

بررسی تاثیر شکل حفرات بر میزان جذب انرژی ساختارهای مشبک دوبعدی

محمد رضا کارآموز راوری^۱، زهرا سفازاده ماهانی^۲، رضا دهقانی^۳

۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، m.karamooz@kgut.ac.ir

۲ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۴

چکیده

در این مقاله رفتار دینامیکی مواد مشبک، با هدف بررسی تاثیر میزان تخلخل، نرخ کرنش و مورفولوژی‌های مختلف بر پاسخ مکانیکی، به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. برای این منظور مدل‌های اجزا محدود دو بعدی، با مورفولوژی‌های مختلف در تخلخل‌ها و نرخ کرنش‌های متفاوت و با استفاده از مدل مقاومت و شکست جانسون-کوک در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پاسخ مکانیکی این مواد، بشدت به شکل حفره‌ها وابسته است. از میان مورفولوژی‌های مختلف بیشترین جذب انرژی به مورفولوژی مستطیل عمودی و بیضی عمودی اختصاص دارد، چراکه مکانیزم بارگذاری محوری آنها غالب است. از سوی دیگر میزان جذب انرژی برای هر مورفولوژی، تابعی از میزان تخلخل آن بوده و بسته به میزان تخلخل می‌توان مورفولوژی مناسب برای جذب حداکثری انرژی را انتخاب نمود. در عین حال می‌توان دید که با افزایش مقدار نرخ کرنش تا یک مقدار مشخص مقدار تنش فروپاشی ماده افزایش و از آن پس با افزایش موج تنش کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی

جذب انرژی، پاسخ دینامیکی، مواد متخلخل، مواد مشبک، مورفولوژی حفره‌ها، نرخ کرنش.

۱. مقدمه

ساخت این مواد می‌تواند هزینه‌بر باشد، پیش‌بینی خواص آنها پیش از تولید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. برای اولین بار ناگی و همکارانش [۲] در سال ۱۹۷۴ رفتار مکانیکی فوم‌ها را تحت شرایط فشرده‌سازی دینامیکی ارزیابی کردند. بعد از آن کنتول و همکارانش [۳] یک سری از آزمایش‌های شبه‌استاتیکی و دینامیک بر روی بلوک‌های مشبک و تیرها، که با استفاده از تکنیک ذوب انتخابی توسط لیزر^۱ ساخته

امروزه مواد متخلخل به دلیل خواص منحصربه‌فردی همچون نسبت استحکام به وزن بالا، انتقال حرارت اندک، میزان جذب انرژی بالا و چگالی نسبی پایین، توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده‌اند و بطور گسترده بعنوان جاذب‌های ضربه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. خواص مواد متخلخل به خواص فلز پایه، چگالی نسبی، مورفولوژی حفره‌ها و غیره بستگی دارد [۱]. از آنجا که

شده بود، انجام دادند. آنها نشان دادند که این تکنیک می‌تواند برای ساختن پیوندهای فلزی در طیف گسترده‌ای از زوایا استفاده شود، که ساختار پیچیده‌ای را که تاکنون غیرممکن بود، تولید کند. بیسواس و همکارش [۴] رفتار تغییر شکل و شکست مواد متخلخل تحت بارگذاری دینامیکی و استاتیکی را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها در مطالعه‌ای دیگر [۵] حساسیت به نرخ کرنش فوم‌های آلیاژ آلومینیوم سلول باز با چگالی‌های نسبی مختلف، که توسط روش متالورژی پودر ساخته شده بود، را تحت بارگذاری فشرده‌سازی بررسی کردند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در محدوده نرخ کرنش‌های مورد بررسی (۰/۰۰۱ تا ۲۶۰۰)، مقاومت تسلیم و انرژی جذب شده با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد. علاوه فوم آلیاژ آلومینیوم با چگالی نسبی بالاتر نسبت به فوم با چگالی نسبی کمتر، حساسیت بیشتری نسبت به نرخ کرنش دارند. ژنگ و همکارانش [۶] رفتار فشار دینامیکی یک فوم آلومینیوم خالص تجاری سلول باز را به صورت آزمایشگاهی با استفاده از تست هاپکینسون^۲ و با استفاده از روش عددی اجزا محدود^۳ شبیه‌سازی کرده و نشان دادند که رفتار دینامیکی مواد سلولی تحت تأثیر ویژگی‌های سینماتیک و سینتیک نرخ بارگذاری قرار می‌گیرد. برای بررسی اثر نرخ بارگذاری، آن‌ها از مدل المان محدود مبتنی بر سلول واحد استفاده کرده و دلیل تفاوت بین منحنی تنش-کرنش دینامیکی و شبه استاتیکی برای مواد سلولی را مورد بحث قرار داده و مکانیزم تغییر شکل و جذب انرژی را بررسی کردند. آنها همچنین اثر نرخ کرنش بر رفتار فشار دینامیکی از فوم آلومینیوم سلول باز به صورت تجربی و تحلیلی با هدف ایجاد یک مدل مکانیکی قابل انطباق با طیف نسبتاً گسترده‌ای از نرخ کرنش را بررسی کردند. آن‌ها همچنین وابستگی تغییر شکل و تنش جریان فوم را در نرخ کرنش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند و دریافته‌اند که تنش جریان با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد، که این نشان‌دهنده وجود وابستگی به نرخ کرنش در فوم آلومینیوم است.

ازدمیر و همکارانش [۷] رفتار جذب انرژی و مدل شکست ساختارهای مشبک، ساخته شده به روش ذوب پرتو الکترون^۴، را تحت شرایط بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیک مورد مطالعه قرار دادند. جین و همکارانش [۸] رفتار جذب انرژی و مدل شکست چهار ساختار مشبک را تحت بارگذاری دینامیکی بررسی کردند، آنها دریافته‌اند ساختارهای مشبکی که بارگذاری محوری آنها غالب

باشند، خواص مکانیکی بهتری از خود تحت بارگذاری دینامیکی نشان می‌دهند. زو و همکارانش [۹] اثرات ساختار حفره‌ها را، بر روی تیتانیوم با تخلخل مقیاس نانو به صورت عددی مورد ارزیابی قرار دادند، آنها دریافته‌اند که در حفره‌های کوچک، اندازه حفره و تخلخل تأثیر قابل توجهی بر مدول الاستیک دارد.

از آنجایی که رفتار دینامیکی یک ماده می‌تواند کاملاً متفاوت از رفتار استاتیکی آن باشد، در گستره‌ی وسیعی از کاربردهای مهندسی از جمله صنایع حمل و نقل، صنایع هوافضا، صنایع دفاعی، پزشکی، انفجاری و دیگر زمینه‌های مشابه پیش‌بینی رفتار مواد به هنگام بارگذاری دینامیکی لازم و ضروری است. در این پژوهش سعی شده‌است اثرات مورفولوژی‌های مختلف حفره‌ها بر میزان جذب انرژی در نرخ کرنش‌های متفاوت به صورت عددی بررسی شود. در این راستا، مدل‌های اجزا محدود دو بعدی، با مورفولوژی حفره‌های مختلف در تخلخل‌های ۱۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ در نرخ کرنش ۴۰۰۰، ۱۰۰۰ و ۸۰۰۰ برثانیه جهت پیش‌بینی رفتار دینامیکی با مدل مقاومت و شکست جانسون-کوک^۵ در نرم افزار آباکوس^۶ شبیه‌سازی شده‌اند.

۲. مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا به توصیف مدل دو بعدی اجزا محدود با شکل حفرات مختلف پرداخته می‌شود. پس از آن نحوه اعمال شرایط مرزی و بارگذاری بر روی نمونه بیان شده و در پایان خواص مکانیکی، مدل مقاومت و شکست جانسون-کوک بطور مختصر معرفی می‌گردند.

۲-۱. مدل اجزای محدود

ابتدا یک نمونه دو بعدی کرنش صفحه‌ای به ابعاد ۵۱×۵۱×۰٫۵ میلی‌متر مربع با هندسه حفره‌ی مستطیل عمودی (VR)، بیضی عمودی (VE)، مربع (Cu)، دایره (Ci)، بیضی مورب (DE)، لوزی (D)، مثلث (T)، مستطیل افقی (R) و یا بیضی افقی (E)، که در مرکز نمونه قرار گرفته‌است، ایجاد می‌گردد. برای محاسبه ابعاد حفره مورد نظر بر اساس تخلخل مورد نیاز می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

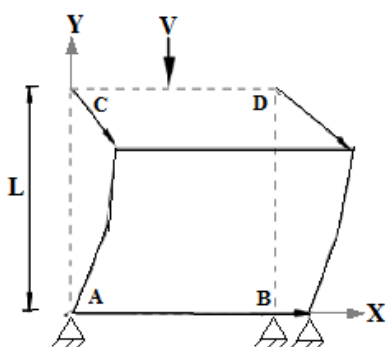
$$porosity (\%) = A/A_s \times 10 \quad (1)$$

وجود شرایط مرزی تکرارشونده سبب می‌شود که جابجایی روی

دو سطح متناظر از رابطه‌ی زیر پیروی نماید [۱۱، ۱۰]:

$$u_{i1} - u_{i2} = u_{i1}^{ref} - u_{i2}^{ref}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

که u^{ref} جابه‌جایی روی هر سطح در یک گره مینا^۱ و u جابه‌جایی هر سطح بعد از تغییر شکل است. برای اعمال شرایط فوق سطح بالایی نمونه با سرعت V در امتداد محور Y به سمت پایین حرکت داده می‌شود و درجه آزادی انتقالی در جهت جابه‌جایی عمودی برای سطح پایینی مقید می‌گردد. در عین حال جابجایی روی سطوح سمت چپ و راست با استفاده از رابطه (۲) بهم مقید می‌گردد.



شکل ۲. شرایط مرزی تکرارشونده

۲-۳. مدل مقاومت

می‌توان مدل مقاومت ماده را بصورت تابعی از کرنش اشباع پلاستیک، $\bar{\epsilon}^p$ ، نرخ کرنش پلاستیک، $\dot{\bar{\epsilon}}^p$ ، و دمای سطح نمونه، T ، با استفاده از رابطه زیر بیان نمود [۴، ۱۲]:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n][1 + C \ln(\dot{\bar{\epsilon}}^p / \dot{\bar{\epsilon}}_0^p)](1 - T^{*m}) \quad (3)$$

حال اگر σ'_{ij} تانسور تنش انحرافی^{۱۱} در یک نقطه مادی، $\bar{\sigma} = [(\frac{3}{2}) \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}]^{1/2}$ تنش فون-میزز و ϵ^p_{ij} تانسور کرنش پلاستیک باشد، می‌توان کرنش اشباع پلاستیک^{۱۲} را به صورت زیر تعریف نمود [۱۲]:

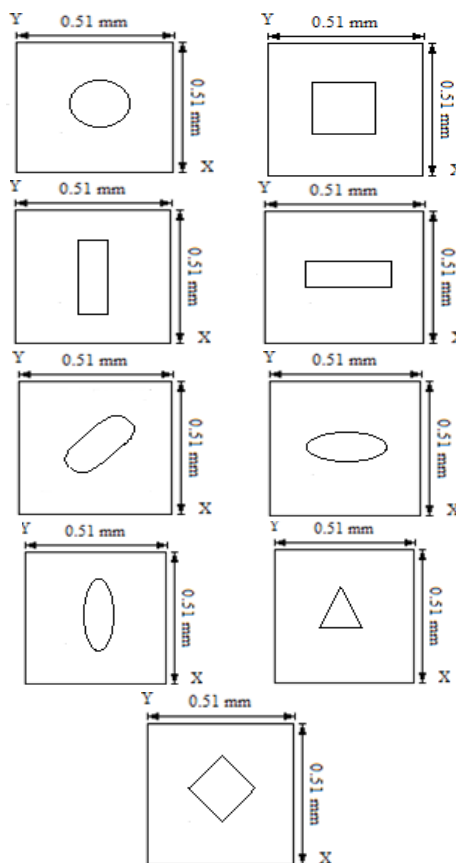
$$\bar{\epsilon}^p = [(2/3) \epsilon^p_{ij} \epsilon^p_{ij}]^{1/2} \quad (4)$$

که در آن نرخ کرنش مرجع $\dot{\bar{\epsilon}}_0^p = 1$ است و T^* به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

$$T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0) \quad (5)$$

که T_0 و T_m به ترتیب دمای اتاق و دمای ذوب هستند. افزایش دما، ناشی از اتلاف پلاستیک، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

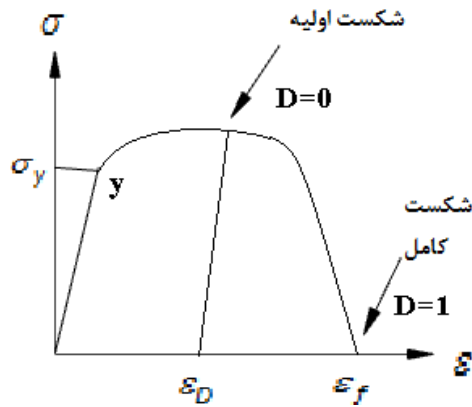
که در آن A_S مساحت کل نمونه و A مساحت حفره است. بدین ترتیب برای مورفولوژی حفره‌های مختلف با در نظر گرفتن سه تخلخل ۱۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ مدلسازی رفتار دینامیکی در سه نرخ کرنش ۱۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ بر ثانیه در نرم‌افزار آباکوس به روش دینامیک صریح^{۱۳} شبیه‌سازی می‌شود [۴]. شکل ۱ مدل‌های ایجاد شده با شکل حفره‌های متفاوت را برای میزان تخلخل ۱۰٪ نمایش می‌دهد.



شکل ۱. شماتیک مدل ۲ بعدی با هندسه حفره متفاوت (مربعی، دایره‌ای، مثلثی، لوزی، بیضی مورب، بیضی افقی و عمودی، مستطیل افقی و عمودی)

۲-۲. شرایط مرزی و بارگذاری

در مدلسازی حاضر فرض می‌شود که ماده مشبک از تکرار تعدادی واحد یکسان که سلول واحد^{۱۴} نامیده می‌شوند، تشکیل شده‌است. در این صورت می‌توان به جای مدلسازی کل سازه، رفتار تنها یک سلول واحد از آن را در کنار شرایط مرزی تکرار شونده^{۱۵} مورد بررسی قرار داد. این امر حجم محاسبات مورد نیاز را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. شکل ۲ پیکربندی یک سلول واحد تحت شرایط مرزی تکرارشونده را قبل و بعد از اعمال بارگذاری نشان می‌دهد.



شکل ۳. منحنی تنش- کرنش یک ماده تا نقطه شکست

۳. نتایج و بحث

در مقاله حاضر، از آلیاژ Ti6Al4V با خواص مکانیکی ارائه شده در جدول ۱ جهت انجام شبیه‌سازی‌های مورد نظر استفاده شده‌است. همانگونه که پیش‌تر بیان شد، برای مدل‌سازی رفتار شکست ماده از مدل آسیب جانسون-کوک استفاده شده‌است. جداول ۲ و ۳ به ترتیب پارامترهای مورد نیاز برای مدل مقاومت و مدل جانسون-کوک متناظر با ماده مورد استفاده را نمایش می‌دهند. شبیه‌سازی‌های مورد نظر در سه نرخ کرنش متفاوت، مطابق جدول ۴، انجام شده‌اند. از آنجا که کلیه نمونه‌ها تحت آزمایش فشار ساده آزموده شده‌اند می‌توان سرعت فک دستگاه تست فشار را با استفاده از رابطه ۱۲، به نرخ کرنش مورد نظر ارتباط داد [۱۵]. که در آن $\dot{\epsilon}_{(max)}$ نرخ کرنش، v سرعت فک دستگاه، یا همان سرعت سطح بالای نمونه، در شبیه‌سازی انجام شده و l_s طول اولیه نمونه می‌باشد. در این حالت با در نظر گرفتن یک مقدار مشخص برای نرخ کرنش می‌توان سرعت مورد نیاز جهت دستیابی به آن مقدار نرخ کرنش را محاسبه و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار داد.

$$\dot{\epsilon}_{(max)} = v/l_s \quad (12)$$

جدول ۱. خواص مکانیکی Ti6Al4V [۱۶]

چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون
۴/۴۳	۱۰۸	۰/۳۵

جدول ۲. ضرایب جانسون-کوک مربوط به مقاومت [۴]

A (MPa)	B (MPa)	C	m	n
۱۰۳۰	۹۵۲	۰/۰۱	۰/۸	۰/۴

$$\rho C_p \dot{T} - k \nabla^2 T = \alpha \dot{\epsilon}_{ij}^p \sigma_{ij} \quad (6)$$

که ρ چگالی، C_p ظرفیت گرمایی، k ضریب انتقال حرارتی و α نسبت کار پلاستیک تبدیل شده به گرما است.

۲-۴. مدل شکست

در این مقاله از مدل شکست جانسون-کوک برای مدل‌سازی رفتار شکست ماده استفاده شده‌است. این مدل به دو بخش، شامل شروع آسیب و تکامل آسیب تقسیم می‌شود. شکل ۳ منحنی تنش-کرنش یک ماده را به صورت شماتیک از لحظه آغاز بارگذاری تا شکست نهایی نمونه نشان می‌دهد. در این منحنی نقطه D بیانگر شکست اولیه و نقطه F مبین شکست کامل است. تکامل آسیب بر اساس یک متغیر حالت ω_D بیان می‌شود، که دارای دامنه $0 \leq \omega_D \leq 1$ است. تغییرات ω_D بر حسب کرنش پلاستیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\omega_D = \sum (\Delta \bar{\epsilon}^p / \bar{\epsilon}_D^p) \quad (7)$$

که در آن $\bar{\epsilon}_D^p$ کرنش پلاستیک در شکست اولیه بوده، که به

صورت زیر قابل بیان است [۴، ۱۲].

$$\bar{\epsilon}_D^p = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 x)] [1 + d_4 \ln(\bar{\epsilon}^p / \bar{\epsilon}_0)] [1 + d_5 T^*] \quad (8)$$

در این رابطه x نسبت فشار هیدرواستاتیک، p ، به تنش میز

است که رابطه آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$x = -p/\bar{\sigma} \quad (9)$$

در اینجا چنانچه از رابطه تنش - کرنش شکست در بخش

نرم شدن فرآیند تغییر شکل به طور مستقیم استفاده شود، کرنش

موضعی و اتلاف انرژی به شدت به اندازه مش وابسته می‌شود.

برای رفع این نقیصه، با استفاده از معادله انرژی شکست

هیلبرگ^{۱۳} [۱۴]، رشد آسیب به عنوان یک تابع از جابه‌جایی

پلاستیکی معادل \bar{u}_f^p به جای کرنش پلاستیک، $\bar{\epsilon}^p$ ، بیان می‌شود.

برای بیان رابطه بین \bar{u}_f^p و $\bar{\epsilon}^p$ ، اگر قبل از شروع آسیب، $\dot{\bar{u}}^p = 0$

باشد؛ پس از شروع آسیب رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\dot{\bar{u}}^p = L \dot{\bar{\epsilon}}^p \quad (10)$$

و در نقطه شکست:

$$\bar{u}_f^p = L \bar{\epsilon}_f^p \quad (11)$$

طول مشخصه، L ، همان طول مربع پایه از سطح المان در نظر

گرفته می‌شود [۱۴]. در این حالت وابستگی مش به میزان شکست

با استفاده از این مشخصه طول L ، به حداقل رسانده می‌شود.

جدول ۳. ضرایب جانسون-کوک مربوط به شکست [۴]

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	$T_0(K)$	$T_m(K)$
-۰/۲	۰/۲۵	۰/۲	۰/۰۱۴	۳/۸۷۰	۲۹۸	۱۸۷۸

جدول ۴. میزان نرخ کرنش و سرعت روی سطح بالایی مدل [۴]

نمونه	کرنش (/s)	سرعت (mm/s)
A	۱۰۰۰	-۵۱۰
B	۴۰۰۰	-۲۰۴۰
C	۸۰۰۰	-۴۰۸۰

مش را نصف می‌کنیم تا جایی که حداکثر تغییرات در منحنی تنش-کرنش کمتر از ۱۰ درصد گردد. شکل ۴ آنالیز حساسیت به مش برای نمونه‌ای با حفره مثلثی را نمایش می‌دهد. با استفاده از روش مذکور، اندازه مش ۰,۰۱ میلی‌متر بدست آمده و در کلیه تحلیل‌ها از این مقدار استفاده می‌گردد.

۳-۱. صحت سنجی نتایج

در این بخش، نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در این مقاله برای ساختار متخلخل با حفره دایره‌ای با نتایج ارائه شده توسط بیسواس و همکارش [۴] مورد مقایسه قرار می‌گیرد. شکل ۵ منحنی تنش-کرنش نمونه‌ای با حفره دایره‌ای و تخلخل ۱۰٪ که در نرخ کرنش ۸۰۰۰ بر ثانیه شبیه‌سازی شده است را نشان می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود همخوانی مطلوبی بین نتایج بدست آمده از مدل حاضر و مدل ارائه شده در [۴] وجود دارد. لازم به ذکر است که منحنی تنش-کرنش برای شکل حفره مذکور در تخلخل‌های ۰٪ و ۲۰٪ و نرخ کرنش‌های ۱۰۰۰ و ۴۰۰۰ بر ثانیه نیز بدست آمده و با نتایج ارائه شده توسط بیسواس و همکارش مورد مقایسه قرار گرفته که برای اختصار از ارائه آن‌ها خودداری می‌شود.

۳-۲. اثرات هندسه حفره و نرخ کرنش بر منحنی تنش-

کرنش

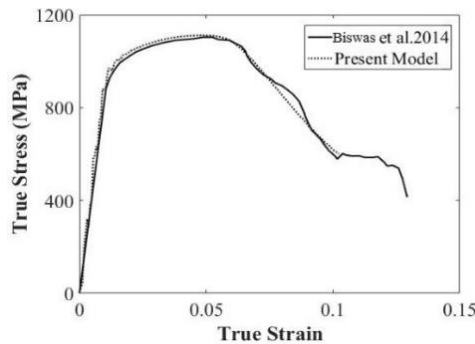
در این بخش اثرات شکل حفره ماده متخلخل بر منحنی تنش-کرنش، و بطور خاص بر مدول الاستیک و تنش فروپاشی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور نمونه‌های متخلخل با شکل حفره مستطیل عمودی (VR)، بیضی عمودی (VE)، مربع (Cu)، دایره (Ci)، بیضی مورب (DE)، لوزی (D)، مثلث (T)، مستطیل افقی (R) و بیضی افقی (E) در سه نرخ کرنش ۱۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ بر ثانیه و با تخلخل‌های ۱۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ به صورت عددی شبیه‌سازی شده و منحنی‌های تنش-کرنش آنها استخراج می‌گردد. لازم به ذکر است که برای مقدار تخلخل ۷۰ درصد، تولید هندسه برای برخی از شکل‌ها امکان‌پذیر نیست، چرا که حفره، دیواره‌های مدل را قطع کرده و به ایجاد دو جسم ناپیوسته منجر می‌گردد.

آزمون‌های تجربی نشان می‌دهند که در بارگذاری دینامیکی، انتقال حرارت از ماده معادل شرایط آدیباتیک است حال آنکه در آزمون‌های استاتیکی شرایط همدمای برقرار می‌باشد. خواص حرارتی مطابق جدول ۵ از داده‌های آزمایشی گزارش شده در [۴، ۱۲] استخراج شده و از آنجائیکه شرایط حرارتی کنترل نمی‌شود، اثرات حرارتی را از داده‌های موجود نمی‌توان جدا کرد. جزئیات مربوط به تعیین ثوابت مادی جهت استفاده در مدل جانسون-کوک در [۴] به طور کامل بیان شده است.

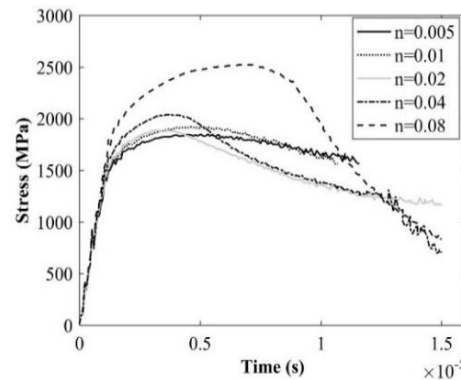
جدول ۵. خواص حرارتی استفاده شده در شبیه‌سازی [۴]

۷۷۳	۵۷۳	۳۷۳	۲۹۳	دما ($^{\circ}K$)
۱۱/۸	۹/۸	۷/۴	۶/۸	ضریب انتقال حرارت (W/mk) (k)
۷۰۳	۶۷۴	۶۲۴	۶۱۱	گرمای ویژه ($J/kg^{\circ}K$) (C_p)
			۰/۹	نسبت گرمای غیر الاستیک (α)

پس از مدلسازی نمونه دو بعدی با مورفولوژی حفره‌های مختلف، شبیه‌سازی به روش دینامیک صریح تحت شرایط بارگذاری، مطابق رابطه ۱۲ و نرخ کرنش مطابق جدول ۴، انجام می‌شود و تمامی مدل‌های تولید شده با استفاده از المان‌های چهار ضلعی کرنش صفحه‌ای با یک گره در راس هر المان، که در نرم‌افزار آباکوس با CPE4RT شناخته می‌شوند، مش‌بندی می‌گردند. برای جلوگیری از اعوجاج بیش از اندازه المان‌ها در حین بارگذاری از مش‌بندی تطبیقی^{۱۴} استفاده می‌شود. آنالیز حساسیت به مش برای کلیه هندسه‌های مورد نظر بررسی شده است. برای این منظور، با شروع از یک مقدار برای اندازه مش اولیه، اندازه



شکل ۵. مقایسه منحنی تنش- کرنش شبیه‌سازی شده ماده مشبک با حفره دایره‌ای شکل با ۱۰ درصد تخلخل در نرخ کرنش ۸۰۰۰ بر ثانیه با منحنی ارائه شده توسط بیسواس و همکارش



شکل ۴. آنالیز حساسیت مش برای ساختار با حفره مثلثی. در این منحنی n اندازه مش است

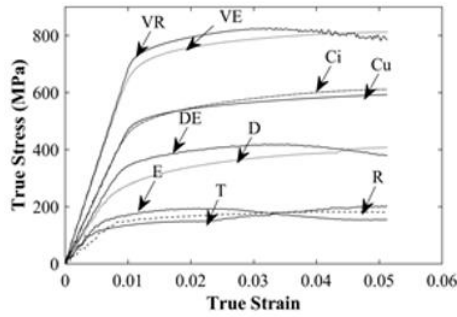
است. دلیل وجود کمترین تنش فروپاشی در حفره دایره‌ای شکل با تخلخل ۷۰٪ و نرخ کرنش ۸۰۰۰ بر ثانیه را می‌توان افزایش تخلخل، غالب شدن مکانیزم بارگذاری خمشی و افزایش نرخ کرنش در محدوده ۴۰۰۰-۸۰۰۰ بر ثانیه، که موج تنش به سرعت بالا می‌رود و ماده به سرعت می‌شکند، بیان کرد.

همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود مستطیل عمودی و بیضی عمودی بیشترین مقادیر تنش فروپاشی را نسبت به بقیه مورفولوژی‌ها به خود اختصاص داده‌اند. دلیل این امر آنست که مکانیزم تغییرشکل غالب در این ساختارها بارگذاری محوری است که سبب می‌شود سطح تنش لازم برای ایجاد تغییرشکل مورد نیاز افزایش یابد. با مقایسه مقدار تنش فروپاشی متناظر با شکل حفره‌های مختلف می‌توان دریافت که مقدار این تنش بسته به شکل حفره، می‌تواند با افزایش نرخ کرنش، افزایش یا کاهش داشته باشد.

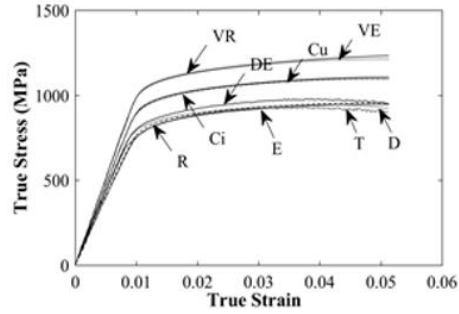
اثرات شکل حفره‌ها بر مدول الاستیک ماده متخلخل در شکل ۱۰ بررسی شده‌است. همانگونه که دیده می‌شود، بیشترین مدول الاستیک را به ترتیب مستطیل عمودی و بیضی عمودی با تخلخل ۱۰٪ در نرخ کرنش ۱۰۰۰ بر ثانیه دارد و کمترین مدول الاستیک را دایره در نرخ کرنش ۸۰۰۰ بر ثانیه با ۷۰٪ تخلخل دارد. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود مستطیل عمودی و بیضی عمودی همانند تنش فروپاشی، بیشترین مقادیر مدول الاستیک را نیز نسبت به بقیه مورفولوژی‌ها به خود اختصاص داده‌اند. می‌توان دریافت که مدول الاستیک و تنش فروپاشی با مکانیزم‌های تغییرشکل غالب ماده رابطه مستقیم دارند.

شکل‌های ۶، ۷ و ۸ منحنی تنش-کرنش مربوط به هندسه‌های مختلف را به ترتیب در نرخ کرنش‌های ۱۰۰۰ بر ثانیه، ۴۰۰۰ بر ثانیه و ۸۰۰۰ بر ثانیه مورد مقایسه قرار می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، شکل حفرات ماده متخلخل بشدت بر منحنی تنش-کرنش آن اثر می‌گذارد. بطوریکه این تاثیر در کرنش‌های اندک ناچیز بوده ولی با افزایش مقدار نرخ کرنش میزان اختلاف بین منحنی متناظر با شکل حفره‌های مختلف افزایش می‌یابد. همچنین، در کلیه مقادیر نرخ کرنش اعمالی، میزان اختلاف بین منحنی‌های تنش-کرنش با افزایش میزان تخلخل افزایش می‌یابد. نگاهی عمیق به منحنی‌های ارائه شده نشانگر آن است که صرف نظر از مقدار نرخ کرنش اعمالی و تخلخل ماده، رفتار متناظر با شکل حفرات VR و VE و CU و CI، DE و D و R و T و E تقریباً مشابه یکدیگر است. این مهم نشان می‌دهد که بیش از هر چیز نوع مکانیزم تغییرشکل در ماده بر پاسخ دینامیکی آن تاثیر گذار است. در این حالت هنگامی که بارگذاری محوری مکانیزم غالب تغییرشکل است سطح تنش، بیشترین مقدار را بخود اختصاص می‌دهد و با غالب شدن مکانیزم تغییرشکل بارگذاری خمشی سطح تنش نیز کاهش خواهد یافت. این نتایج با آنچه که توسط کارآموزراوری و همکارانش ارائه شده‌است همخوانی کاملی دارد [۱۷،۱۱].

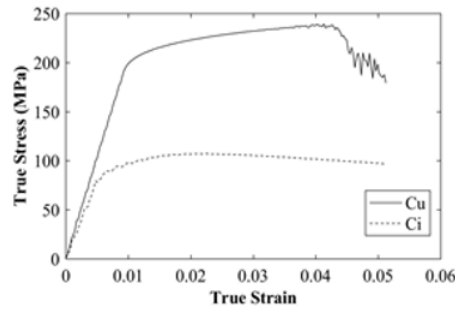
مقدار تنش فروپاشی ساختار متخلخل برای شکل حفره‌های مختلف در نرخ کرنش‌های متفاوت در شکل ۹ مورد مقایسه قرار گرفته‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود، بیشترین تنش فروپاشی مربوط به شکل حفره مستطیل عمودی با ۴۰٪ تخلخل در نرخ کرنش ۴۰۰۰ بر ثانیه بوده و کمترین مقدار آن مربوط به شکل حفره دایره‌ای شکل با تخلخل ۷۰٪ در نرخ کرنش ۸۰۰۰ بر ثانیه



(ب)

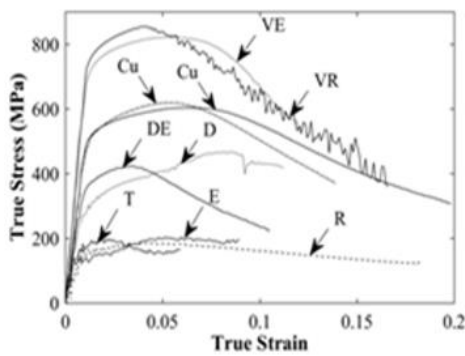


(الف)

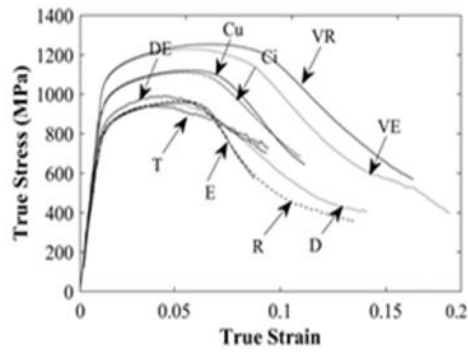


(ج)

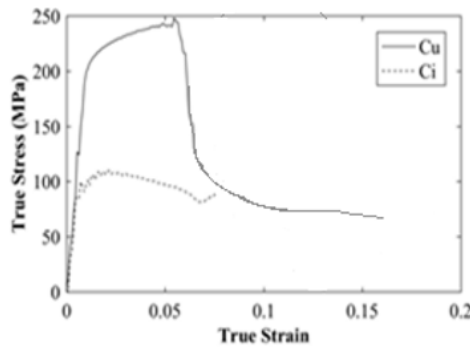
شکل ۶. منحنی تنش کرنش هندسه‌ی حفره‌ی مستطیل عمودی، بیضی عمودی، دایره، مربع، لوزی، بیضی مورب، مثلث، بیضی و مستطیل افقی در نرخ کرنش ۱۰۰۰ بر ثانیه و با (الف) ۱۰٪ تخلخل (ب) ۴۰٪ تخلخل (ج) ۷۰٪ تخلخل



(ب)

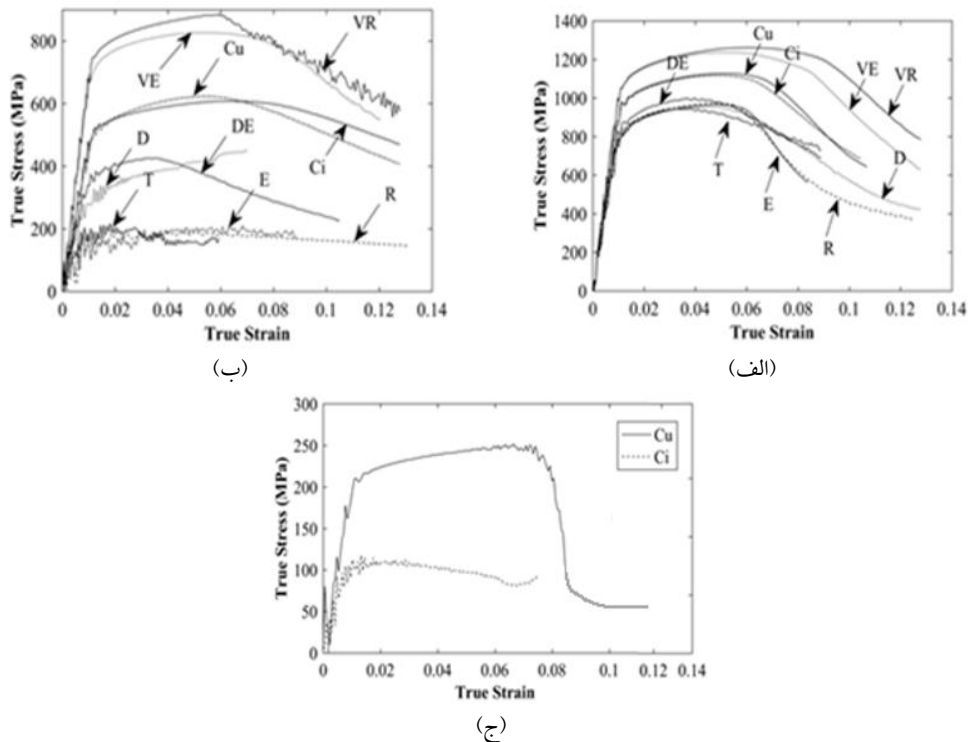


(الف)



(ج)

شکل ۷. منحنی تنش-کرنش هندسه‌ی حفره‌ی مستطیل عمودی، بیضی عمودی، دایره، مربع، لوزی، بیضی مورب، مثلث، بیضی و مستطیل افقی در نرخ کرنش ۴۰۰۰ بر ثانیه و با (الف) ۱۰٪ تخلخل (ب) ۴۰٪ تخلخل (ج) ۷۰٪ تخلخل



شکل ۸. منحنی تنش- کرنش هندسه‌ی حفره‌ی مستطیل عمودی، بیضی عمودی، دایره، مربع، لوزی، بیضی مورب، مثلث، بیضی و مستطیل افقی در نرخ کرنش ۸۰۰۰ بر ثانیه و با (الف) ۱۰٪ تخلخل (ب) ۴۰٪ تخلخل (ج) ۷۰٪ تخلخل

۳-۳. اثرات میزان تخلخل بر منحنی تنش-کرنش

در این بخش، منحنی تنش-کرنش سه تخلخل ۱۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ برای حفرات مختلف در نرخ کرنش ۱۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ بر ثانیه برای کلیه‌ی مورفولوژی‌های مختلف استخراج گشته، که برای اختصار تنها منحنی تنش-کرنش شکل حفره مربعی در نرخ کرنش ۸۰۰۰ بر ثانیه در سه تخلخل ۱۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ مطابق شکل ۱۱ ارائه می‌گردد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش میزان تخلخل در یک نرخ کرنش ثابت، سطح تنش به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. تمامی مورفولوژی‌ها در تخلخل‌های کم سطح تنش بیشتری نسبت به تخلخل‌های بالا دارند به عبارتی تنش فروپاشی مورفولوژی با تخلخل کم، بیشتر از مورفولوژی با تخلخل بالاست. با مراجعه به شکل ۱۱، همچنین می‌توان دریافت که ناحیه مسطح تنش^{۱۵} افزایش یافته که بیانگر افزایش جابجایی در ماده در تنش تقریباً ثابت است. این افزایش جابجایی تا شکست کامل نمونه ادامه یافته و سبب می‌شود که بتوان در تنش‌های اندک مقدار انرژی قابل توجهی را مستهلک نمود. این مهم اینگونه جاذب‌ها را برای محافظت از سازه‌های حساس که نیاز به محافظت دارند مناسب می‌سازد.

شکل ۱۲ کانتور تنش میزز حفره مربعی در سه تخلخل ۱۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ و نرخ کرنش ۸۰۰۰ بر ثانیه تا زمان ۰،۰۰۰۰۱۵ ثانیه نشان می‌دهند. با مراجعه به این شکل می‌توان دید که با افزایش میزان تخلخل تمرکز تنش در نزدیکی رئوس ماده مشبک افزایش می‌یابد. از سوی دیگر آسیب در ساختار ماده از طریق ایجاد یک باند برشی اتفاق افتاده که خود موجب محلی شدن کرنش‌ها در این باند می‌گردد.

۳-۴. اثرات هندسه حفرات، نرخ کرنش و تخلخل بر میزان جذب انرژی

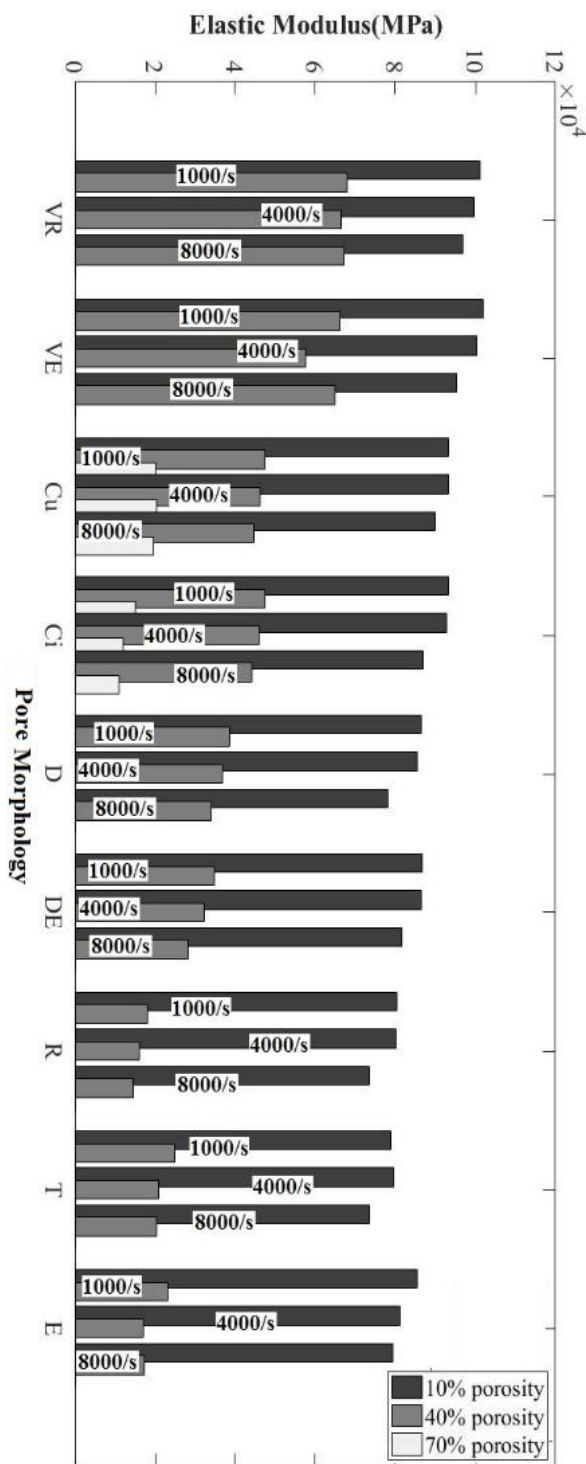
انرژی جذب شده در واحد جرم، ω_M ، با سطح زیر منحنی تنش-کرنش برابر بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید [۱].

$$\omega_M = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon / \rho^* \quad (۱۳)$$

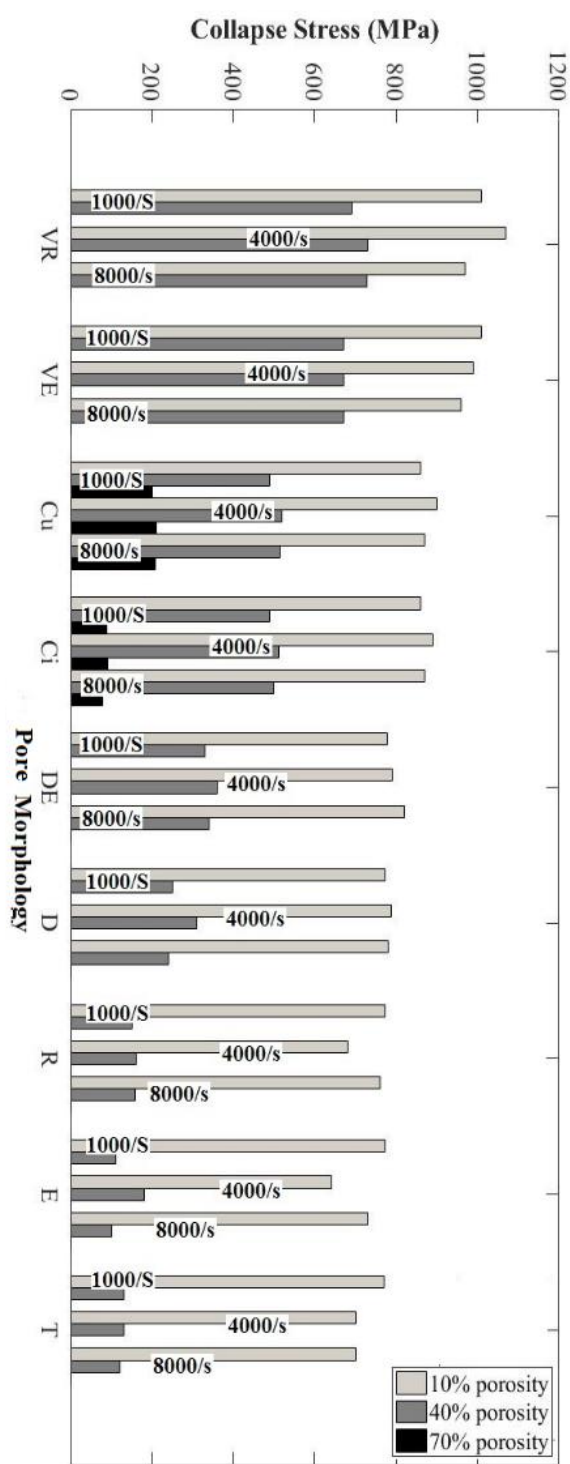
شکل ۱۳، میزان جذب انرژی را برای دو حفره‌ی مربعی و دایره‌ای شکل با سه تخلخل ۱۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ در نرخ کرنش ۱۰۰۰، ۲۵۰۰، ۴۰۰۰، ۵۵۰۰ و ۸۰۰۰ بر ثانیه مورد مقایسه قرار می‌دهد. در اینجا برای جلوگیری از شلوغ شدن شکل‌ها، تنها پاسخ این دو ساختار در ۵ نرخ کرنش بیان شده‌است ولی نتایج بدست آمده در این تحلیل به بقیه ساختارها نیز قابل تعمیم است. همان

کرنش کاهش می‌یابد. این مشاهده را می‌توان با در نظر گرفتن اینکه با افزایش نرخ کرنش در محدوده‌ی ۴۰۰۰-۸۰۰۰ برثانیه موج تنش به سرعت بالا می‌رود و ماده به سرعت می‌شکند، توجیه نمود.

طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود میزان جذب انرژی برای این دو مورفولوژی، با افزایش نرخ کرنش در محدوده ۱۰۰۰-۴۰۰۰ برثانیه افزایش می‌یابد و پس از آن در محدوده‌ی نرخ کرنش ۴۰۰۰-۸۰۰۰ برثانیه میزان جذب انرژی با افزایش نرخ

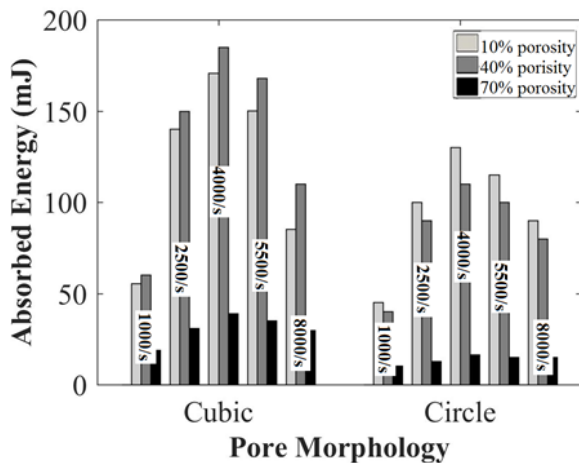


شکل ۱۰. مقایسه مدول الاستیک ماده مشبک با شکل حفره‌ی مستطیل عمودی، بیضی عمودی، دایره، مربع، لوزی، بیضی مورب، مثلث، بیضی و مستطیل افقی در نرخ کرنش ۱۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ برثانیه



شکل ۹. مقایسه تنش فروپاشی ماده مشبک با شکل حفرات مستطیل عمودی، بیضی عمودی، دایره، مربع، لوزی، بیضی مورب، مثلث، بیضی و مستطیل افقی در نرخ کرنش ۱۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ برثانیه

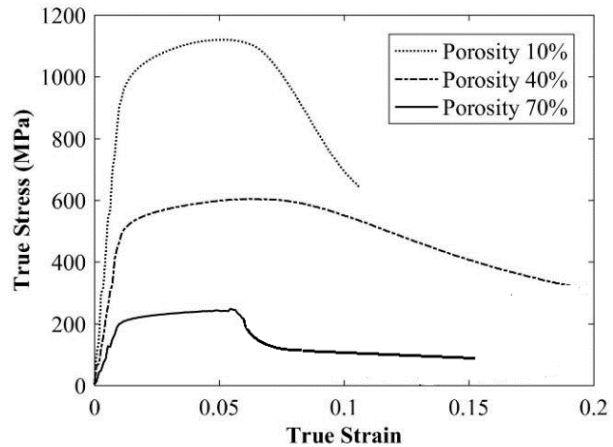
شکل ۱۴ میزان جذب انرژی را برای کلیه مورفولوژی‌های مورد مطالعه و تنها در ۳ نرخ کرنش ۱۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ مورد بررسی قرار می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که بیشترین جذب انرژی را حفره مستطیل عمودی در نرخ کرنش ۴۰۰۰ برنانه با ۴۰٪ تخلخل دارد و کمترین جذب انرژی را مستطیل افقی در نرخ کرنش ۱۰۰۰ برنانه با ۴۰٪ تخلخل دارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت با غالب شدن مکانیزم تغییر شکل محوری و افزایش نرخ کرنش، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد. همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود به طور کلی از میان مورفولوژی‌های مختلف می‌توان بیشترین جذب انرژی را به ترتیب به مستطیل عمودی و بیضی عمودی اختصاص داد. از طرفی دیگر بر اساس میزان تخلخل بهترین مورفولوژی برای جذب انرژی در تخلخل‌های ۱۰٪-۴۰٪، می‌توان مستطیل عمودی و در تخلخل‌های ۴۰٪-۷۰٪، مربع را بیان کرد. دلیل اینکه در تخلخل‌های بالا نمی‌توان مستطیل عمودی را به عنوان بهترین مورفولوژی برای جذب انرژی بیان کرد این است که برای مقدار تخلخل ۷۰ درصد تولید هندسه برای حفره مستطیل عمودی امکان‌پذیر نیست چرا که حفره دیواره‌های مدل را قطع کرده و به ایجاد دو جسم ناپیوسته منجر می‌شود.



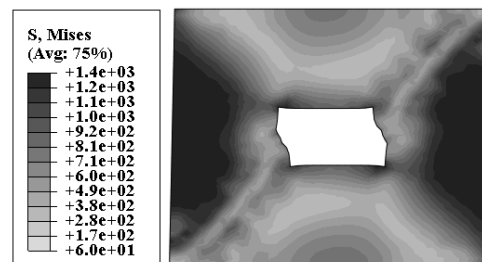
شکل ۱۳. مقایسه‌ی میزان جذب انرژی در مورفولوژی حفره‌ی دایره‌ای و مربعی با ۱۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ تخلخل در نرخ کرنش ۱۰۰۰، ۲۵۰۰، ۴۰۰۰، ۵۵۰۰ و ۸۰۰۰ برنانه

۴. نتیجه‌گیری

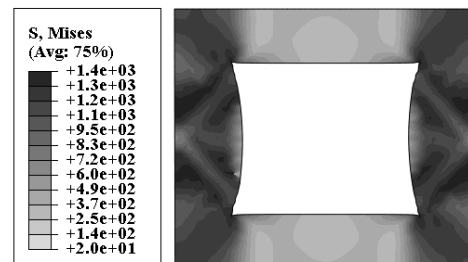
در مقاله حاضر اثرات میزان تخلخل و شکل حفره‌ها بر رفتار مکانیکی مواد مشبک، شامل منحنی تنش-کرنش، مدول



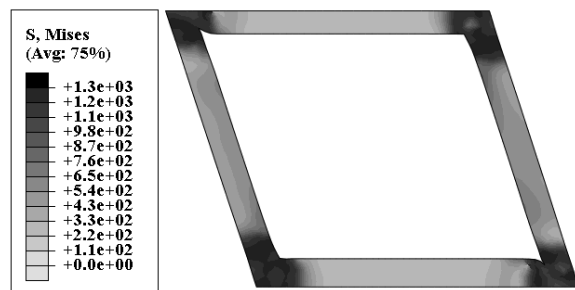
شکل ۱۱. منحنی تنش-کرنش حفره مربعی با ۱۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ تخلخل در نرخ کرنش ۸۰۰۰ برنانه



(الف)

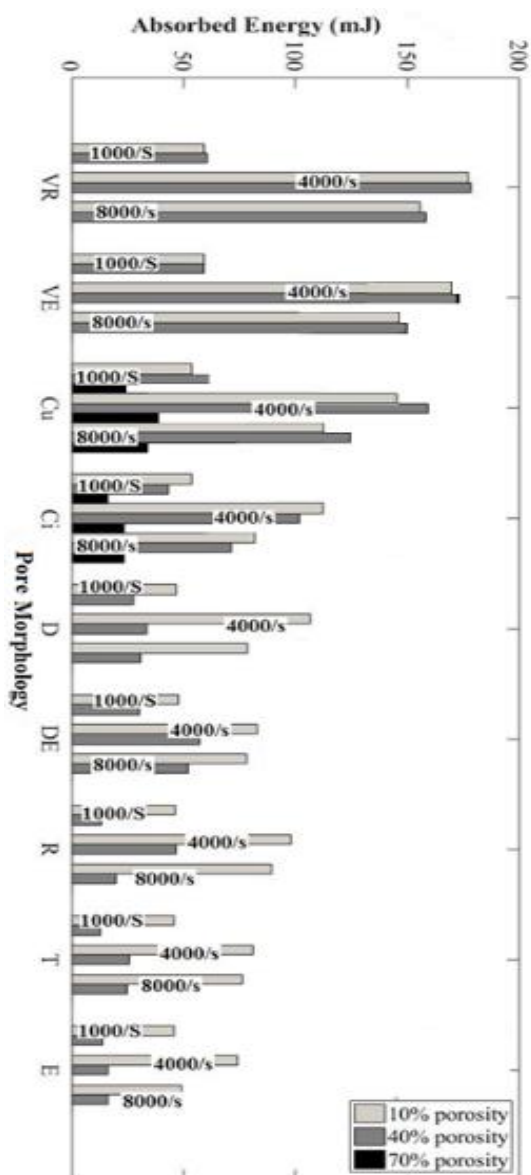


(ب)



(ج)

شکل ۱۲. کانتور تنش میز حفره مربعی با میزان جابه‌جایی ۰٫۰۶۱ میلی‌متر در مدت زمان ۰٫۰۰۰۱۵ ثانیه در نرخ کرنش ۸۰۰۰ برنانه با (الف) ۱۰٪ تخلخل (ب) ۴۰٪ تخلخل و (ج) ۷۰٪ تخلخل



شکل ۱۴. مقایسه‌ی میزان جذب انرژی برای حفره‌ی مستطیل و بیضی عمودی، دایره، مربع، لوزی، بیضی مورب، مثلث، بیضی و مستطیل افقی با تخلخل‌های مختلف و نرخ کرنش ۱۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ بر ثانیه

الاستیک، تنش فروپاشی و میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های انجام شده را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

۱. با افزایش میزان تخلخل میزان تنش فروپاشی و مدول الاستیک کاهش پیدا کرده و گستره ناحیه مسطح تنش افزایش می‌یابد. بنابراین مواد مشبک با تخلخل بالا برای کاربردهای جذب ضربه‌ای که نیاز به حساسیت بیشتری دارند مناسب هستند.
۲. با افزایش نرخ کرنش در محدوده‌ی ۱۰۰۰-۴۰۰۰ بر ثانیه میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد اما در محدوده‌ی نرخ کرنش ۴۰۰۰-۸۰۰۰ بر ثانیه میزان جذب انرژی با افزایش نرخ کرنش کاهش می‌یابد. چراکه با افزایش نرخ کرنش موج تنش به سرعت بالا می‌رود و ماده به سرعت می‌شکند.
۳. خواص مکانیکی یک ماده متخلخل بشدت به شکل حفرات آن وابسته است. چنانچه شکل حفره بگونه‌ای باشد که مکانیزم اصلی تغییر شکل متمایل به بارگذاری محوری باشد سطح تنش، مدول الاستیک، تنش فروپاشی و میزان جذب انرژی افزایش خواهد یافت و با حرکت به سمت ساختارهایی با مکانیزم تغییرشکل بارگذاری خمشی مقادیر این کمیت‌ها کاهش می‌یابد.
۴. با غالب شدن مکانیزم تغییرشکل محوری و افزایش نرخ کرنش، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد.

۵. مآخذ

- [1] Z. Wang, H. Ma, L. Zhao, G. Yang, Studies on the dynamic compressive properties of open-cell aluminum alloy foams, *Scripta Materialia*, Vol. 54, No. 1, pp. 83-87, 2006.
- [2] A. Nagy, W. L. Ko, U. S. Lindholm, Mechanical Behavior of Foamed Materials Under Dynamic Compression, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 10, No. 3, pp. 127-134, 1974.
- [3] Y. Shen, S. McKown, S. Tsopanos, C. J. Sutcliffe, R. Mines, The Mechanical Properties of Sandwich Structures Based on Metal Lattice Architectures, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 12, No. 2, pp. 159-180, 2010.
- [4] N. Biswas, J. L. Ding, Numerical study of the deformation and fracture behavior of porous Ti6Al4V alloy under static and dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 82, pp. 89-102, 2015.
- [5] F. Yi, Z. Zhu, F. Zu, S. Hu, P. Yi, Strain rate effects on the compressive property and the energy-absorbing capacity of aluminum alloy

- foams, *Materials Characterization*, Vol. 47, No. 5, pp. 417-422, 2001.
- [6] Z. Zheng, C. Wang, J. Yu, S. R. Reid, J. J. Harrigan, Dynamic stress-strain states for metal foams using a 3D cellular model, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 72, pp. 93-114, 2014.
- [7] Z. Ozdemir, E. Hernandez-Nava, A. Tyas, J.A. Warren, S.D. Fay, R. Goodall, I. Todd, H. Askes, Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 89, pp. 49-61, 2016.
- [8] N. Jin, F. Wang, Y. Wang, B. Zhang, H. Cheng, H. Zhang, Failure and energy absorption characteristics of four lattice structures under dynamic loading. *Materials & Design*, Vol. 169: pp. 107655, 2019.
- [9] Z. Xu, L. Zhang, L. Wang, J. Zuo, M. Yang, Computational characterization of the structural and mechanical properties of nanoporous titania. *RSC Advances*, Vol. 9, No. 27, pp. 15298-15306, 2019.
- [10] M. R. Karamooz Ravari, M. Kadkhodaei, A. Ghaei, A unit cell model for simulating the stress-strain response of porous shape memory alloys, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 24, No. 10, pp. 4096-4105, 2015.
- [11] M. R. Karamooz Ravari, S. Nasr Esfahani, M. Taheri Andani, M. Kadkhodaei, A. Ghaei, H. Karaca, M. Elahinia, On the effects of geometry, defects, and material asymmetry on the mechanical response of shape memory alloy cellular lattice structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 2, pp. 025008, 2016.
- [12] G. R. Johnson, W. H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering fracture mechanics*, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48, 1985.
- [13] J. L. Ding, Thermal and mechanical analysis of material response to non-steady ramp and steady shock wave loading, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 54, No. 2, pp. 237-265, 2006.
- [14] A. Hillerborg, M. Modéer, P. E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, No. 6, pp. 773-781, 1976.
- [15] H. Shen, L. C. Brinson, A numerical investigation of the effect of boundary conditions and representative volume element size for porous titanium, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 1, No. 7, pp. 1179-1204, 2006.
- [16] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, P. Young, Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 51, pp. 61-73, 2015.
- [17] M. R. Karamooz Ravari, M. Kadkhodaei, A. Ghaei, Effects of asymmetric material response on the mechanical behavior of porous shape memory alloys, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 27, No. 12, pp. 1687-1701, 2016.

پی نوشت

-
1. Selective laser melting
 2. SHPB
 3. Finite Element
 4. EBM
 5. Johnson_Cook (JC)
 6. Abaqus
 7. Dynamic Temperature Displacement Explicit
 8. Unit Cell
 9. Periodic Boundary Conditions
 10. Master Nodes
 11. Deviatoric
 12. Accumulated Equivalent Plastic Strain

-
13. Hillerborg's
 14. Adaptive Mesh
 15. Stress plateau