

# تولید گوی‌های توخالی فولادی توسط پودرهای آهن تجاری و بررسی رفتار مکانیکی و ریزساختاری آنها

حمید سازگاران<sup>۱\*</sup>، علیرضا کیانی رشید<sup>۲</sup>، جلیل وحدتی خاکی<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، (hamid.sazegaran@gmail.com).

۲- استاد گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، (kianirashid@um.ac.ir).

۳- استاد گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، (vahdati@um.ac.ir).

## Manufacturing of steel hollow spheres using commercial iron powders and investigations of their mechanical properties and microstructure

H. Sazegaran<sup>1\*</sup>, A.R. Kiani-Rashid<sup>2</sup>, J. Vahdati-Khaki<sup>3</sup>

1- Assistant Professor of Department of Industrial Engineering, Engineering faculty, Guhan University of Advanced Technology, E-Mail: hamid.sazegaran@gmail.com

2- Professor of Metallurgical and Material Engineering Department, Engineering faculty, Ferdowsi University of Mashhad, E-Mail: kianirashid@um.ac.ir

3- Professor of Metallurgical and Material Engineering Department, Engineering faculty, Ferdowsi University of Mashhad, E-Mail: vahdati@um.ac.ir

### چکیده

در این پژوهش، گوی‌های توخالی فولادی توسط روشی مبتنی بر متالورژی پودر و با استفاده از پودرهای آهن تجاری تولید شدند. بدین منظور، ابتدا پودرهای آهن، مس (۱۰ درصد وزنی) و کربن (۰/۵ درصد وزنی) مخلوط شدند و سپس توسط سیلیکات سدیم (۱۰ درصد وزنی) به عنوان چسب یک سوسپانسیون همگن ایجاد کردند. سپس، سوسپانسیون تهیه شده بر روی دانه‌های پلی‌استیرین توسط دستگاه پوشش‌دهی پاشیده شد. پس از خشک شدن گوی‌ها، دو عملیات حرارتی متفاوت بر روی آنها انجام گردید که شامل حرارت‌دهی به منظور ذوب و تجزیه حرارتی پلی‌استیرین و تفجوشی به منظور تولید پوسته مستحکم می‌باشند. برای بررسی ریزساختار گوی‌های توخالی فولادی از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و برای ارزیابی رفتار مکانیکی آنها از آزمون فشار استفاده شد. نتایج حاکی از آن است که دیواره گوی‌های تولیدی از چهار ناحیه متفاوت تشکیل شده است که شامل ناحیه پودرهای آهن تفجوشی شده، ناحیه پودرهای مس توسعه یافته در بین پودرهای آهن، ناحیه سیلیکات سدیم باقیمانده و ناحیه تخلخل‌ها می‌باشد. نتایج به دست آمده از آزمون فشار بیانگر آن است که منحنی‌های نیرو-جابجایی در گوی‌ها با قطرهای متفاوت تفاوت چندانی ندارد. شکست گوی‌ها در اعمال نیروهای فشاری بر اثر وجود ریزترک‌ها در دیواره گوی‌ها و رشد آنها صورت می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: گوی‌های توخالی فولادی، متالورژی پودر، تفجوشی، میکروسکوپ الکترونی روبشی، رفتار فشاری.

### Abstract

In this study, steel hollow spheres were manufactured using commercial iron powders by powder metallurgy technique. For manufacturing the hollow spheres, iron powders, copper powders (10 wt. %) and carbon powders (0.5 wt. %) were firstly mixed and then were added to the sodium silicate (10 wt. %) as binder to produce a homogenous suspension. Then, prepared suspension was coated on the polystyrene spheres. After drying the green spheres, two different heat treatment processes were carried out on the spheres including the melting and thermal de-binding and the sintering processes. The microscopic evaluations were performed by optical microscope and scanning electron microscope and mechanical properties of steel hollow spheres were investigated by the compression test. The results shown that sphere walls composed of four different regions including: the sintered iron powders region, the dispersed copper powders region, remained sodium silicate region and porosities region. In addition, the force-displacement curves of compressed spheres were revealed no significant differences in spheres with different sphere sizes. The fractures of spheres in compression forces were occurred based on the presence of the micro-cracks in the sphere walls and growth of them.

**Keywords:** Steel hollow spheres, Powder metallurgy, Sintering, Scanning electron microscopy, Compression behavior.

## مقدمه

فوم‌های فلزی و فلزات سلولی دسته‌ای جدید از مواد پیشرفته هستند که خواص جالب توجهی همانند چگالی پایین، استحکام و سفتی ویژه بالا، قابلیت جذب انرژی زیاد، خواص صوتی و حرارتی منحصر به فرد دارند. بنابراین، این مواد می‌توانند در بسیاری از کاربردهای ساختاری و غیرساختاری به صورت موفقیت‌آمیز به کار برده شوند [۱-۳]. یکی از مهم‌ترین چالش‌های مرتبط با این مواد به عدم یکنواختی در مورفولوژی سلول‌ها ارتباط دارد. به بیان دیگر، وجود تفاوت در میزان، اندازه و نحوه توزیع سلول‌ها و همچنین تفاوت در ضخامت دیواره سلول‌ها موجب ناهمسان‌گردی خواص فوم‌های فلزی می‌گردد. استفاده از گوی‌های توخالی فلزی به جای سلول‌های غیریکنواخت می‌تواند این مشکل را مرتفع سازد. ساختارهای متشکل از گوی‌های توخالی فلزی دسته‌ای جدید از مواد سلولی هستند که دارای سلول‌هایی یکنواخت و در نتیجه، خواص همسان‌گرد می‌باشند [۴-۵]. در این ساختارها، گوی‌های توخالی فلزی می‌توانند به روش متالورژی پودر [۶] یا به روش ریخته‌گری [۷] به یکدیگر متصل شوند. بنابراین، ابداع و توسعه روش‌های تولید گوی‌های توخالی اهمیت می‌یابد.

روش‌های متنوعی به منظور تولید گوی‌های توخالی فلزی ابداع شده است که اغلب آن‌ها مبتنی بر متالورژی پودر می‌باشند [۱۰-۸]. در روشی که توسط موسسه فرانهورفر آلمان ابداع شده است [۱۱-۱۵]، دانه‌های پلیمری به ویژه دانه‌های پلی‌استیرن توسط یک دوغاب همگن از پودرهای فلزی و یک چسب پوشش‌دهی می‌شوند. سپس، گوی‌های تولیدی در معرض عملیات‌های حرارتی تجزیه حرارتی مواد پلیمری و تفجوشی قرار می‌گیرند. در نهایت، گوی‌های تولیدی می‌توانند برای تولید ساختارهای متشکل از گوی‌های توخالی به کار برده شوند. فلزات و آلیاژهای گوناگونی برای تولید گوی‌های توخالی فلزی به کار برده شده‌اند که نمونه‌هایی از آن‌ها شامل فولادهای کم کربن [۱۶ و ۱۷]، برنج [۱۸] و نیکل [۱۹] می‌باشند.

پژوهش‌های فراوانی بر روی روش پوشش‌دهی دانه‌های پلیمری توسط دوغاب پودرهای فلزی و چسب متمرکز شدند [۲۰-۲۵].

[۲۰]، اما باید توجه داشت که علاوه بر عوامل موثر بر فرآیند پوشش‌دهی، نوع چسب و مشخصات پودرهای فلزی مورد استفاده نیز در تولید گوی‌های توخالی حائز اهمیت می‌باشد. پژوهش‌های فراوانی در مورد سیستم‌های چسب که در آب انحلال‌پذیر هستند، صورت گرفته است که شامل استفاده از پلی‌وینیل‌الکل (PVA) [۲۶ و ۲۷]، نشاسته [۲۸]، اکریلیک استیرن [۲۷]، فسفات مایع [۲۷]، لاتکس [۲۹]، کربواگری متول سلولز (CMC) و پلی‌اتیلن گلیکل (PEG) [۳۰ و ۳۱] می‌باشد.

همان‌طور که بیان شد، پژوهش‌های فراوانی بر روی نحوه انجام فرآیند پوشش‌دهی، سیستم چسب و پودرهای فلزی گوناگون صورت گرفته است، اما پژوهش‌های انجام شده در زمینه تولید گوی‌های توخالی فولادی بسیار محدود هستند و اغلب بر اساس استفاده از پودرهای آهن آزمایشگاهی با اندازه ذرات بسیار کوچک متمرکز شده‌اند [۱۴ و ۱۵]. بنابراین، بررسی تولید گوی‌های توخالی فولادی توسط پودرهای آهن تجاری به منظور کاهش هزینه‌های تولید اهمیت می‌یابد. در این پژوهش، تولید گوی‌های توخالی فولادی با استفاده از پودرهای آهن تجاری مورد مطالعه قرار گرفته است و ریزساختار پوسته گوی‌های توخالی بررسی شده است. علاوه بر این، رفتار مکانیکی گوی‌های توخالی تولیدی توسط انجام آزمون فشار ارزیابی شده است.

## مواد و روش تحقیق

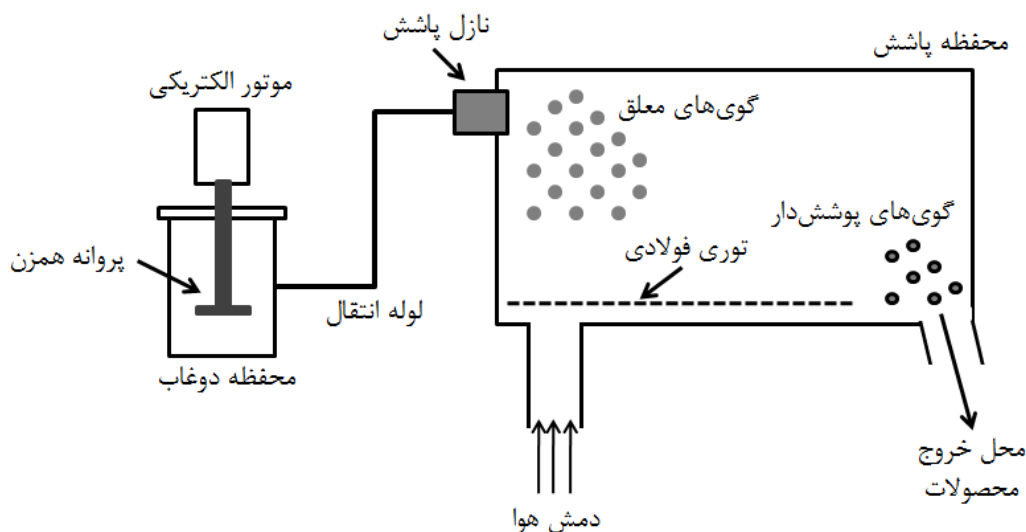
در این پژوهش، دانه‌های پلی‌استیرن انبساط‌یافته به عنوان ماده زیرلایه برای تولید گوی‌های توخالی فولادی به کار برده شدند. دانه‌های پلی‌استیرن انبساط‌یافته از شرکت مرک آلمان تهیه شدند و توسط الک به سه دسته با میانگین قطر تقریباً برابر ۳/۵، ۵/۵ و ۷/۵ mm تقسیم‌بندی شدند. به منظور تولید مخلوط پودری از پودر آهن خالص با اندازه ذرات بین ۴۵ تا ۱۰۰ میکرون، پودر مس خالص با اندازه ذرات بین ۴۵ تا ۱۰۰ میکرون و پودر بسیار ریز کربن استفاده شد. همه پودرهای مورد استفاده از شرکت متالورژی پودر مشهد تهیه شدند. دو نمونه متفاوت از پودرها مخلوط شدند که یکی شامل ۰/۵ درصد وزنی پودر کربن درون پودر آهن و دیگری شامل ۰/۵ درصد وزنی پودر کربن و ۱۰ درصد وزنی پودر مس درون پودر آهن می‌باشد. بنابراین،

تهیه می‌شود و در دیگری، فرآیند پوشش‌دهی انجام می‌گیرد. در ابتدا، مخلوط پودری به همراه سیلیکات سدیم (۱۰ درصد وزنی) به عنوان چسب درون محفظه سوسپانسیون‌سازی قرار گرفتند. در این محفظه، یک پروانه در حال چرخش وجود دارد که با سرعت ۲۰۰ rpm می‌چرخد و یک دوغاب همگن از مخلوط پودری و چسب را فراهم می‌آورد. قابل ذکر است که در طول فرآیند پوشش‌دهی نیز چرخش پروانه به صورت مداوم صورت می‌گیرد تا از ته‌نشین شدن ذرات پودری جلوگیری به عمل آورد. سوسپانسیون تولید شده از طریق یک لوله به محفظه پوشش‌دهی منتقل می‌شود. در محفظه پوشش‌دهی، دانه‌های پلی‌استیرین توسط جریان هوا معلق می‌شوند و به چرخش در می‌آیند. سپس، سوسپانسیون از طریق یک نازل بر روی آن‌ها پاشیده می‌شود. پس از تکمیل فرآیند پوشش‌دهی، دانه‌های پلی‌استیرین از درون محفظه پوشش‌دهی خارج شده و توسط هوای گرم خشک می‌شوند. دستگاه پوشش‌دهی به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. در نتیجه، یک لایه نازک از مخلوط پودری و چسب بر روی دانه‌های پلی‌استیرین قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که این فرآیند بر روی هر سه دسته از دانه‌های پلی‌استیرین با میانگین قطرهای متفاوت و توسط مخلوط‌های پودری بدون مس و حاوی مس صورت گرفت.

مخلوط‌های پودری را می‌توان بدون مس و حاوی مس نامید. برای اختلاط پودرها از یک مخلوطکن مخصوص متالورژی پودر استفاده شد. سرعت چرخش در فرآیند اختلاط برابر ۱۵۰ rpm و مدت زمان اختلاط ۲۰ دقیقه انتخاب شد.

به منظور انجام فرآیند پوشش‌دهی مخلوط‌های پودری بر روی دانه‌های پلی‌استیرین از سیلیکات سدیم به عنوان چسب استفاده شد. در بسیاری از پژوهش‌ها از چسب‌های آلی استفاده شده است [۱۵ و ۱۴]، اما در این پژوهش، سیلیکات سدیم که یک چسب معدنی است به کار برده شد. علت این انتخاب این است که پودرهای آهن مورد استفاده دارای اندازه ذرات بزرگ می‌باشند و در صورتی که از چسب‌های آلی استفاده شود، چسب در عملیات‌های حرارتی تجزیه می‌شود و قبل از فرآیند تفجوشی ذرات پودر از یکدیگر جدا می‌شوند. قابل ذکر است که سیلیکات سدیم در دماهای بالای فرآیند تفجوشی نیز می‌تواند پودرهای آهن را به خوبی در کنار یکدیگر نگه دارد و در نتیجه، اتصال مناسبی در اثر تفجوشی ایجاد شود.

پس از تهیه مخلوط پودری باید مرحله پوشش‌دهی دانه‌های پلی‌استیرین صورت گیرد. پوشش‌دهی درون یک دستگاه مخصوص صورت می‌گیرد. این دستگاه دارای دو محفظه مجزا است که درون یکی، سوسپانسیون مخلوط‌های پودری و چسب



شکل ۱- تصویر شماتیک دستگاه پوشش‌دهی دانه‌های پلی‌استیرین توسط دوغاب همگن مخلوط پودری و چسب.

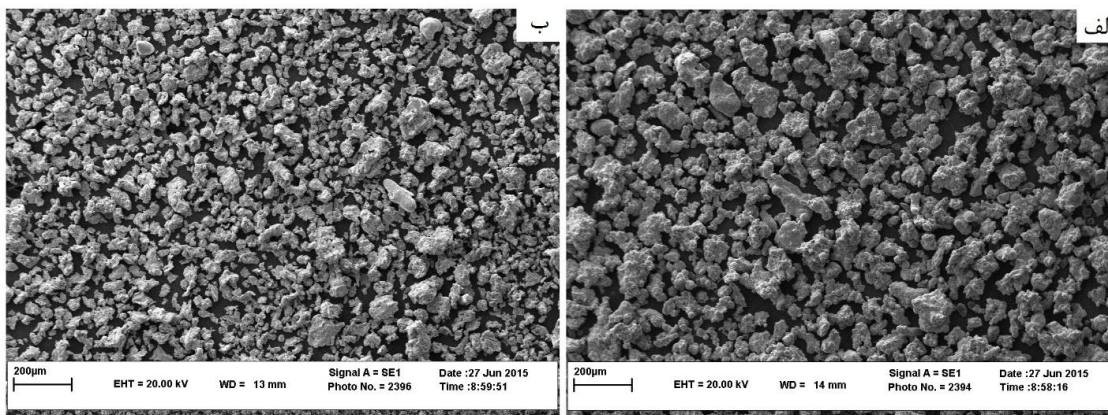
سپس، عملیات‌های حرارتی بر روی دانه‌های پلی‌استیرن پوشش‌یافته باید صورت گیرد. در این مرحله، دو عملیات حرارتی متفاوت انجام می‌شود که شامل تجزیه حرارتی و تفجوشی می‌باشد. عملیات حرارتی تجزیه حرارتی در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۱ ساعت درون یک آون الکتریکی صورت گرفت. در این فرآیند، بخش‌هایی از ماده پلی‌استیرن سازنده دانه‌های پوشش‌یافته به صورت حرارتی تجزیه و سایر بخش‌ها ذوب می‌شوند. بدیهی است که بخش‌هایی که به صورت حرارتی تجزیه می‌شوند، گازهایی تولید کرده که از فضای خالی میان پودرها خارج می‌شوند. این در حالی است که بخش‌هایی که ذوب شده‌اند، در لابه لای پودرها قرار می‌گیرند. سپس، برای این که اتصال ذرات پودر به یکدیگر صورت گیرد و گوی‌های توخالی مستحکم تولید شوند، فرآیند تفجوشی انجام می‌گیرد. عملیات تفجوشی در یک کوره صنعتی تونلی که به صورت پیوسته کار می‌کند، در دمای  $1120^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱ ساعت صورت گرفت. کوره مورد استفاده دارای اتمسفر کنترل شده می‌باشد و اتمسفر استفاده شده، آمونیاک شکسته است. برای جلوگیری از اتصال گوی‌های توخالی به یکدیگر، گوی‌ها درون یک محفظه حاوی ذرات پودر آلومینا قرار گرفتند. قابل ذکر است که در هنگام انجام فرآیند تفجوشی، پودرهای آلومینا هیچ‌گونه واکنش شیمیایی یا فیزیکی با محصولات تولیدی ندارند. باید توجه داشت که بخش‌هایی از دانه‌های پلی‌استیرن که ذوب شده‌اند و در میان پودرها قرار گرفته‌اند در مرحله تفجوشی به صورت حرارتی تجزیه می‌شوند. گوی‌های تولید شده به منظور انجام ارزیابی‌های میکروسکوپی مانع سرد و به صورت مقطعی بریده شدند. پس از برش، فرآیندهای سمباده‌زنی و پولیش بر روی نمونه‌های تولید شده انجام شد و تصاویر متالوگرافی بدون انجام فرآیند اچ توسط میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی‌های گوناگون تهیه گردید. نرم‌افزار پردازش تصویر MIP به منظور تحلیل تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ نوری به کار گرفته شد. توسط نرم‌افزار پردازش تصویر، ضخامت و کسر سطحی تخلخل‌ها در قسمت دیواره گوی‌های تولیدی ارزیابی شد. تصاویر به دست آمده در

بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر و تصاویر به دست آمده در بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر به ترتیب برای تعیین ضخامت دیواره و درصد تخلخل به کار گرفته شدند. قابل ذکر است که برای تعیین ضخامت دیواره و تعیین کسر سطحی تخلخل‌ها ۱۵ اندازه‌گیری بر روی تصاویر متفاوت از دیواره گوی‌های تهیه شده انجام شد و نتایج براساس میانگین اعداد به دست آمده ارائه می‌گردد.

علاوه بر این، از میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز برای بررسی ریزساختار استفاده شد. قبل از انجام مطالعات میکروسکوپ الکترونی، پوشش طلا و پالادیوم بر روی نمونه‌ها توسط دستگاه پوشش‌دهی Sputter Coater SC7620 ایجاد شد. در این پژوهش، از میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO 1450VP استفاده شد. علاوه بر بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی، اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی (EDS) به صورت نقطه‌ای به منظور شناسایی فازهای گوناگون به کار گرفته شد. به منظور ارزیابی رفتار مکانیکی گوی‌های توخالی فولادی، آزمون فشار توسط دستگاه Zwick مدل Z250 انجام شد. قابل ذکر است که دو نمونه از گوی‌های حاوی مس با قطرهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و سرعت حرکت فک‌ها در این آزمون برابر  $0.2\text{ mm/min}$  در نظر گرفته شد.

### نتایج و بحث

در شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودرهای آهن و پودرهای مس مورد استفاده به منظور تولید گوی‌های توخالی فولادی نمایش داده شده است. مطابق با شکل، پودرهای آهن و پودرهای مس مورد استفاده برای تولید گوی‌های توخالی فولادی دارای اشکال نامنظم هستند. علاوه بر این، توزیع اندازه ذرات در پودرهای مس نسبت به پودرهای آهن دارای مقادیر بیشتری از پودرها با ابعاد کوچک‌تر می‌باشد. این امر می‌تواند موجب شود که ذرات پودرهای مس بیشتر در میان ذرات پودرهای آهن پراکنده شوند و بهبود فرآیند تفجوشی نتیجه می‌شود.

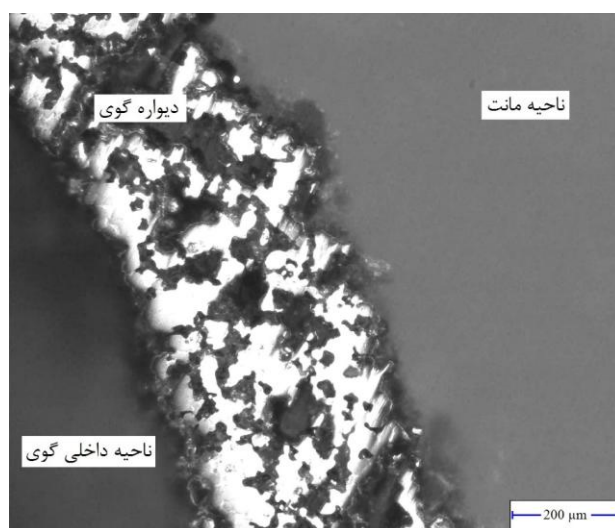


شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودرهای مورد استفاده برای تولید گوی‌های توخالی فولادی؛ الف: پودر آهن و ب: پودر مس.

گرفته است. علت مستحکم بودن گوی‌های حاوی مس را می‌توان به فرآیند تفجوشی و حضور مس در لابه لای پودرهای آهن در شرایط تفجوشی ارتباط داد.

در شکل ۳، تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۵۰ برابر از گوی تولید شده توسط مخلوط پودری حاوی مس با قطر ۶ mm ارائه شده است. مطابق با شکل، سه ناحیه متفاوت مشاهده می‌شود که شامل ناحیه دیواره گوی، ناحیه مانت و ناحیه داخلی گوی می‌باشد. در ناحیه دیواره گوی دیده می‌شود که مخلوط پودری توسط فرآیند تفجوشی یک پوسته مستحکم را تشکیل داده است. در این ناحیه، بخش‌های سیاه‌رنگ می‌توانند به حفرات و تخلخل‌های ایجاد شده در میان پودرهای تفجوشی شده ارتباط پیدا کنند.

ایجاد معایب در گوی‌های توخالی همانند تشکیل ترک‌ها و حفرات در دیواره‌ها و همچنین ایجاد چروکیدگی در گوی‌ها اهمیت بسزایی دارد [۱۴ و ۱۵]. بازرسی‌های چشمی انجام شده از گوی‌ها نشان می‌دهد که تفجوشی در دیواره گوی‌های تولیدی با مخلوط پودری بدون مس اتفاق نیافتاده است. به عبارت دیگر، این گوی‌ها دارای استحکام بسیار کمی می‌باشند و اغلب آن‌ها به صورت معیوب تولید شده‌اند. بنابراین، انجام ارزیابی‌های میکروسکوپی و مطالعات خواص مکانیکی بر روی این نمونه‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. این در حالی است که گوی‌های تولید شده توسط مخلوط پودرهای حاوی مس دارای استحکام مناسب می‌باشند و مطالعات میکروسکوپی و خواص مکانیکی بر روی آن‌ها صورت



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۵۰ برابر از دیواره گوی توخالی فولادی با قطر ۶ mm.

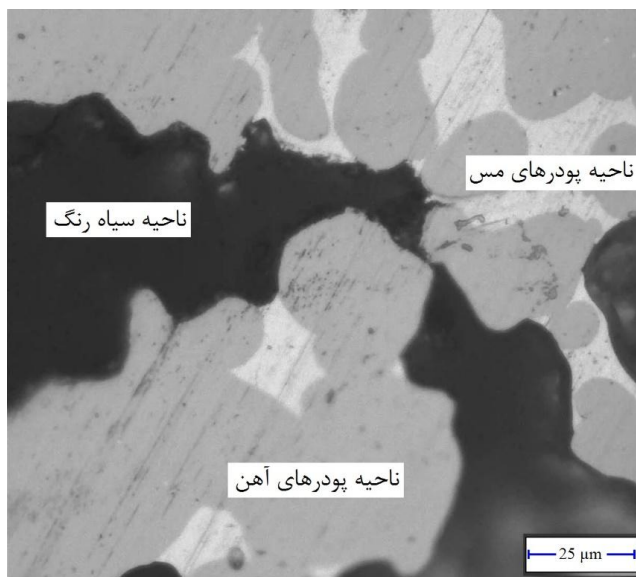
این که فرآیند پوشش‌دهی در مورد همه نمونه‌های تولیدی یکسان می‌باشد، نتایج به دست آمده از نرم‌افزار پردازش تصویر برای میانگین ضخامت دیواره و کسر سطحی نواحی سیاه‌رنگ تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد. در شکل ۵، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از دیواره گوی توخالی با قطر ۶ mm به همراه آنالیزهای EDS از نواحی متفاوت نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، نواحی سیاه‌رنگ در تصاویر میکروسکوپ نوری خود از دو ناحیه تشکیل شده‌اند که شامل ناحیه تخلخل‌ها و ناحیه سیلیکات سدیم باقیمانده (Spectrum 3) می‌باشد. علاوه بر این نواحی، نواحی مربوط به پودرهای آهن و پودرهای مس تفجوشی شده نیز مشاهده می‌شود. آنالیزهای EDS نشان می‌دهد که در ناحیه پودرهای آهن (Spectrum 1) عناصر کربن و اکسیژن به همراه آهن وجود دارند. کربن (۰/۵ درصد وزنی) درون مخلوط پودری وجود دارد و در شرایط تفجوشی به درون ذرات پودرهای آهن نفوذ می‌کند. این در حالی است که حضور اکسیژن احتمالاً به نفوذ از چسب سیلیکات سدیم ارتباط پیدا می‌کند. مطابق با تصاویر میکروسکوپ نوری، ناحیه مس (Spectrum 2) در میان ناحیه پودرهای آهن قرار گرفته است که به ذوب شدن ذرات پودرهای مس در دمای تفجوشی ارتباط داده می‌شود.

جدول ۱. میانگین ضخامت دیواره و کسر سطحی نواحی سیاه‌رنگ در

نمونه‌های تولیدی

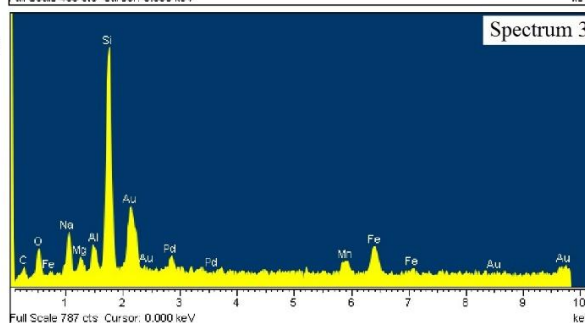
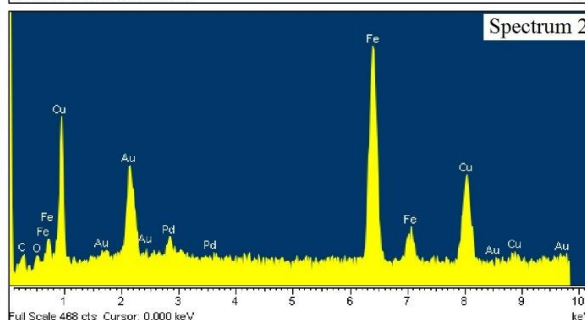
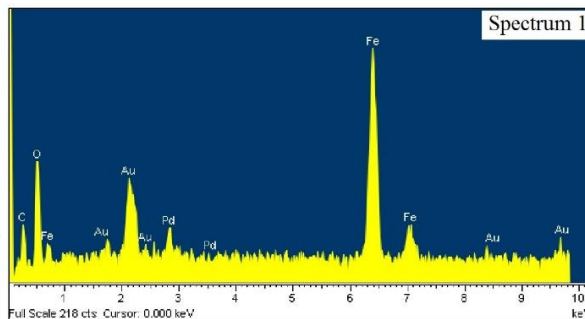
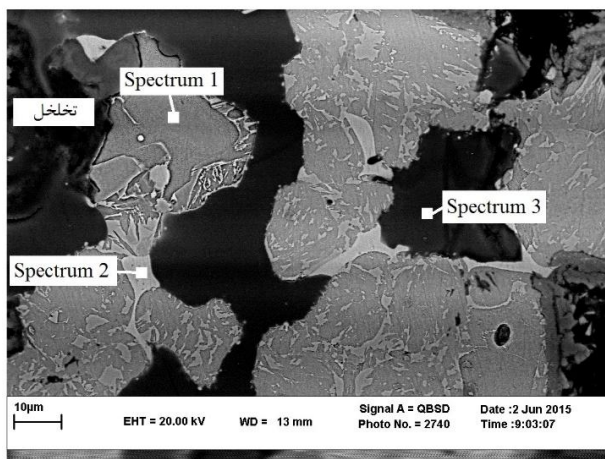
نمونه	میانگین ضخامت پوسته (میکرون)	کسر سطحی نواحی سیاه‌رنگ
گوی با قطر ۴ mm	۲۸۳	۵۲
گوی با قطر ۶ mm	۲۷۴	۴۹
گوی با قطر ۸ mm	۲۶۸	۵۱

در شکل ۴ تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر از دیواره گوی تولید شده توسط مخلوط پودری حاوی مس با قطر ۶ mm به تصویر کشیده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، سه ناحیه متفاوت وجود دارد که شامل ناحیه سیاه‌رنگ، ناحیه پودرهای آهن تفجوشی شده و ناحیه پودرهای مس تفجوشی شده می‌باشد. ناحیه پودرهای مس دقیقاً در میان ناحیه پودرهای آهن قرار گرفته است. با توجه به این که دمای ذوب مس پایین‌تر از دمای فرآیند تفجوشی می‌باشد، ذرات پودرهای مس در شرایط تفجوشی ذوب می‌شوند و بنابراین، تفجوشی حالت مایع نیز رخ می‌دهد. در چنین شرایطی، مذاب مس بر اساس نیروهای کشش سطحی در میان ذرات پودرهای آهن گسترش می‌یابد و در نتیجه، اتصال بهتری در میان ذرات پودرهای آهن ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، علاوه بر تفجوشی پودرهای آهن در دمای تفجوشی، تشکیل مذاب مس نیز موجب بهبود اتصال در بین ذرات پودرهای آهن می‌گردد.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر از گوی توخالی با قطر ۶ mm.

در جدول ۱، نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری میانگین ضخامت دیواره و کسر سطحی نواحی سیاه‌رنگ ارائه شده است. به علت

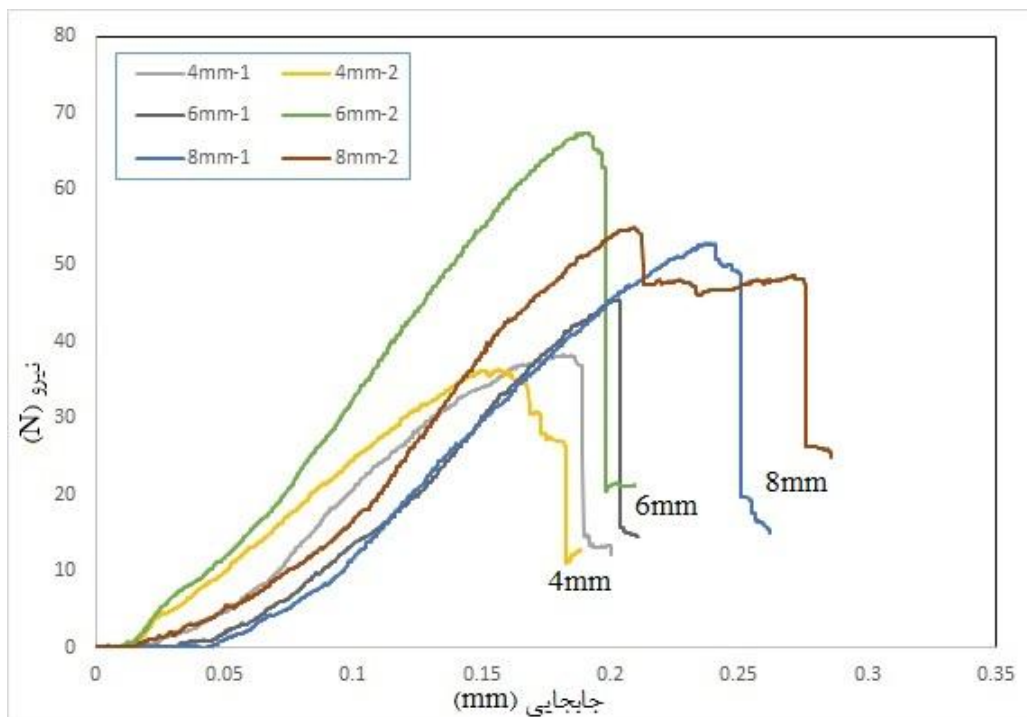


شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از دیواره گوی توخالی با قطر ۶ mm به همراه نتایج آنالیزهای EDS از نواحی مختلف آن.

توخالی فولادی با قطرهای مختلف نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های نیرو-جابجایی فشاری بیانگر رفتار تقریباً یکسانی در همه نمونه‌ها می‌باشند. بیشترین نیروی تحمل شده توسط گوی‌های توخالی تولید شده در جدول ۲ گزارش شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مقادیر بیشترین نیروهای تحمل شده توسط گوی‌های توخالی فولادی بین ۳۶/۵ تا ۶۷/۵ N می‌باشد. قابل ذکر است که در اثر اعمال فشار، ترک‌هایی در امتداد نیروی اعمالی بر روی دیواره‌های گوی‌های توخالی ایجاد می‌شود که در اثر رشد این ترک‌ها شکست رخ می‌دهد. این احتمال وجود دارد که جوانه‌زنی ترک‌ها بر روی عیب‌های دیواره گوی‌های توخالی صورت گرفته است.

بر اساس این که میزان چسب سیلیکات سدیم استفاده شده به منظور تولید گوی‌ها در همه نمونه‌ها یکسان است و سیلیکات سدیم در فرآیند تفجوشی دچار دگرگونی نمی‌شود، بنابراین، کسر سطحی نواحی سیاه‌رنگ را می‌توان به صورت مستقیم به کسر سطحی تخلخل‌ها ارتباط داد. بر این اساس و مطابق با جدول ۱، کسر سطحی تخلخل‌ها در نمونه‌های مورد بررسی که به میزان یک عدد ثابت (مربوط به کسر سطحی سیلیکات سدیم) از کسر سطحی نواحی سیاه‌رنگ کمتر است، تفاوت چندانی ندارند. البته این پدیده به یکسان بودن فرآیند تولید گوی‌های توخالی فولادی ارتباط دارد و اختلاف قطر دانه‌های پلی‌استیرین هیچ‌گونه تاثیری بر روی کسر سطحی تخلخل‌ها ندارد.

در شکل ۶، نتایج به دست آمده از آزمون فشار برای گوی‌های



شکل ۶- منحنی‌های نیرو- جابجایی فشاری برای گوی‌های فولادی با قطرهای مختلف.

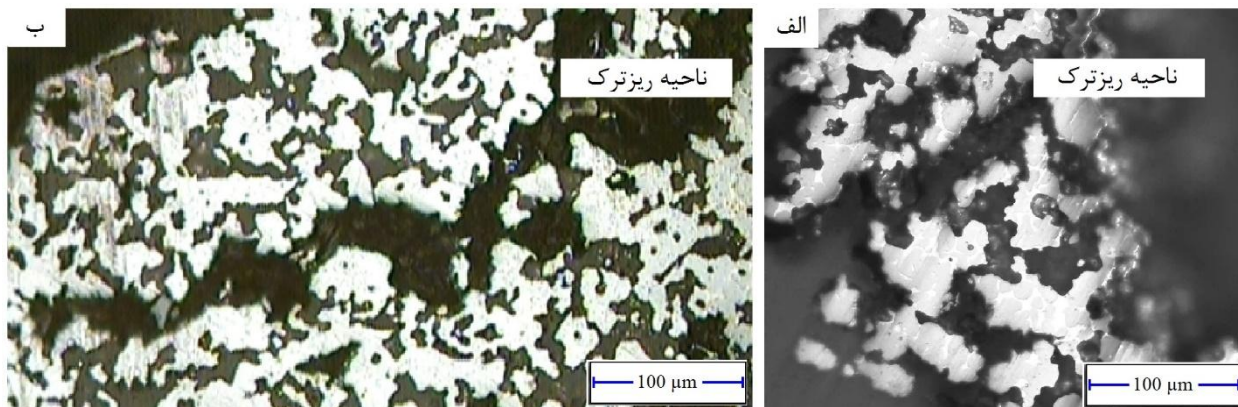
تفجوشی و تشکیل اتصالات مستحکم‌تر در میان پودرهای آهن می‌تواند عدم بروز رفتار فشاری ترد را نتیجه دهد. باقیماندن سیلیکات سدیم در فضای خالی میان پودرهای تفجوشی شده نیز احتمالاً بر روی رفتار فشاری نرم موثر است. در بررسی‌های میکروسکوپی دیواره گوی‌های توخالی مشاهده می‌شود که ریزترکه‌هایی در دیواره وجود دارد. در شکل ۷، نمونه‌ای از این ریزترکه‌ها در تصاویر میکروسکوپ نوری از دیواره گوی توخالی فولادی نشان داده شده است. اغلب ریزترکه‌های مشاهده شده در تصاویر میکروسکوپی در امتداد شعاع گوی‌های توخالی قرار دارند. رشد این ریزترکه‌ها در اثر اعمال نیروی می‌تواند منجر به شکست گوی‌های توخالی گردد. مکانیزم پیشنهادی برای شکست گوی‌های توخالی فولادی تولید شده به این صورت است که ریزترکه‌هایی درون دیواره گوی‌های توخالی در اثر فرآیند تولید ایجاد می‌شوند و در اثر رشد آن‌ها شکست رخ می‌دهد. این احتمال وجود دارد که با تغییر مشخصات پودر همانند کاهش اندازه ذرات و یا تغییر شکل و توزیع دانه‌های پودر بتوان رفتار مکانیکی را بهبود بخشید [۱۵-۱۳].

جدول ۲. بیشترین مقدار نیروی تحمل شده توسط گوی‌های توخالی فولادی.

نمونه	بیشترین مقدار نیرو (N)
4mm-1	۳۸/۳
4mm-2	۳۶/۵
6mm-1	۴۵/۵
6mm-2	۶۷/۵
8mm-1	۵۳
8mm-2	۵۵

این انتظار وجود دارد که به علت این که هیچ‌گونه فشردنی در فرآیند تولید گوی‌های توخالی فولادی استفاده نشده است، اتصالات ضعیفی در فرآیند تفجوشی بین ذرات پودرهای آهن تشکیل شده باشد و گوی‌های تولیدی رفتار کاملاً ترد از خود نشان دهند. این در حالی است که منحنی‌های نیرو- جابجایی بیانگر رفتار نرم می‌باشند. علت این پدیده را می‌توان به مس افزودنی در مخلوط پودری ارتباط داد. ذوب شدن مس در فرآیند





شکل ۷. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزترک‌ها در دیواره گوی توخالی فولادی؛ الف: با قطر ۴ mm و ب: با قطر ۶ mm.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، گوی‌های توخالی فولادی توسط پودرهای آهن تجاری و به روش متالورژی پودر تولید شدند و نتایج زیر حاصل شده است.

۱- گوی‌های تولیدی توسط مخلوط پودری بدون مس افزودنی دارای استحکام بسیار پایین و معایب بسیار زیاد می‌باشند و این در حالی است که تولید گوی‌های توخالی فولادی توسط مخلوط پودری حاوی ۱۰ درصد وزنی مس به صورت موفقیت‌آمیز انجام شد.

۲- میانگین ضخامت دیواره گوی‌های تولیدی در حدود ۲۷۵ میکرون و کسر سطحی تخلخل‌ها و سیلیکات سدیم در حدود ۵۰ درصد اندازه‌گیری شد.

۳- رفتار فشاری و منحنی‌های نیرو-جابجایی گوی‌های تولیدی تقریباً به یکدیگر مشابه می‌باشد.

۴- وجود ریزترک‌ها در امتداد شعاع در دیواره گوی‌ها و رشد آن‌ها منجر به بروز شکست در اثر اعمال فشار می‌گردد.

۵- تغییر در میزان قطر گوی‌ها تاثیر چندانی بر ضخامت دیواره‌ها و کسر سطحی تخلخل‌ها در پوسته و همچنین رفتار مکانیکی گوی‌های تولیدی ندارد.

## منابع و مراجع

- 2007, vol. 28(2), pp. 569-576.
- [3] W. Pannert, R. Winkler, and M. Merkel, Mater.Lett., 2009, vol. 63(13-14), pp. 1121-1129.
- [4] B.P. Neville and A. Rabiei, Mater. Des., 2008, vol. 29(2), pp. 388-795.
- [5] V.C. Srivastava and K.L. Sahoo, Mater. Sci. Pol., 2007, vol. 25(3), pp. 733-740.
- [6] A. Rabiei, and M. Garcia-Avila, Mater. Sci. Eng. A, 2013, vol. 564, pp. 539-547.
- [7] L. J. Vendra, J. A. Brown, and A. Rabiei, J. Mater. Sci., 2011, vol. 46, pp. 4574-4581.
- [8] L. J. Gibson, and M. F. Ashby, Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1997.
- [9] O. Andersen, and G. Stephani, Handbook of cellular metals. Production, Processing, Applications, Edited by Degischer. H. P., Kriszt. B., Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002.
- [10] L. J. Vendra, in Metal Foams, Raleigh, North Carolina, 2008.
- [11] Cellular Metallic Materials, Frounhofer, IFAM.
- [12] M. Jaeckel, and H. Smigilski, European Patent DE 3724156, 1988.
- [13] C. Augustin, and W. Hungerbach, Mater. Lett., 2009, vol. 63, pp. 1109-1112.
- [14] M. Behnam, A. S. Golezani, M. M. Lima, Powd. Met. Prog., 2011, vol. 11, pp. 185-192.
- [15] M. Behnam, A. S. Golezani, M. M. Lima, Powd. Technol., 2013, vol. 235, pp. 1025-1029.
- [16] M. Supicova, R. Orinakova, M. Kupkova, and M. Kabatova, Surf. Coat. Technol., 2005, vol. 195(2), pp. 130-138.
- [17] M. Jaeckel and H. Smigilski, United State Patent, Appl.4917857, 1990.
- [18] J.M. Koo, H. Araki, and S.B. Jung, Mater. Sci. Eng. A, 2008, vol. 483-484, pp. 254-264.
- [19] Y.D. Deng, L. Zhao, L. Liu, B. Shen, and W.B. Hu, [1] J. Banhart, Prog. Mater. Sci., 2001, vol. 46(6), pp. 559-657.
- [2] W. Azzi, W.L. Roberts, and A. Rabiei, Mater. Des.,

- Eng., 2007, vol.26(3),pp. 37-45.
- [26] J.M. LeBeau and Y. Boonyongmaneerat, Mater.Sci. Eng. A, 2007, vol. 458(1-2), pp. 17-22.
- [27] M. Amirjan, H. Khorsand, and M. Khorasani, I. J.Minor.Met.Mater., 2014, vol. 21 (11), pp. 1146-1152.
- [28] M.P. Albano and L.B. Garrido, Mater. Sci. Eng. A, 2006, vol. 420(1-2), pp.171-178.
- [29] S. Mei, J. Yang, J.M.F. Ferreira, and R. Martins, Mater. Sci. Eng.A, 2002, vol. 334(1-2), pp. 11-19.
- [30] A. Tsetsekou, C. Agrafiotis, and A. Miliias, J. Eur. Ceram.Soc., 2001, vol. 21(3), pp. 363-371.
- [31] A. Tsetsekou, C. Agrafiotis, I. Leon, and A. Miliias, J. Eur.Ceram. Soc., 2001, vol. 21(4), pp. 493-501.
- Mater. Res. Bull., 2005, vol. 40(10), pp. 1864-1871.
- [20] M.W. Donida, S.C.S. Rocha, and F. Bartholomeu, in Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), Sao Paulo,2004, pp. 217-224.
- [21] F. Ronsse, J.G. Pieters, and K. Dewettinck, J. Food. Eng., 2008, vol. 86(4), pp. 529-536.
- [22] B. Guignon, E. Regalado, A. Duquenoy, and E. Dumoulin, Powder Technol., 2003, vol. 130(1-3), pp. 193-199.
- [23] S. Srivastava and G. Mishra, Int. J. Pharm. Sci. Drug.Res., 2010, vol. 2(4), pp. 236-242.
- [24] S. El Mafadi, M. Hayert, and D. Poncelet, Chem. Ind., 2003, vol. 57(12), pp. 641-649.
- [25] S.M. Alavi and L. Mirmomen, Iran. J. Chem. Chem.