

ارزیابی رفتار مکانیکی فوم‌های فولاد زنگ‌نزن تولید شده به روش انحلال دانه‌های کروی اوره به عنوان فضا‌ساز

مسعود صحرایی^۱ علی محمد ناصریان نیک^{۲*} حمید سازگارانی^۳

چکیده

فوم‌های فلزی یا فلزات سلولی خانواده‌ای از مواد نو و پیشرفته به شمار می‌آیند که با توجه به ویژگی‌های منحصر به فردشان، امکان زیادی برای توسعه در سال‌های آینده خواهند داشت. پژوهش حاضر به ساخت فوم‌های فلزی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L که کاربردهای نسبتاً وسیعی در صنایع پزشکی (به ویژه ساخت ایمپلنت‌ها) دارد، می‌پردازد. برای این منظور، از روش متالورژی پودر و انحلال دانه‌های کروی اوره در آب به عنوان فضا نگه‌دارنده استفاده شد. اندازه‌گیری تخلخل، ارزیابی دیواره سلول‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون فشار روی نمونه‌های فولادی انجام شد. اثر میزان تخلخل و فشار اعمالی در طی فرآیند تولید روی رفتار مکانیکی فوم‌های تولیدی مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این، برای اولین بار، آزمون فشار توسط مدل صریح المان محدود فوم فولادی با ۳۰ درصد تخلخل شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از آن است که بیشترین استحکام تسلیم، استحکام نهایی و ناحیه پلاتو در فوم فولاد زنگ‌نزن با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی برابر با ۲۵۰ مگاپاسکال رخ داده است. تصاویر میکروسکوپی بیانگر آن است که اتصال ذرات آهن به خوبی صورت گرفته است و سلول‌ها مطابق با هندسه دانه‌های اوره، کاملاً کروی شکل هستند. علاوه بر این، مکانیزم تخریب نمونه‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های شبیه‌سازی شده تقریباً شبیه یکدیگر رخ می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: فوم فولاد زنگ‌نزن، ذرات کروی اوره، فشار، فضا‌ساز

Investigation of the mechanical properties of stainless steel foams manufactured through leachable spherical urea granules as a space holder

M. Sahraei

A.M. Naserian-Nik

H. Sazegaran

Foam materials are a family of new and advanced materials that due to their unique characteristics, will have a lot of potential for development in the coming years. The current research deals with the production of metal foams made of 316L stainless steel, which has a relatively wide application in the medical industry (especially in the production of implants). For this purpose, the methods of powder metallurgy and dissolving spherical urea particles in water has been used as a spacer have been employed. Porosity measurement, cell wall evaluation by scanning electron microscope and pressure test on steel specimens have been investigated. The effect of porosity and applied pressure during the production of the foams on their mechanical behavior have been studied. In addition to conducting experimental tests, the compressive test was simulated using an explicit finite element model for a steel foam with 30 percent of porosity. The results indicate that the failure mechanism of both experimental and simulated specimens occur approximately similar.

Keywords Stainless steel foam, Spherical urea particles, Pressure, Space holder

۱- مقدمه

فوم فولاد زنگ‌نزن مجموعه‌ای از رفتارهای متفاوت شامل: وزن سبک، استحکام بالا، قابلیت جذب انرژی فراوان و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی عالی را از خود ارائه می‌دهد [۱]. این فوم‌ها در کاربردهای مختلفی همانند مهندسی عمومی، هوا-فضا، حمل

^(۱) گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

^(۲) گروه مهندسی صنایع، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

و نقل، شیمی، نظامی و کاربردهای زیست پزشکی در حال مطالعه هستند [۲]. فوم‌های فولادی زنگ‌نزن جایگزین مناسبی برای فولاد زنگ‌نزن غیرفومی در محصولاتمانند ساندویچ پنل‌ها، فیلترهای روغن/گاز با دمای بالا، مبدل‌های حرارتی و کاتالیزور با دمای بالا خواهند بود [۳]. شایان ذکر است که تحقیقات زیادی روی فوم‌های سایر فلزات همچون تیتانیوم [۴] و نیکل [۵] انجام شده است. با توجه به هزینه بالای این مواد، فوم‌های فولادی زنگ‌نزن در حال حاضر کاندیدای جذابی برای مهندسی دما بالا و کاربردهای زیست پزشکی هستند. علاوه بر این، این دسته از فوم‌ها دارای مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون عالی و ویژگی‌های مکانیکی خوبی هستند [۶ و ۷]. این مواد را می‌توان با شیوه‌های مختلفی همانند اشباع [۸]، فوم‌سازی دوغابی [۹]، ذوب لیزری [۱۰]، پرس ایزواستاتیک داغ [۱۱] و استفاده از فضا‌ساز یا نگه‌دارنده فضا [۱۲] تولید کرد. در میان این روش‌ها، روش فضا‌ساز، روشی بسیار ساده و ارزان است که امکان به‌دست آوردن ساختارهای سلول باز با اندازه، شکل و توزیع مشخص و یکنواخت سلول‌ها و همچنین میزان تخلخل معین را به ارمغان می‌آورد.

در کل، دو نوع فضا‌ساز وجود دارد که می‌توان از آن‌ها برای ایجاد سلول‌ها در فوم‌های سلول باز استفاده کرد. مواد فرار مانند بی‌کربنات آمونیوم [۱۲]، نشاسته [۱۳]، ساکارز [۱۴] و منیزیم [۱۵] دسته اول هستند و سایر فضا‌سازها که قابلیت انحلال یا شستشو را دارند و نمونه‌هایی از آن‌ها شامل: نمک خوراکی [۱۶]، کاربامید [۱۷] و برمید پتاسیم [۱۸] می‌باشند. بسیاری از محققان، فوم‌های فولادی زنگ‌نزن و سایر فلزات را با استفاده از دانه‌های اوره به عنوان فضا‌ساز و روش غوطه‌وری قبل از پخت تولید کرده‌اند [۱۹ و ۲۰]. بکوز و اوکتای [۲۱] از شیوه‌ای استفاده کردند که در آن از دو شکل مختلف دانه‌های کاربامید (کروی و نامنظم) برای تهیه ورق‌های فوم فولادی با تخلخل‌های ۴۹/۲ تا ۷۱/۰ درصد استفاده کردند و استحکام تسلیم فوم‌ها بین ۲۰ تا ۹۲ مگاپاسکال و ضریب کشسانی آن از ۰/۷۱ تا ۱۹/۲ گیگاپاسکال گزارش شده است. میزایی و پایدار [۲۲] اقدام به ساخت فوم فولاد زنگ‌نزن L۳۱۶ با میزان تخلخل ۷۱/۵ درصد با استفاده از کاربامید کردند. گلسوی و ژرمن [۲۳] فوم فولاد زنگ‌نزن خود را با استفاده از روشی مشابه تهیه کردند. اکتای و مالتو [۲۴]، نمونه‌ای از فوم فولاد زنگ‌نزن بسیار متخلخل را با استفاده از روشی مشابه با آنچه در بالا توضیح داده شد، تهیه کردند.

اوره یک ماده آلی ارزان و در دسترس است که به راحتی در آب حل می‌شود و در مقایسه با سایر فضا‌سازها قابلیت انحلال بسیار بالاتری دارد [۲۵]. با این حال، فرآیند غوطه‌وری می‌تواند بر ساختار دیواره سلول‌ها موثر باشد، در برخی موارد اندازه منافذ را بزرگ می‌کند و در برخی موارد دیگر، باعث ایجاد ریزحفرات در دیوار سلول‌ها می‌شود [۲۶]. تمام موارد فوق در صورتی رخ می‌دهند که فرآیند غوطه‌وری کنترل نشود و اغلب منجر به افت ویژگی‌های مکانیکی می‌گردد. اسمولیکو و همکاران [۲۷] از ذرات درشت کاربامید به عنوان فضا‌ساز برای تولید ساختارهای فوم تیتانیوم با استفاده از روش انحلال در آب استفاده کردند. مشخص شد که شکل سلول‌های فوم با میزان تخلخل بالاتر تغییر پیدا کرده است و دیوارهای سلول‌ها در برخی قسمت‌ها در طی فرآیند غوطه‌وری و شستشوی کاربامید از بین رفته‌اند. باید در نظر داشت که اوره با تبخیر نیز به راحتی تجزیه است. این ماده، با فلزات واکنش نمی‌دهد و بدون تولید مواد مضر کاملاً از درون فوم خام خارج می‌شود. جوشی و همکاران [۲۸] از ذرات میکرو اوره به عنوان فضا‌ساز استفاده کردند و از روش تبخیر بهره بردند. در منحنی‌های تنش-کرنش فوم‌های آن‌ها، منطقه پلاتو در مطالعه آن‌ها به دلیل اندازه سلول ریزتر مشاهده نشد. هر چند که مطالعات فراوانی بر روی شیوه‌های ساخت و تولید و همچنین تأثیرات نوع و مقدار فضا‌ساز بر روی ریخت سلول‌ها و رفتار مکانیکی فوم‌های فولاد زنگ‌نزن صورت گرفته است، اما، هدف اصلی این مطالعه ارزیابی تأثیرات عوامل تولید (درصد اوره و مقدار فشار اعمالی) بر میزان تخلخل و رفتار فشاری فوم‌های فولادی زنگ‌نزن است.

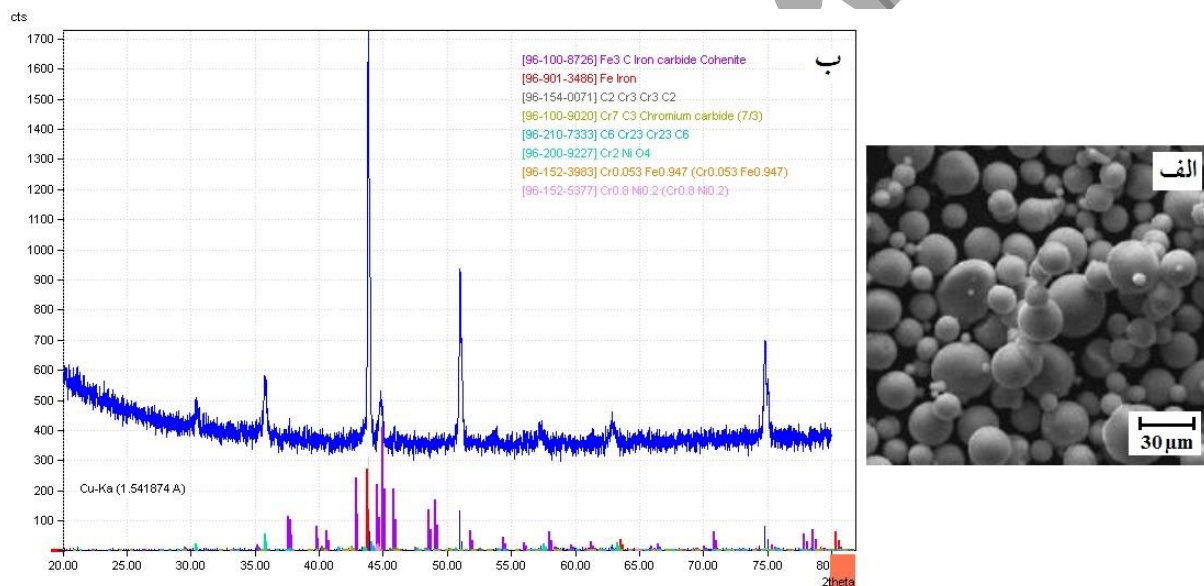
۲- مواد و روش آزمون‌ها

۲-۱- مواد

پودر فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ L از شرکت چینی Tijo با خلوص ۹۹/۹ درصد به عنوان ماده اولیه استفاده شد. مشخصات این ماده در جدول (۱) ارائه شده است. الگوهای طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس پودر زنگ‌نزن با میکروسکوپ الکترونی (LEO 1450VP 35KV) اندازه‌گیری شد (شکل ۱). بیشتر ذرات پودر فولاد کوچک‌تر از ۲۳ میکرومتر با اندازه متوسط ذرات 13 ± 0.2 میکرومتر و ذرات کروی و بی‌شکل هستند. اوره مورد استفاده از شرکت پتروشیمی بجنورد تهیه شده است. قطر دانه‌های اوره بین ۱/۴ تا ۲/۶ میلی‌متر است. قطر متوسط دانه‌های اوره 2 ± 0.2 میلی‌متر است. اوره کروی به عنوان فضا‌ساز انتخاب شد و علت آن به خروج راحت آن در دماهای پایین (۱۳۵ درجه سانتیگراد) و بدون واکنش با ذرات پودر فولاد زنگ‌نزن ارتباط دارد. یک محلول پلی‌وینیل الکل مبتنی بر آب (۵ درصد وزنی چسب پلی‌وینیل الکل و ۹۵ درصد وزنی آب مقطر) به عنوان یک چسب آلی برای اطمینان از چسبیدن ذرات پودر فلزی به دانه‌های اوره و همچنین ایجاد استحکام کافی، استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات پودر فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L

عنصر	کروم	نیکل	مولیبدن	سیلیسیم	منگنز	کربن	فسفر	گوگرد	اکسیژن	آهن
درصد وزنی	۱۷/۱۰	۱۰/۷۹	۲/۵۷	۰/۷۰	۱/۵۶	۰/۰۲۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۰۵۹	الباقی



شکل ۱: الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و ب) آنالیز طیف‌سنج پراش اشعه ایکس از پودر فولاد زنگ‌نزن استفاده شده.

۲-۲- ساخت و تولید فوم‌ها

از روش متالورژی پودر مبتنی بر استفاده از فضا‌ساز برای ایجاد سلول‌ها و تولید فوم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L استفاده شد. فرآیند تولید شامل: پوشش‌دهی دانه‌های اوره توسط پودر فولاد زنگ‌نزن، فشردن دانه‌های اوره پوشش یافته و تهیه نمونه‌های خام، غوطه‌وری نمونه‌های خام درون حمام گرم آب مقطر برای انحلال اوره و تف‌جوشی درون کوره است. قابل ذکر است که فرآیندهای غوطه‌وری در حمام آب گرم و خشک کردن در کوره گرم به صورت متوالی برای حذف فضا‌ساز استفاده می‌شود. مزیت استفاده از حمام آب گرم برای برداشتن فضا‌ساز این است که باعث می‌شود فوم تولیدی تنش حرارتی کمتری را تجربه کند و در نتیجه، رفتار مکانیکی بهتری به دست آورد. ابتداء، مطابق با وزن‌های محاسبه شده پودر فولاد زنگ‌نزن و اوره (درصد وزنی اوره برابر

۳۰، ۳۲/۵، ۳۵، ۳۷/۵ و ۴۰ در نظر گرفته شد)، مخلوط تهیه شده توسط پاشش آب مقطر مرطوب می‌شود و در ادامه، فرآیند اختلاط به همراه چسب پلی‌وینیل الکل درون مخلوط‌کن صورت می‌گیرد. زمان اختلاط برابر ۱۵ دقیقه انتخاب شد و بعد از انجام این فرآیند، دانه‌های اوره پوشش یافته درون قالب فولادی استوانه‌ای شکل قرار داده می‌شوند و فرآیند فشردن توسط یک پرس هیدرولیک صورت می‌گیرد. فشارهای اعمالی برابر ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰، ۲۲۵ و ۲۵۰ MPa انتخاب شدند تا اثر میزان فشار اعمالی مورد مطالعه قرار گیرد. سپس، فوم‌های خام از قالب خارج می‌شوند و برای انحلال اوره، به حمام آب مقطر گرم منتقل می‌شوند. هر نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب مقطر گرم با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود و در ادامه، فرآیند خشک شدن در دمای اتاق صورت می‌گیرد. در این مرحله، حدود ۹۰ درصد وزنی اوره و چسب پلی‌وینیل الکل حذف می‌گردد. از آنجایی که در این مرحله تمام اوره و چسب به طور کامل حذف نمی‌شوند، از کوره پیش‌گرمایش برای حذف باقیمانده دانه‌های اوره و چسب پلی‌وینیل الکل بهره گرفته می‌شود. بدین منظور، فوم‌های خام در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت یک ساعت درون کوره قرار داده می‌شوند. سپس، فوم‌ها از کوره پیش‌گرمایش خارج می‌شوند و بعد از سرد شدن در هوا تا دمای اتاق به کوره اصلی تف‌جوشی با اتمسفر هیدروژن و نیتروژن (با ۲۵ درصد حجمی هیدروژن و ۷۵ درصد حجمی نیتروژن) منتقل می‌گردد. فرآیند تف‌جوشی به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد. شایان توجه است که نرخ تغییرات دما برابر ۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه انتخاب شد، تا از ایجاد تنش حرارتی ممانعت به عمل آید. لازم به ذکر است که اتمسفر کوره تف‌جوشی، از اکسید شدن فولاد در دمای بالا جلوگیری می‌کند. در نهایت، پس از خارج شدن نمونه‌ها از کوره، فوم‌های تولیدی برای تعیین چگالی و میزان تخلخل و انجام آزمایشات ریزساختاری و فشار آماده هستند. جدول (۲) مشخصات نمونه‌های مختلف ایجاد شده به این روش را نشان می‌دهد. فرآیند کلی آماده‌سازی نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات فوم‌های تولیدی.

فشار تولید فوم (مگاپاسکال)	۱۵۰	۱۷۵	۲۰۰	۲۲۵	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰
درصد وزنی اوره	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۲/۵	۳۵	۳۷/۵	۴۰



شکل ۲: نمایش نحوه فرآیند تولید فوم فولاد ضد زنگ‌زن.

۲-۳- اندازه‌گیری چگالی و تخلخل

میزان چگالی و درصد وزنی اوره فوم‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L که درصد وزنی اوره و میزان فشار اعمالی در آن‌ها تغییر کرده است، به روش اندازه‌گیری ابعادی و تعیین وزن توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت 0.001 g تعیین شد. به منظور اندازه‌گیری چگالی فوم‌های فولادی از معادله (۱) و برای اندازه‌گیری درصد وزنی اوره آن‌ها از معادله (۲) استفاده گردید [۲۹-۳۱]. قابل ذکر است که در معادله (۲)، چگالی جامد همان چگالی فولاد زنگ‌نزن بدون تخلخل برابر 8 g/cm^3 در نظر گرفته شد.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{معادله (۱)}$$

$$P\% = \left[1 - \left(\frac{\rho_F}{\rho_S} \right) \right] \times 100 \quad \text{معادله (۲)}$$

در معادلات فوق، ρ چگالی، m جرم، V حجم، $P\%$ درصد وزنی اوره، ρ_F چگالی نمونه فومی و ρ_S چگالی فولاد زنگ‌نزن بدون تخلخل است.

۲-۴- ارزیابی ریزساختاری

به منظور تعیین ریخت ذرات پودر مورد استفاده و همچنین مطالعه‌ی ریزساختار دیواره سلول‌ها در فوم‌های فولاد زنگ‌نزن، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. فوم‌های فولادی زنگ‌نزن ابتدا توسط دستگاه وایر کات (Dk7732ZAC) در جهت عمود به محور برش داده شدند و سپس، فرآیندهای مانع گرم، سمباده‌زنی و پولیش کاری بر روی آن‌ها انجام شد. نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط آلیاژ Au-Pd و با دستگاه Sputter Coater SC7620 پوشش‌دهی شدند و سپس، مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط دستگاه LEO 1450VP انجام شد. علاوه بر این، برای شناسایی ترکیب شیمیایی فازهای گوناگون تشکیل شده در دیواره سلول‌های فوم‌های فولادی از اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی (EDS) استفاده شد.

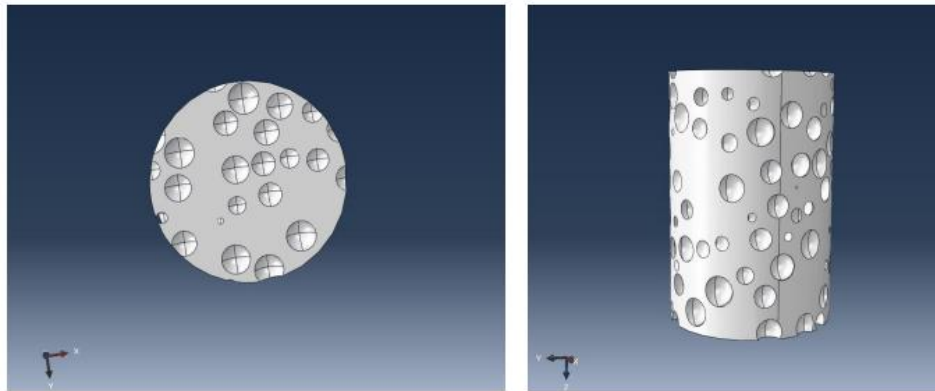
۲-۵- ارزیابی رفتار مکانیکی

در پژوهش حاضر، برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی مورد نظر از ۹ فوم فولادی تولید شده استفاده شد. قابل ذکر است که اثر تغییر درصد وزنی اوره و تغییر میزان فشار اعمالی در مرحله فشردن مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تعیین رفتار مکانیکی فوم‌های فولاد زنگ‌نزن از آزمون فشار هم‌محور استفاده شد. این آزمون توسط دستگاه آلمانی Zwick مدل Z250 انجام گردید. ابتدا، فوم‌های فولاد زنگ‌نزن توسط دستگاه وایرکات (Dk7732ZAC) در جهت عمود بر محور به گونه‌ای بریده شدند که نمونه‌ای استوانه‌ای تولید شد. قابل ذکر است که سرعت حرکت فک‌ها در آزمون فشار برابر 2 mm/min انتخاب شد.

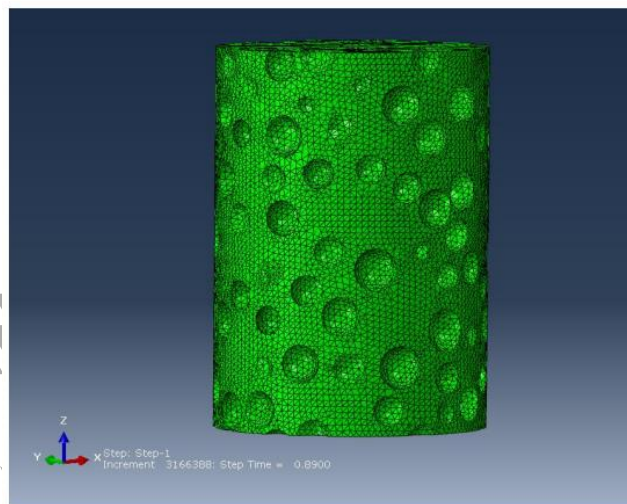
۲-۶- مدل‌سازی

شبیه‌سازی عددی آزمایش فشار فوم فلزی به کمک روش المان محدود برای یک نمونه با درصد تخلخل ۳۰ انجام شد. قبل از انجام شبیه‌سازی مدل CAD فوم فلزی به صورت یک استوانه به قطر ۱۴ و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر ایجاد شد. حفرات در مدل فومی از قطر ۶۰ میکرومتر تا ۲۰۰ میکرومتر بصورت تصادفی توزیع شده‌اند. تغییرات قطر حفرات در بازه مذکور یکنواخت است. از ضخامت دیواره حفرات چشم‌پوشی شده است. شکل (۳) مدل مذکور را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی آزمایش فشار در نرم افزار اباکوس^۱ (نسخه 2020) انجام شد. برای این منظور از دو نقطه مرجع در دو انتهای استوانه کمک گرفته شده است. یک انتهای مدل ثابت و به انتهای دیگر جابجایی اعمال می‌شود. سعی شده است رفتار مکانیکی ماده تشکیل‌دهنده مدل فومی نزدیک به

رفتار نمونه با درصد تخلخل صفر منظور شود. برای شبیه‌سازی ترک و فرآیند شکست انجام شده از معیار آسیب ductile damage استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از حلگر صریح^۱ و روش مقیاس جرم^۲ استفاده شده است. بدیهی است وجود تخلخل نیازمند اعمال شبکه‌بندی ریزتر برای حل صحیح می‌باشد (شکل (۴)).



شکل ۳: مدل CAD فوم فولادی.



شکل ۴: نحوه مش‌زنی در نرم‌افزار آباکوس.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- رفتار مکانیکی

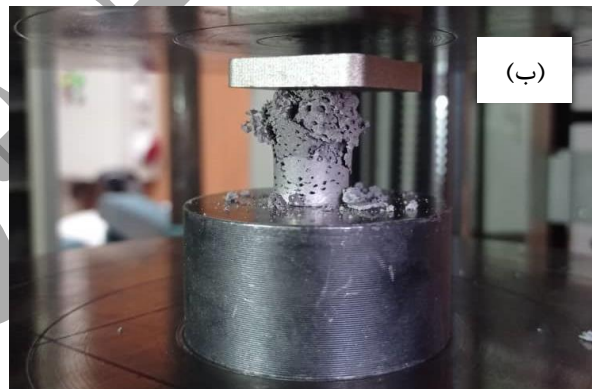
همان طور که قبلاً نیز بیان شد، به منظور ارزیابی رفتار مکانیکی فوم‌های فولاد زنگ‌نزن از آزمون فشار بهره گرفته شد. در شکل (۵)، نحوه قرارگیری نمونه‌های فومی تولید شده درون دستگاه آزمون فشار نشان داده شده است. منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمده از آزمون فشار برای فوم‌های تولید شده در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود هر دو عامل درصد وزنی اوره و مقدار فشار اعمالی بر روی منحنی‌های تنش-کرنش موثر هستند. با کاهش میزان تخلخل و

¹ Explicit solver

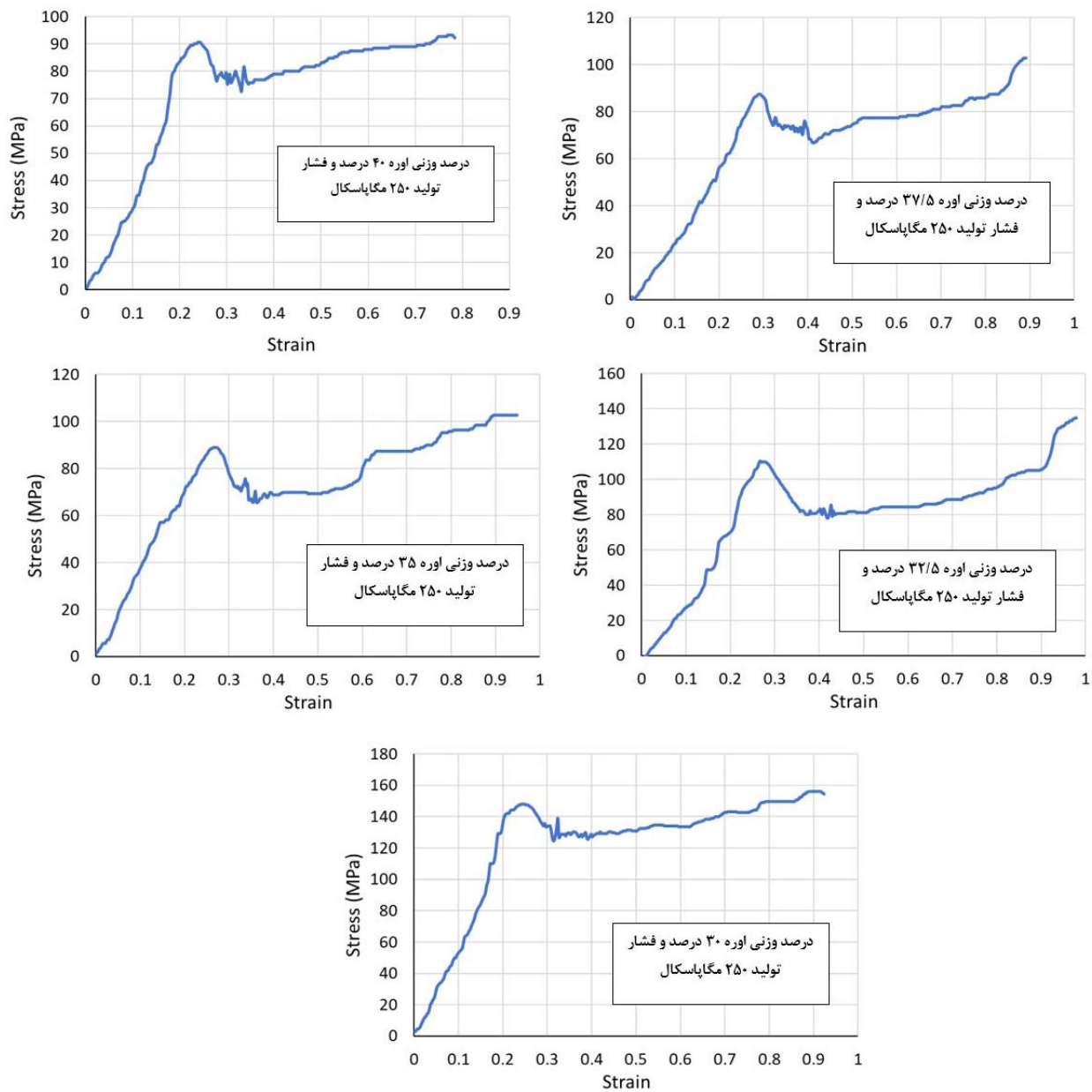
² Mass scale

افزایش فشار اعمالی در مرحله فشردن بهترین نتیجه را از نظر استحکام نهایی و تسلیم فوم به دست می‌آوریم. در بررسی بیشتر نمودارهای کرنش-تنش به دست آمده از آزمایش فشار، این نتیجه به دست می‌آید که افزایش فشار در مرحله فشردن باعث می‌شود که ذرات پودر فولاد در طی فرآیند تولید بیشتر به هم نزدیک شوند و این خود باعث بهبود جوش سرد بین ذرات پودر می‌شود. در نتیجه، ماده خام تولید شده انسجام بیشتری خواهد داشت. بنابراین، میزان تخریب دیواره سلول‌ها در طول فرآیند غوطه‌وری درون آب مقطر و همچنین فرآیند پیش‌گرمایش بسیار کاهش می‌یابد.

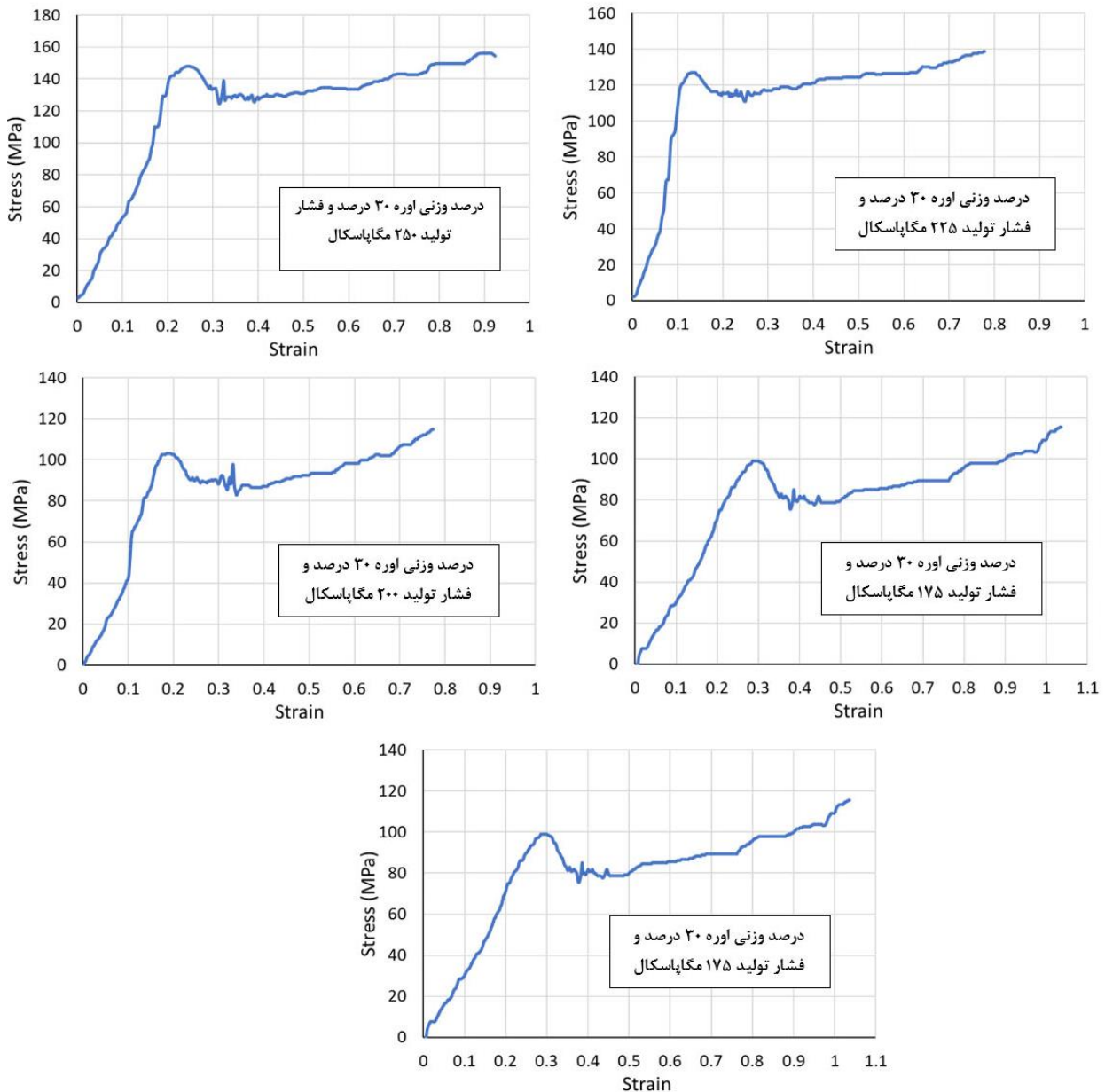
در نمونه حاوی ۳۰ درصد وزنی اوره، تنش تسلیم و تنش نهایی با افزایش فشار به تدریج افزایش می‌یابند. با افزایش میزان تخلخل به دلیل ایجاد فضای خالی بیشتر و همچنین افزایش سطوح شکستگی در دیواره‌ها، کاهش تنش تسلیم و تنش نهایی رخ می‌دهد. از طرف دیگر، دلیل بهبود تنش تسلیم با افزایش فشار اعمالی در طی فرآیند تولید به اتصال بهتر ذرات پودر فولاد در مرحله فشردن و همچنین در فرآیند تف‌جوشی نهایی فوم درون کوره ارتباط پیدا می‌کند که به نوبه خود تنش تسلیم را افزایش می‌دهد. در نمودارهای تنش-کرنش شکل‌های (۶) و (۷) استحکام نهایی از تنش تسلیم فراتر می‌رود، زیرا پس از عبور از نقطه استحکام نهایی، بخشی از فضاهای خالی موجود از بین رفته و ماده به صورت جامد متراکم‌تری درمی‌آید. همان طور که از نمودارهای به دست آمده مشخص است، فوم با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی برابر با ۲۵۰ مگاپاسکال دارای بیشترین استحکام تسلیم و استحکام نهایی است که به ترتیب حدود ۱۵۲ و ۱۵۸ مگاپاسکال می‌باشند.



شکل ۵: نمونه فوم بین فک‌های دستگاه آزمایش فشار (الف) قبل از اعمال فشار و (ب) در مرحله نهایی اعمال فشار.



شکل ۶: نمایش اثر تغییر فشار اعمالی و درصد وزنی اوره ثابت در نمودار تنش- کرنش فشاری فومهای تولیدی.



شکل ۷: نمایش اثر تغییر فشار اعمالی و درصد وزنی اوره ثابت در نمودار تنش-کرنش فشاری فوم‌های تولیدی.

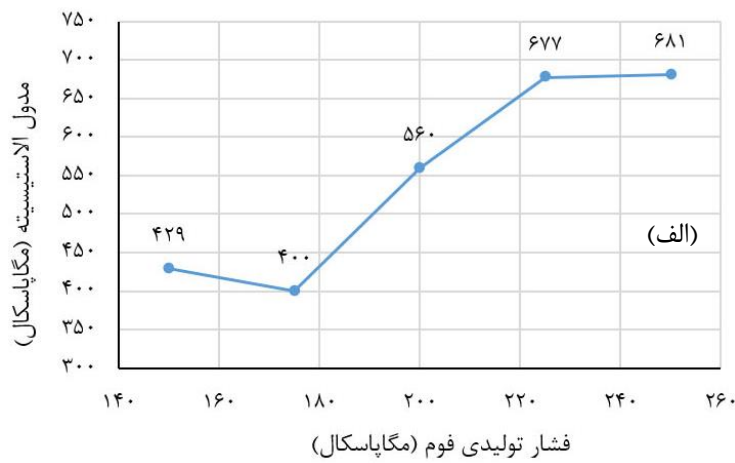
با استفاده از منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمده از آزمون فشار، چهار ویژگی مکانیکی شامل: ضریب کشسانی (مدول الاستیسیته)، طول ناحیه پلاتیو^۱، کرنش نرمی^۲ و کرنش سختی^۳ در فوم‌های تولیدی محاسبه شده‌اند. ضریب کشسانی در واقع معادل شیب خط در ناحیه الاستیک در نمودار تنش-کرنش است. ضریب کشسانی توسط شیب خط در محدوده الاستیک با برآزش یک خط راست به محدوده الاستیک خطی (قبل از نقطه تسلیم) بر روی منحنی تنش-کرنش محاسبه می‌شود. نتایج به دست آمده برای فوم‌های تولیدی در این پژوهش مطابق نمودارهای شکل (۸) است. همان طور که در نمودارهای شکل (۸) مشاهده می‌شود، بیشترین ضریب کشسانی برابر با ۶۸۱ مگاپاسکال مربوط به فوم با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی ۲۵۰

¹ Plateau

² Strain softening

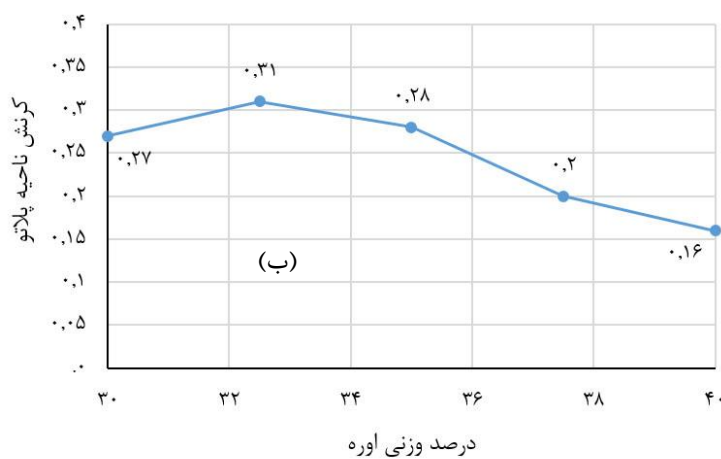
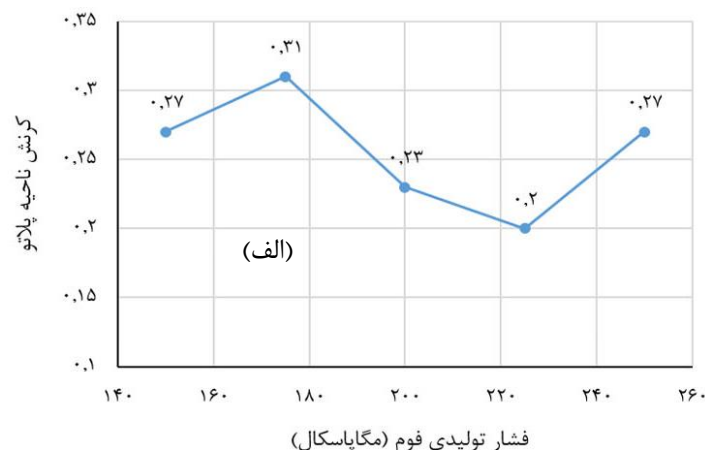
³ Strain hardening

مگاپاسکال است. به طور کلی، روند افزایش ضریب کشسانی با کاهش میزان تخلخل و افزایش فشار اعمالی رابطه معکوس نشان می‌دهد.



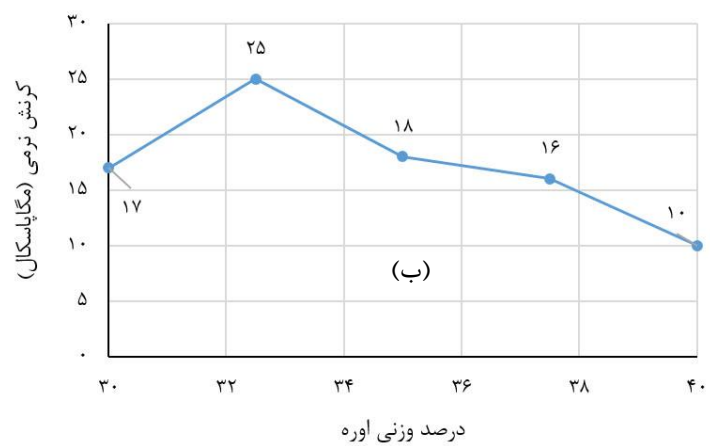
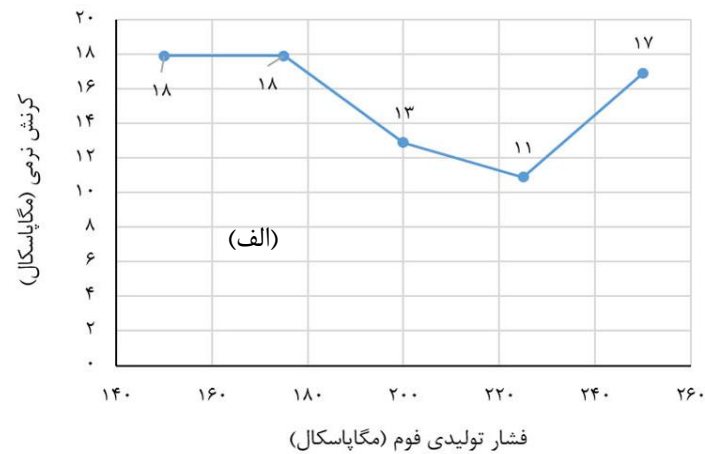
شکل ۸: الف) ضریب کشسانی برای فوم‌های تولیدی با ۳۰ درصد وزنی اوره تحت فشارهای اعمالی مختلف و ب) ضریب کشسانی برای فوم‌های تولیدی با مقدار اوره گوناگون و تحت فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال.

ناحیه پلاتیو با جذب انرژی بسیار زیاد توسط فوم در حین اعمال فشار و فشرده شدن ماده همراه است که در طی آن، دیواره‌های سلول‌های توخالی ایجاد شده توسط خروج دانه‌های اوره تمایل به تحمل تنش دارند و در برخی نواحی پدیده شکستن به صورت موضعی رخ می‌دهد. برای محاسبه طول ناحیه پلاتو، طول قسمت دنداندار نمودار تنش- کرنش اندازه‌گیری شد که از اختلاف مقادیر کرنش در ابتدا و انتهای قسمت دنداندار به دست می‌آید. دلیل ناهمواری این ناحیه و تشکیل دره‌ها و قله‌های تنشی شکسته شدن دیواره سلول‌ها است. به طور کلی، با کاهش میزان تخلخل، کاهش طول این ناحیه اتفاق می‌افتد. نمودار شکل (۹) نشان می‌دهد که طول این ناحیه بستگی زیادی به فشار اعمالی در طی فرآیند تولید فوم فولاد زنگ‌نزن ندارد. حداکثر طول مطابق نمودارهای شکل (۹) مربوط به نمونه با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال است که با نتایج قبلی مطابقت دارد.

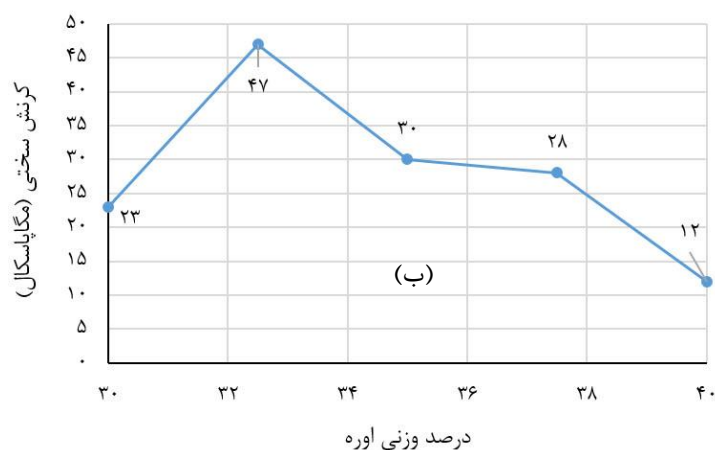
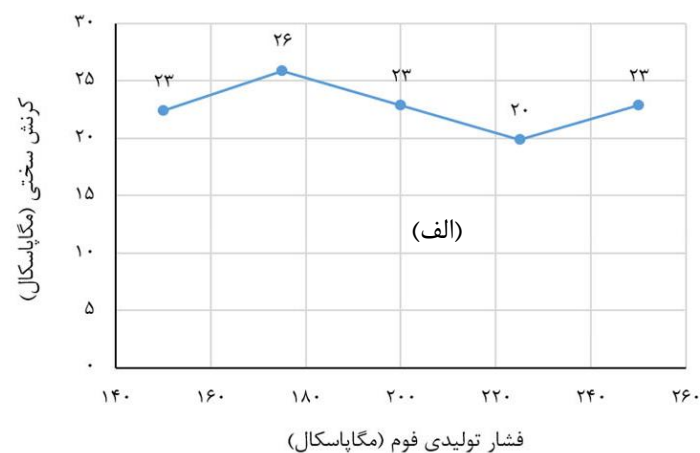


شکل ۹: الف) طول ناحیه پلاتیو برای فوم‌های تولیدی با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشارهای اعمالی مختلف و ب) طول ناحیه پلاتیو برای فوم‌های تولیدی با درصد‌های اوره مختلف و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال.

کرنش سختی پدیده افزایش سختی و استحکام فلزات چکش خوار در هنگام تغییر شکل پلاستیک (دائم یا مومسان) است. به هنگام کرنش نرمی، سطح تنش با افزایش کرنش‌های برشی کاهش می‌یابد و تغییر شکل پلاستیک ایجاد می‌شود. تغییرات کرنش نرمی و کرنش سختی فوم‌های تولید شده در این پژوهش با استفاده از نمودارهای تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش فشار و در قالب نمودارهای شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است. کرنش سختی با استفاده از اختلاف مقادیر تنش در انتهای ناحیه پلاتیو و نقطه تنش نهایی و کرنش نرمی، از اختلاف مقادیر تنش در نقطه تسلیم و ابتدای ناحیه پلاتیو به دست می‌آید. با تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که فوم فولاد زنگ‌نزن با مقدار اوره ۳۲/۵ درصد وزنی و فشار اعمالی ۱۷۵ مگاپاسکال دارای بالاترین کرنش نرمی و کرنش سختی در مقایسه با سایر نمونه‌های مورد بررسی است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که وابستگی کرنش نرمی و کرنش سختی به فشار اعمالی در فرآیند تولید فوم قابل توجه نیست، اما به طور کلی در محدوده تخلخل مورد مطالعه با کاهش درصد وزنی اوره (با کاهش درصد وزنی اوره)، تمایل به نرم شدن کرنش و کرنش سختی کاهش می‌یابد. کمترین کرنش سختی و کمترین کرنش نرم کننده مربوط به نمونه با ۴۰ درصد وزنی اوره است.



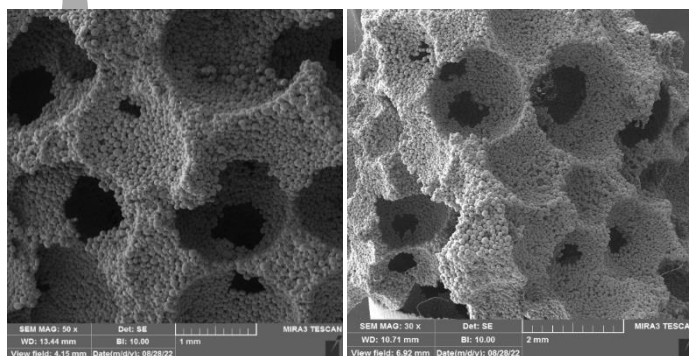
شکل ۱۰: الف) کرنش نرمی برای فوم‌های تولیدی با ۳۰ درصد وزنی اوره و تحت فشارهای اعمالی مختلف و ب) کرنش نرمی برای فوم‌های تولیدی با درصد وزنی اوره متفاوت و تحت فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال.



شکل ۱۱: الف) کرنش سختی برای فوم‌های تولیدی با ۳۰ درصد وزنی اوره و تحت فشارهای اعمالی مختلف و ب) کرنش سختی برای فوم‌های تولیدی با درصد وزنی مختلف اوره و تحت فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال.

۳-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

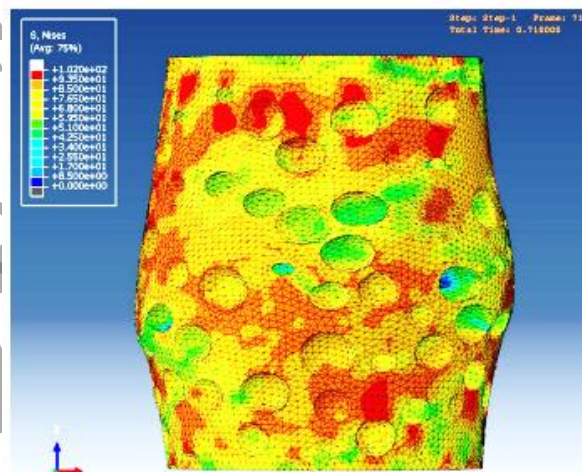
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به دست آمده از سطوح نمونه با مقدار اوره ۳۰ درصد وزنی و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال نشان می‌دهد که اوره به طور کامل حذف شده و سلول‌های کاملاً کروی ایجاد شده است (شکل ۱۲). از تصاویر مشخص است که پراکندگی ذرات اوره به خوبی انجام شده است و سلول‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند. علاوه بر این، ریزتخلخل‌ها در ابعاد میکرونی در مرز ذرات پودر فولاد تفجوشی شده مشاهده می‌شود و این عامل خوبی در جهت بهبود میزان جذب انرژی است.



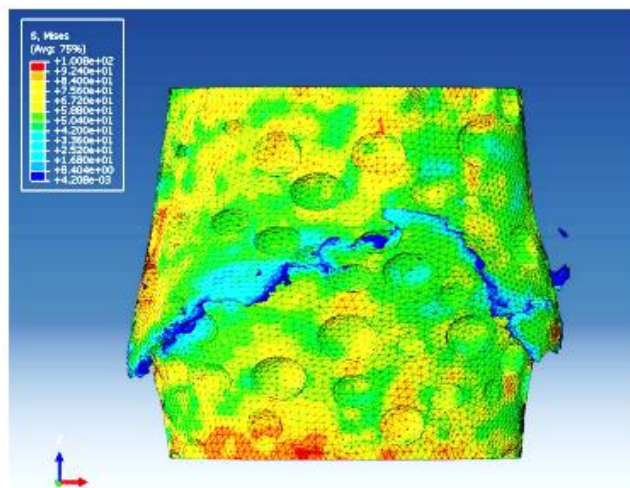
شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح فوم با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال.

۳-۳- شبیه‌سازی عددی

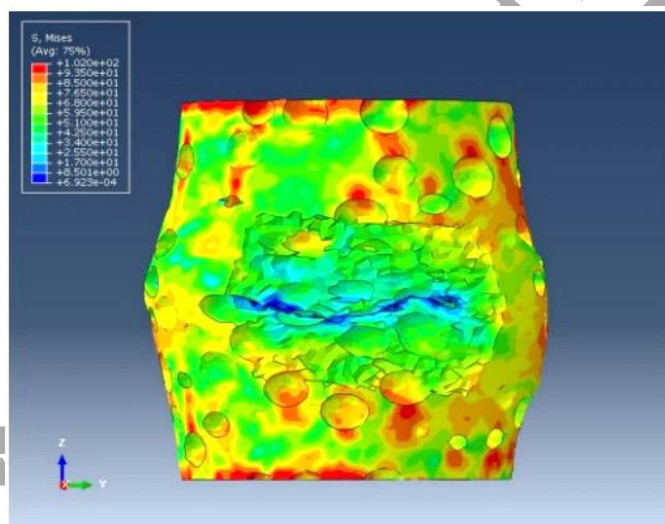
شبیه‌سازی رفتار مکانیکی شیوه‌ای نسبتاً جدید به منظور ارزیابی فوم‌های فولادی است. این قبلا گزارش شده است که اندازه مش و پارامترهای موجود در معادلات بر روی منحنی‌های تنش- کرنش فشاری شبیه‌سازی شده موثر هستند [۳۲]. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نحوه تغییر شکل و توزیع تنش حاصل از شبیه‌سازی را، به ترتیب، لحظاتی قبل از شکست و هنگام شکست نمونه نمایش می‌دهند. با مقایسه نتایج به دست آمده از بارگذاری فشاری نمونه آزمایشگاهی (شکل (۵)) و مدل شبیه‌سازی شده می‌توان گفت مکانیزم تخریب هر دو نمونه تجربی و مجازی تقریباً شبیه یکدیگر رخ می‌دهد. در شکل (۱۵)، برشی از نواحی میانی مدل در لحظه شروع شکست نمایش داده شده است. مطابق انتظار شکست از محل حفرات آغاز و با سرعت توسعه می‌یابد. ترک ایجاد شده در لحظه شکست در حفرات میانی و ضعیف‌تر آغاز می‌شود و همزمان با رشد به سطح خارجی مدل منتقل می‌گردد. همچنین فشردگی حفرات میانی نیز در اینجا قابل مشاهده است. شکل (۱۶)، منحنی تنش- کرنش حاصل از شبیه‌سازی آزمون فشار را نمایش می‌دهد. برای رسم منحنی مذکور، در هر لحظه، تغییر طول کل نمونه بر طول اولیه و نیروی واکنش تکیه گاهی در امتداد نمونه بر مساحت سطح مؤثر مقطع نمونه تقسیم شده است، تا به ترتیب مقادیر لحظه‌ای کرنش عمودی مهندسی و تنش متناظر آن استخراج شود. منحنی تنش- کرنش استخراج شده از نرم افزار نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی بین نتایج تجربی (شکل (۴)) و نتایج شبیه‌سازی وجود دارد. تفاوت اصلی مربوط به افت شدید تنش پس از نقطه تسلیم در منحنی حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با منحنی تجربی است که دلیل آن را می‌توان رشد بسیار سریع ترک در کل قطعه و فروریختن آن در شبیه‌سازی دانست. سپس، به علت وجود اصطکاک میان حفرات و برخورد آن‌ها با یکدیگر، مجدد با افزایش تنش روبرو هستیم. اما منحنی به دست آمده از آزمایش تجربی، به دلیل این که شکست حفرات به صورت موضعی اتفاق می‌افتد، بر خلاف شبیه‌سازی با افت تنش کمتری مواجه است. البته باید در نظر داشت که رفتار مکانیکی فوم‌های فولادی در شرایط اعمال تنش‌های کششی و برشی متفاوت با رفتار آن‌ها در شرایط تنش‌های فشاری است و نوع بارگذاری یکنواخت و سیکلی نیز تاثیرگذار خواهد بود [۳۳ و ۳۴].



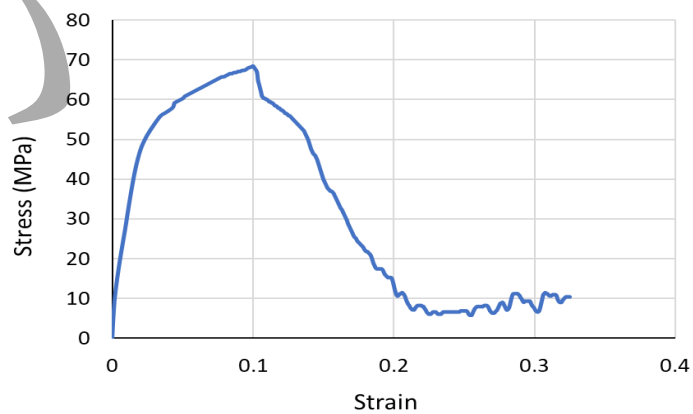
شکل ۱۳: لحظاتی قبل از شکست مدل.



شکل ۱۴: لحظه شکست مدل.



شکل ۱۵: نمایش برشی از مدل و ترک ایجاد شده در لحظه شکست.



شکل ۱۶: نمودار تنش-کرنش در مدل شبیه سازی شده.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تولید فوم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به صورت موفقیت‌آمیز صورت گرفت و اثر عوامل تولید (درصد وزنی اوره و فشار اعمالی) بر ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های تولیدی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج اصلی در زیر فهرست شده‌اند.

۱. فشار اعمالی و درصد وزنی اوره بهینه برای تولید فوم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L به ترتیب ۲۵۰ مگاپاسکال و ۳۰ درصد است و برای این حالت بیشترین استحکام تسلیم و استحکام نهایی به ترتیب حدود ۱۵۲ و ۱۵۸ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.
۲. دما و زمان مناسب برای تف‌جوشی فوم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L، ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت است.
۳. درصد وزنی اوره و فشار اعمالی در مرحله فشردن جزء عوامل موثر در رفتار مکانیکی فوم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L است و با کاهش تخلخل (کاهش درصد وزنی اوره) و افزایش فشار اعمالی، استحکام بهبود می‌یابد.
۴. بیشترین ضریب کشسانی برابر با ۶۸۱ مگا پاسکال مربوط به فوم با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال است. به طور کلی، روند افزایش ضریب کشسانی با کاهش درصد وزنی اوره و افزایش فشار اعمالی رابطه معکوس دارد.
۵. به طور کلی، درصد وزنی اوره (که وابسته به مقدار اوره است) و طول منطقه پلاتیو رابطه مستقیمی با یکدیگر دارند و در این پژوهش، روند کاهش وجود دارد و طول منطقه پلاتیو بستگی زیادی به فشار اعمالی در طی فرآیند تولید ندارد.
۶. رفتار کرنش نرمی و کرنش سختی به فشار اعمالی در طی فرآیند تولید زیاد وابسته نیست. این در حالی است که در محدوده درصد‌های وزنی اوره مورد مطالعه، با کاهش درصد وزنی اوره و میزان تخلخل فوم، تمایل به کرنش نرمی و کرنش سختی کاهش می‌یابد. کمترین کرنش سختی و کمترین کرنش نرمی مربوط به نمونه با ۴۰ درصد وزنی اوره است.
۷. برای اولین بار آزمایش فشار فوم فولادی، با مدل‌سازی صریح حفرات، به کمک روش المان محدود با موفقیت شبیه‌سازی و منحنی تنش-کرنش استخراج شد.

مراجع

1. A.C. Kaya, P. Zaslansky, M. Ipekoglu, C. Fleck, "Strain hardening reduces energy absorption efficiency of austenitic stainless steel foams while porosity does not", *Mater. Des.* 143, 297–308, (2018).
2. I. Mutlu, E. Oktay, "Influence of fluoride content of artificial saliva on metal release from 17-4 PH stainless steel foam for dental implant applications", *J. Mater. Sci. Technol.* 29, 582–588, (2013).
3. C. Mapelli, D. Mombelli, A. Gruttadauria, S. Barella, E.M. Castrodeza, "Performance of stainless steel foams produced by infiltration casting techniques", *J. Mater. Process. Technol.* 213, 1846–1854, (2013).
4. X. Jian, C. Hao, Q. Guibao, Y. Yang, L. Xuwei, "Investigation on relationship between porosity and spacer content of titanium foams", *Mater. Des.* 88, 132–137, (2015).
5. S-f Fan, T. Zhang, K. Yu, H-j Fang, H-q Xiong, Y-l Dai, et al., "Compressive properties and energy absorption characteristics of open-cell nickel foams", *Trans. Nonferrous Metals Soc. China* 27, 117–124, (2017).
6. N. Kurgan, "Effects of sintering atmosphere on microstructure and mechanical property of sintered powder metallurgy 316L stainless steel", *Mater. Des.* 52, 995–998 1980-2015, (2013).
7. X.-Y. Zhou, J. Li, B. Long, D.-W. Huo, "The oxidation resistance performance of stainless steel foam with 3D open-celled network structure at high temperature", *Mater. Sci. Eng.* 435–436, 40–45, (2006).

8. H. Wang, X.Y. Zhou, B. Long, "Fabrication of stainless steel foams using polymeric sponge impregnation technology", *Adv. Mater. Res.* 1035, 219–224, (2014).
9. N.I. Mad Rosip, S. Ahmad, K.R. Jamaludin, F. Mat Noor, "Morphological analysis of SS316L foam produced by using slurry method", *Adv. Mater. Res.* 1087, 68–72, (2015).
10. C. Yan, L. Hao, A. Hussein, P. Young, D. Raymont, "Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting", *Mater. Des.* 55, 533–541, (2014).
11. K. Essa, P. Jamshidi, J. Zou, M.M. Attallah, H. Hassanin, "Porosity control in 316L stainless steel using cold and hot isostatic pressing", *Mater. Des.* 138, 21–29, (2018).
12. D.P. Mondal, H. Jain, S. Das, A.K. Jha, "Stainless steel foams made through powder metallurgy route using NH_4HCO_3 as space holder", *Mater. Des.* 88, 430–437, (2015).
13. A. Mansourighasri, N. Muhamad, A.B. Sulong, "Processing titanium foams using tapioca starch as a space holder, *J. Mater. Process.*", *Technol.* 212, 83–89, (2012).
14. J. Jakubowicz, G. Adamek, K. Pałka, D. Andrzejewski, "Micro-CT analysis and mechanical properties of Ti spherical and polyhedral void composites made with saccharose as a space holder material", *Mater. Char.* 100, 13–20, (2015).
15. T. Aydoğmuş, E.T. Bor, Ş. Bor, "Phase transformation behavior of porous TiNi alloys produced by powder metallurgy using magnesium as a space holder", *Metall. Mater. Trans.* 42, 2547–2555, (2011).
16. S.F. Aida, M.N. Hijrah, A.H. Amirah, H. Zuhailawati, A.S. Anasyida, "Effect of NaCl as a space holder in producing open cell A356 aluminum foam by gravity die casting process", *Procedia Chemistry* 19, 234–240, (2016).
17. H. Bafti, A. Habibolahzadeh, "Compressive properties of aluminum foam produced by powder-Carbamide spacer route", *Mater. Des.* 52, 404–411 1980-2015, (2013).
18. F. Mat Noor, M.I.M. Zain, K.R. Jamaludin, R. Hussin, Z. Kamdi, A. Ismail, et al., "Potassium bromide as space holder for titanium foam preparation", *Appl. Mech. Mater.* 465–466, 922–926, (2014).
19. M.F. Mahammad Rafter, S. Ahmad, R. Ibrahim, "The effect of different composition of stainless steel (SS316L) foam via space holder method", *Adv. Mater. Res.* 1133, 310–313, (2016).
20. Z. Abdullah, S. Ahmad, M. Ramli, "The impact of composition and sintering temperature for stainless steel foams (SS316L) fabricated by space holder method with urea as space holder", *Mater. Sci. Forum* 888, 413–417, (2017).
21. N. Bekoz, E. Oktay, "Effects of carbamide shape and content on processing and properties of steel foams", *J. Mater. Process. Technol.* 212, 2109–2116, (2012).
22. M. Mirzaei, M.H. Paydar, "A novel process for manufacturing porous 316L stainless steel with uniform pore distribution", *Mater. Des.* 121, 442–449, (2017).
23. H.O. Gulsoy, R.M. German, "Sintered foams from precipitation hardened stainless steel powder", *Powder Metall.* 51, 350–353, (2008).
24. I. Mutlu, E. Oktay, "Characterization of 17-4 PH stainless steel foam for biomedical applications in simulated body fluid and artificial saliva environments", *Mater. Sci. Eng. C* 33, 1125–1131, (2013).
25. H. Sazegaran, M. Fazeli, M. Ganjeh, H. Nasiri, "Effect of Molybdenum Addition on Microstructural and Mechanical Characterization of Highly Porous Steels", *Met. Mater. Int.* 27, 5228-5238 (2020).

26. H. Sazegaran, S. M. Moosavi Nejad, "Cell Morphology, Porosity, Microstructure, and Mechanical Properties of Porous Fe-C-P Alloys", *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 28, 257-265 (2021).
27. O. Smorygo, A. Marukovich, V. Mikutski, A.A. Gokhale, G.J. Reddy, J.V. Kumar, "High-porosity titanium foams by powder coated space holder compaction method", *Mater. Lett.* 83, 17–19, (2012).
28. G.K.G. Shailendra Joshi, Mohit Sharma, Telang Amit, Taru Mahra, "Synthesis & characterization of stainless steel foam via powder metallurgy taking acicular urea as space holder", *Material Science Research India* 12, 43–49, (2015).
29. H. Sazegaran, M. Hojati, "Effects of Copper Content on Microstructure and Mechanical Properties of Open Cell Steel Foams", *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 26, 588-594 (2019).
30. H. Sazegaran, A. Feizi, M. Hijati, "Effect of Cr Contents on the Porosity Percentage, Microstructure, and Mechanical Properties of Steel Foams Manufactured by Powder Metallurgy", *Trans. Indian Inst. Met.* 72, 2819-2826 (2019).
31. H. Sazegaran, "Investigation on Production Parameters of Steel Foam Manufactured Through Powder Metallurgical Space Holder Technique", *Met. Mater. Int.* 27, 3371-3384, <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00659-z>, (2021).
32. Hamid Sagsagaran, Ali Mohammad Naserian Nik, Mohammad Reza Akbari, Ali Akbari Nejad Voor, "Evaluation of compressive behavior of steel foams produced by powder metallurgy method", *Journal of Metallurgical and Materials Engineering*, Volume 32, Number 1, 45-56 (2019). In Persian
33. T. Kalpakoglou, S. Yiatros, "Metal foams: A review for mechanical properties under tensile and shear stress", *Front. Mater.* 9, 1-18 (2022).
34. M. Su, Q. Zhou, H. Wang, "Mechanical properties and constitutive models of foamed steels under monotonic and cyclic loading", *Const. Buil. Mater.* 231, 116959 (2020).

واژه نامه

Stainless steel foam	فوم فولاد زنگ‌نزن
Porosity	تخلخل
Space holder	فضا ساز
Urea particles	ذرات اوره
Preheat oven	کوره پیش گرم
Explicit solve	حل گر صریح
Mass scale	مقیاس جرم
Plateau	ناحیه پلاتیو
Strain softening	کرنش نرمی

نسخه پنجم انتشارات