۹۰ و ۷۵ تولید می‌کند، و همین روند را ادامه می‌دهد تا θ به ۹۰ برسد. شکل ۸ وضعیت کره‌ها را برای کرهی مرجع ۱، و یک حلقه کامل نشان می‌دهد.

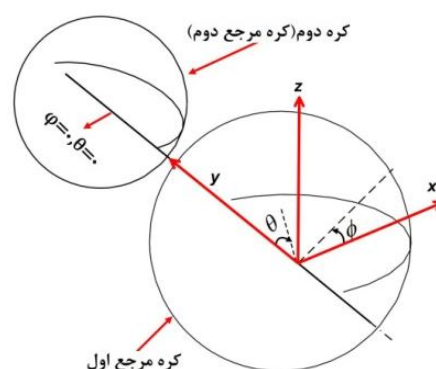
برنامه بعد از یک حلقه کامل، اگر دیگر نتواند کره‌ای کم کند، کرهی مرجع را تغییر داده و کرهی دوم را به عنوان کرهی مرجع گرفته و کره‌ها را این بار از اطراف کرهی دوم کم می‌کند.



شکل ۱ مکعب تولید شده (حجم فوم)

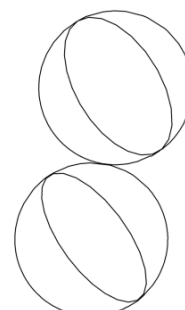


شکل ۲ کره مرجع اول



شکل ۳ وضعیت کرهی دوم نسبت به کرهی اول

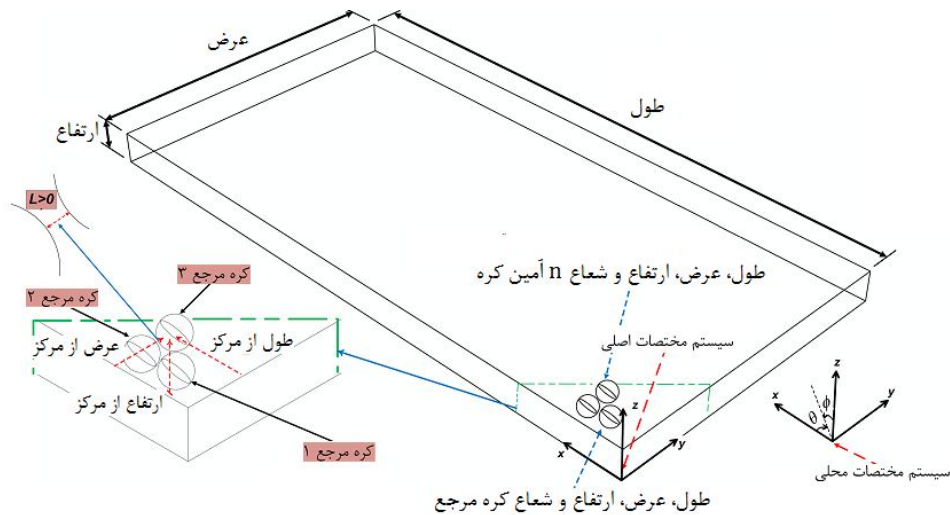
ضرایب α و β برابر با ۱



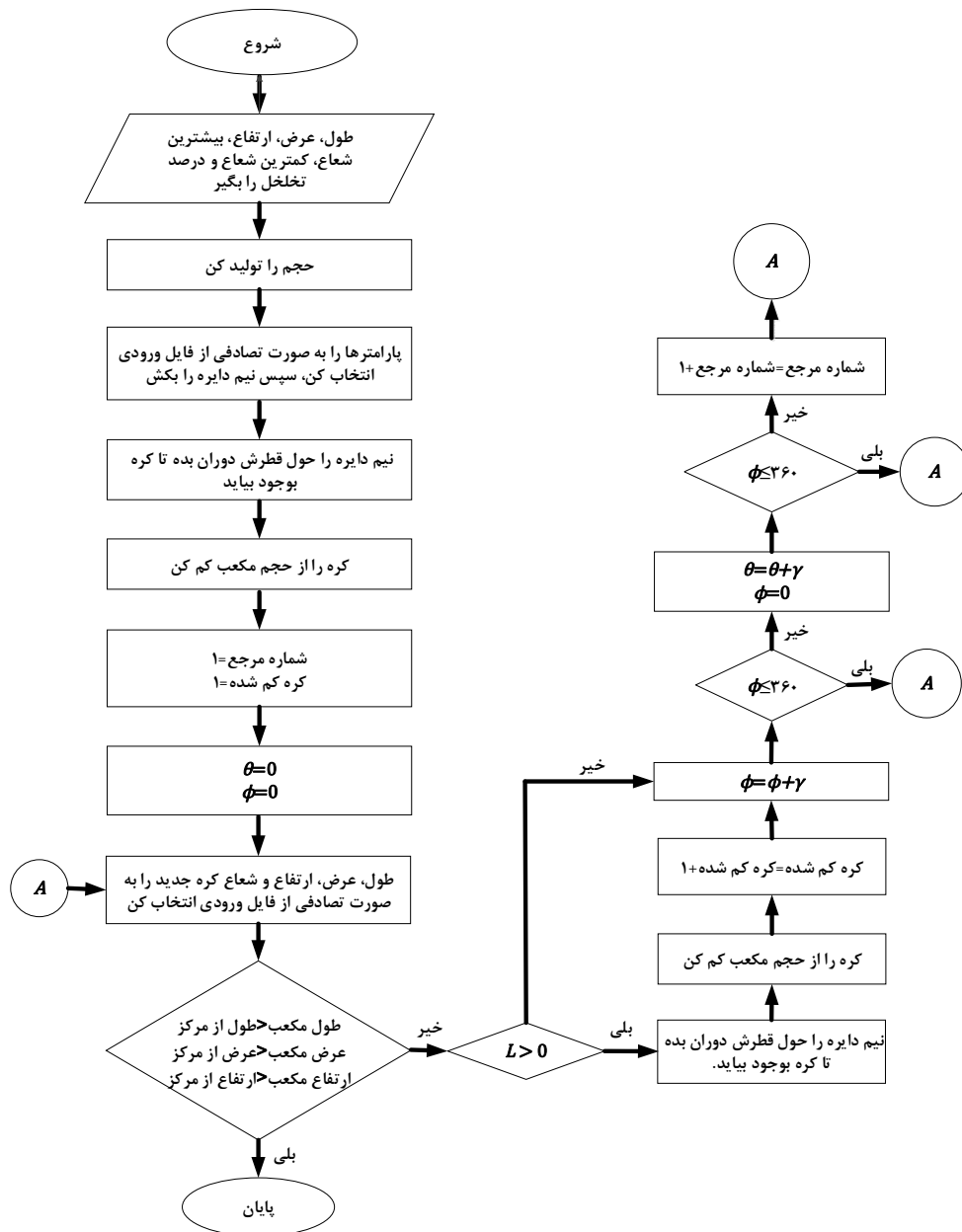
شکل ۴ وضعیت کره‌ها را برای α و β برابر ۱

برنامه با تولید تصادفی پارامترهای مربوط به کرهی اول، نیم‌دایره‌ای تولید کرده و آن را به اندازه‌ی ۳۶۰ درجه حول قطرش دوران می‌دهد تا کره مورد نظر، که همان کرهی مرجع اول است را، تولید کند، (شکل ۲). در ادامه این کره از حجم مکعب کم می‌شود.

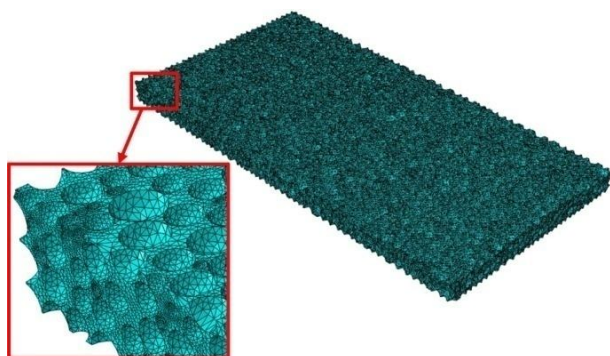
1- Radius(Reference)
2- New_Radius
3- New_x
4- New_y
5- New_z



شکل ۵ موقعیت کره‌ی سوم در اطراف کره‌ی اول و دوم



شکل ۶ فلوچارت 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^۱ در این بخش ارائه می‌شود. به این منظور، فوم مدل شده به صورت فایلی با قالب استی‌پی^۲ 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^۳ تبدیل شود.

۴-۱- مش‌بندی

برای مش‌بندی فوم مدل شده از المان چهار نقطه‌ای^۴ تتراگونال^۵ 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.

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

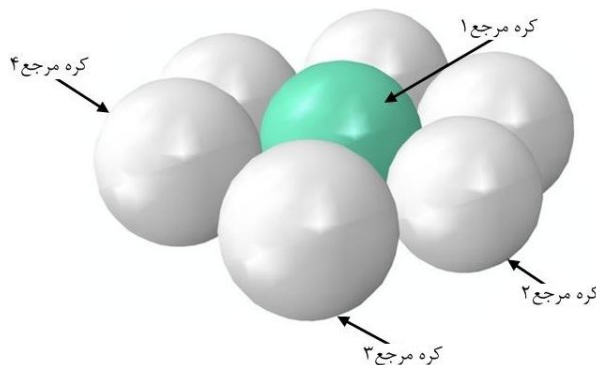
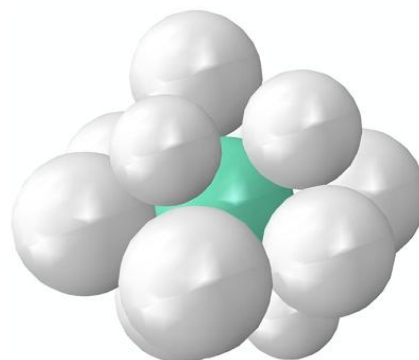
که ε ضریب تشعشع است. برای حفظ پیوستگی تأثیر حرکت پرتو لیزر سعی شده است که در هر مرحله زمانی تغییر دما از $20^\circ C$ درجه سانتیگراد تجاوز نکند.

۴-۳- خصوصیات جنس قطعه

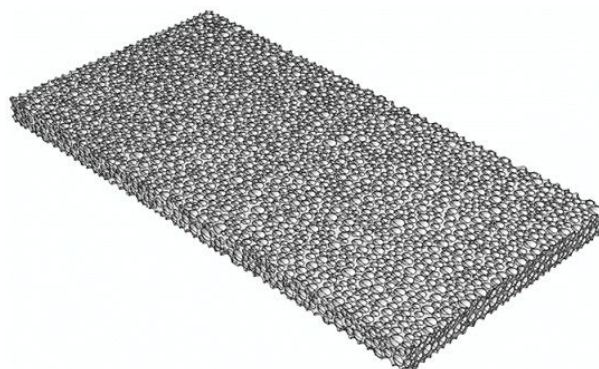
جنس ماده، الاستیک-پلاستیک چند خطی در نظر گرفته شد. همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، خصوصیات حرارتی (ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه) و خصوصیات مکانیکی (مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و چگالی) وابسته به دما در نظر گرفته شده است [۹].

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.

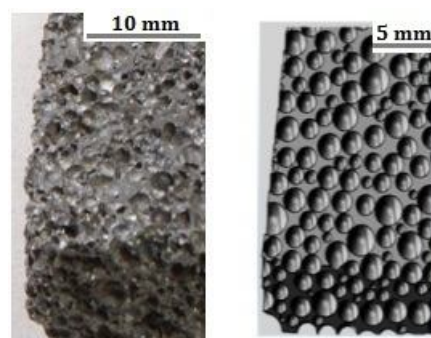
در شکل ۱۰ فوم مدل شده، با فوم واقعی مورد مقایسه قرار گرفته است.

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، سائز متوسط حفره‌ها $1/28$ میلیمتر

1- ABAQUS. 6. 10. 1

2- STP

3- Analytical

4- C3D4T

5- Tetragonal

۴-۴- نمونه ای از تحلیل انجام شده

فرآیند خم کاری ورق فوم مدل شده در نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۳ کانتور دمای این تحلیل را نشان می دهد.

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 اندازه گیری 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 ماده ای 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 اندازه گیری شد.

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

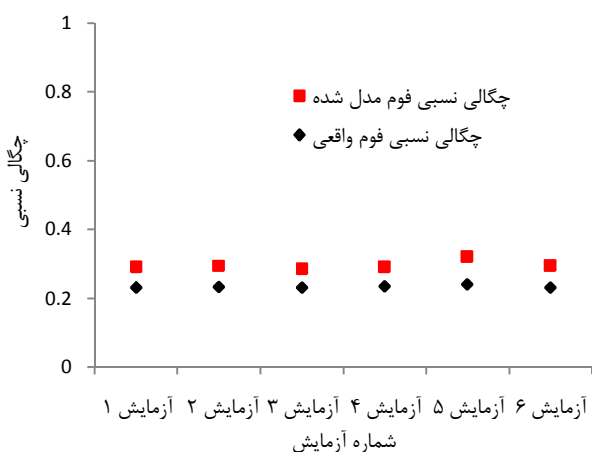
چگالی ورق فوم مدل شده نیز با استفاده از فرمول ۱۲ و با استفاده از نرم افزار کتیا محاسبه شد. همان طور که در نمودار شکل ۱۴ نشان داده شده است چگالی اندازه گیری شده از مدل ارائه شده نزدیکی خوبی با چگالی فوم واقعی دارد. مقدار خطای به دست آمده برای فوم های مختلف مدل شده برابر ۹/۶ درصد است. قابل ذکر است که در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

شکل ۱۵ توزیع حجم حفره ها را برای فوم مدل شده با استفاده از این الگوریتم نشان می دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده است، این روش حفره ها را تقریباً به طور یکنواخت در حجم ورق پخش می کند. این روش نشان می دهد که سهم حفره های با اندازه بزرگ تر بیشتر از سهم دیگر حفره ها است؛ بنابراین برای مدل کردن یک فوم واقعی، مقدار ساین متوسط فوم واقعی باید به بیشترین مقدار وارد شده در برنامه نزدیک باشد.

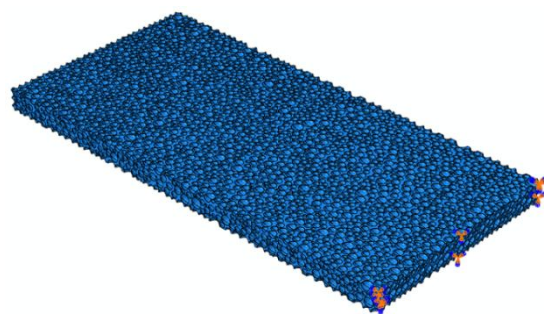
جدول ۲، پارامترهای هندسی فوم مدل شده را با نمونه واقعی گزارش می دهد.

جدول ۲ مقایسه ورق فوم مدل شده با نمونه واقعی

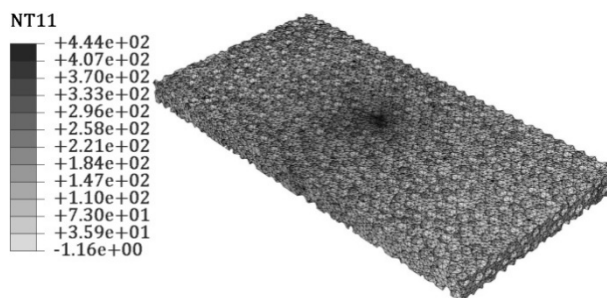
پارامترها	فوم واقعی	فوم مدل شده
چگالی نسبی	۰/۲۳	۰/۲۹
قطر متوسط حفره ها (میلی متر)	۱/۳	۱/۲۸۸
تعداد حفره ها (بر سانتی متر مربع)	۳۱	۲۶
ضخامت دیواره ها (میلی متر)	۰/۱	۰/۱۱۳



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 ⁻⁶ 1/°C)	مدول الاستیسیته (GPa)	گرمای ویژه (J/kg ⁻¹)	ضریب هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ C ⁻¹)	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 شکل دهی، در سه جهت اصلی مقید شده و جابه جایی صفر در سه جهت اصلی اعمال شده است.

۴-۳- شرایط بارگذاری

در فرآیند شکل دهی فلزات با استفاده از پرتو لیزر، با توجه به حرکت پرتو لیزر و قطعه ای کار نسبت به هم، باید این پرتو به صورت متحرک شبیه سازی شود. توزیع حرارت این منبع متحرک در سطح بالایی ورق به صورت گوسی بوده و برای شبیه سازی پرتو لیزر به صورت متحرک، برنامه ای در بخش زیر روال^۱ نرم افزار آباکوس نوشته شد که شبیه سازی حرکت منبع لیزر را در مسیر مشخص انجام داده است.

1- Subroutine

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

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

۲- با افزایش تعداد حفره ها از ۳۳۰ تا ۴۳۵، چگالی نسبی فوم از ۰/۳۶ تا ۰/۲۸۲ کاهش می یابد. به این معنی که چگالی نسبی به اندازه ۴۲ درصد کاهش یافته است.

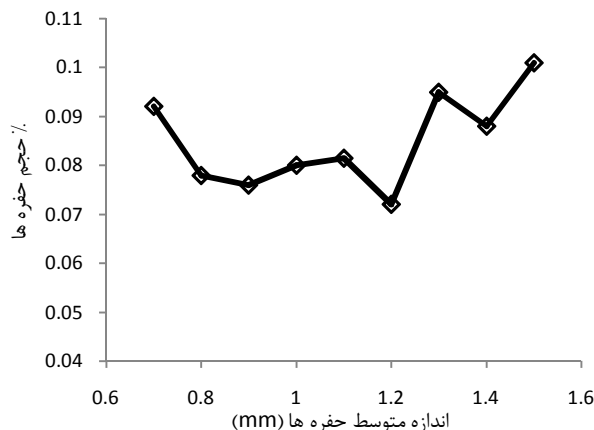
۳- قابلیت وارد شدن مدل ساخته شده در نرم افزارهای روش های اجزا محدود، انجام تحلیل های عددی را در ادامه ممکن ساخته است.

مقایسه ی چگالی اندازه گیری شده از مدل فوم با چگالی فوم واقعی نشان می دهد که مدل ارائه شده نزدیکی خوبی با فوم واقعی دارد.

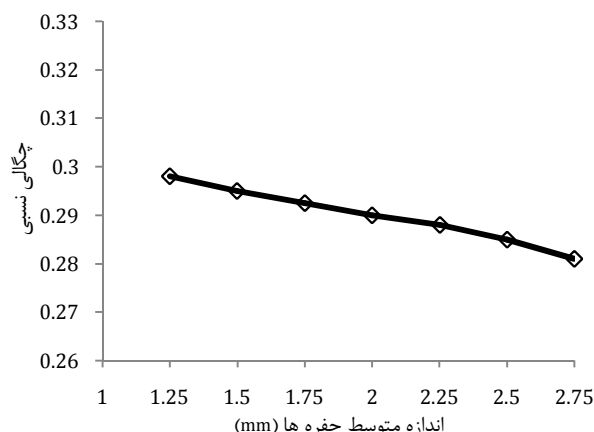
فوم حفره بسته ی مدل شده در این مطالعه، به منظور بررسی رفتار مکانیکی و مطابقت آن با رفتار فوم واقعی، در یک نرم افزار المان محدود در مطالعات آینده مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

۷- مراجع

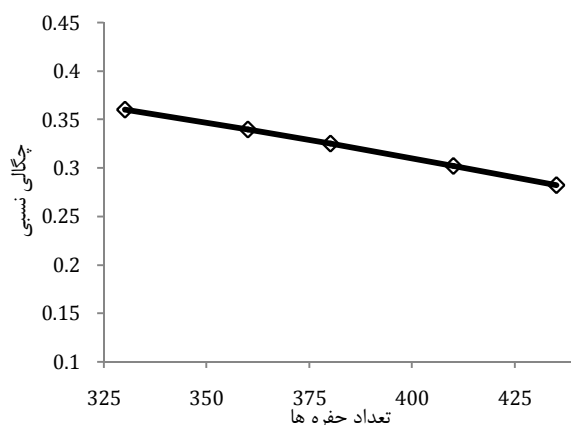
- [1] S. P. Santosa, T. Wierzbicki, On The Modeling Of Crush Behavior Of a Closed-Cell Aluminum Foam Structure, *Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 46, No. 4, pp. 64-669, 1998.
- [2] E. W. Andrews, J.-S. Huang, L. J. Gibson, Creep Behavior Of a Closed-Cell Aluminum Foam, *Acta Materialia*, Vol. 47, 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 aluminium 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 حفره ها در فوم مدل شده



شکل ۱۶ چگالی فوم مدل شده برای سایز حفره های متفاوت



شکل ۱۷ مقایسه ی چگالی فوم مدل شده برای تعداد حفره ها، با سایز حفره های متوسط ۰/۷۶۸ میلی متر

چگالی فوم های مدل شده برای سایز متوسط حفره های مختلف به دست آمد. همان طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، با افزایش سایز حفره ها، چگالی نسبی فوم مدل شده کاهش می یابد.

شکل ۱۷ چگالی فوم های مدل شده را برای تعداد حفره های موجود در فوم نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که با افزایش تعداد حفره های موجود در فوم، چگالی نسبی ورق مدل شده کاهش می یابد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش جدید برای مدل سازی ساختار سلولی نامنظم فوم های