

## تولید فوم فلزی Fe-10%Al با استفاده از NaCl به عنوان فضا ساز

محمد حسین گلابگیر<sup>۱\*</sup>، احمد ساعتچی<sup>۲</sup>، رضا ابراهیمی<sup>۳</sup>، محمد یعقوبی<sup>۱</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

\*h22golabgir@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۰۷)

### چکیده

فوم فلزی به دلیل خواص منحصر به فردی مانند استحکام به وزن بالا و جذب انرژی عالی در سال‌های اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است. در این تحقیق فوم فلزی محلول جامد جانشینی آلومینیوم در آهن با استفاده از تکنیک کاربرد فضا ساز موقت تولید شد. در فرآیند آلیاژسازی، مخلوط پودری شامل آهن و آلومینیوم در آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای به مدت ۲۵ ساعت آسیاب و سپس توسط پراش اشعه ایکس مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه برای تولید قطعه فومی از NaCl به عنوان فضا ساز و از رزین پلی استر به عنوان بایندر استفاده شد. زمان مورد نیاز برای خروج فضا ساز از نمونه‌ها ۴ روز به دست آمد. با استفاده از این روش، فوم محلول جامد جانشینی آلومینیوم در آهن تا ۸۰ درصد تخلخل با موفقیت تولید شد. نمونه‌های تولید شده به این روش دارای دیواره‌های بین تخلخل بدون حفره و ترک بوده و قطر تخلخل‌های به دست آمده نیز بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرون است.

### واژه‌های کلیدی:

فوم فلزی، محلول جامد جانشینی آلومینیوم در آهن، فضا ساز، روش ساخت فوم Fe-10%Al

### ۱- مقدمه

خودرو سازی و هواپیما سازی است [۲]. در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی ساخت فوم فلزی<sup>۱</sup> از فلزات مختلف انجام گرفته است، به عنوان مثال فوم‌های آلومینیومی [۳]، مسی [۴]، فولادی [۵]، سوپر آلیاژهای تیتانیومی [۶] و آلیاژهای حافظه‌دار نیکل-تیتانیومی [۷] از جمله فلزاتی هستند که بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی آن‌ها متمرکز بوده است. به طور کلی فوم‌های فلزی در سه حالت جامد، مذاب و بخار تولید شده‌اند [۱]. ساده‌ترین روش ساخت

فلزات متخلخل گروه جدیدی از مواد، با خواص منحصر به فردی از قبیل دانسیته پایین، استحکام به وزن بالا، سطح ویژه زیاد، رسانندگی حرارتی خوب و جذب انرژی عالی هستند [۱]. امروزه این مواد کاربرد وسیعی در حوزه‌های مختلف صنعتی و تحقیقاتی پیدا کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به مواردی همچون ایمپلنت‌های پزشکی، فیلترها و ضربه گیرها اشاره کرد. می‌توان گفت بیشترین کاربرد این مواد در صنعت به دلیل استحکام به وزن بالا و جذب انرژی عالی آن‌ها در صنایع

است [۱]. استفاده از فضا‌ساز یکی از ساده‌ترین روش‌های تولید فوم فلزی است و همان‌گونه که گفته شد بیشتر در مورد فلزات با دمای ذوب پایین استفاده شده است. در این تحقیق تولید فوم فلزی محلول جامد جانشینی آلومینیم در آهن با استفاده از روش استفاده از فضا‌ساز موقت و با استفاده از کلرید سدیم بررسی می‌شود.

## ۲- مواد و روش تحقیق

مخلوط پودری شامل آهن با خلوص ۹۹ درصد همراه با ۱۰ درصد وزنی آلومینیوم با خلوص ۹۷ درصد (جزئیات مواد اولیه در جدول شماره (۱) آمده است) تهیه و در آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۲۰ با ۵ گلوله ۲۰ میلی‌متری در محفظه‌ای از جنس فولاد سخت کرم دار و با سرعت ۶۰۰ rpm تحت اتمسفر آرگون با خلوص ۹۹ درصد به مدت ۲۵ ساعت آلیاژسازی مکانیکی گردید. ریزساختار نمونه‌های تولید شده با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس Philips مدل X'pert با لامپ کاتدی مسی با طول موج ۱/۵۴۰۵۹ آنگستروم و مجهز به تکفام ساز مورد بررسی قرار گرفت. برای تولید قطعه فومی، پودر حاصل از آلیاژسازی مکانیکی به ۶ نمونه ۲ گرمی تقسیم و سپس با ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد نمک کلرید سدیم، با سایز ۵۰-۲۰۰ میکرون، مخلوط شدند. در ادامه رزین پلی استر به عنوان بایندر به مخلوط اضافه شد. پس از مخلوط سازی کامل پودر آسیاب شده، نمک و رزین پلی استر به صورت دستی، قرص‌هایی استوانه‌ای با قطر ۱۴ و ارتفاع ۱۵ میلی‌متر با فشار ۱۰۰ مگاپاسکال تهیه گردید. برای مشخص کردن زمان مورد نیاز قرارگیری نمونه‌ها در آب و خروج نمک، چهار نمونه از هر قرص با درصدهای متفاوت نمک آماده و به ترتیب برای مدت ۲، ۳، ۴، ۵ روز در آب حاوی مانع‌کننده از خوردگی (سولفات سدیم) قرار گرفت، سپس نمونه‌ها از آب خارج و در کوره در دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت قرار داده شد.

فوم، تولید مستقیم فوم با استفاده از تزریق حباب‌های گاز در مذاب فلز است. در این روش می‌توان قطعات بزرگ را با هزینه‌ای به نسبت پایین تولید نمود. حفره‌های نامنظم و بعضاً بسیار بزرگ مشکل اصلی تولید به این روش می‌باشد.

در روش دیگر از یک فوم سلول باز پلیمری به عنوان شکل پایه استفاده می‌شود و روند کار همانند تولید قطعه در ریخته‌گری دقیق می‌باشد. این روش نسبت به روش قبل گران‌تر بوده اما خواص مکانیکی قطعه تولید شده مطلوب‌تر می‌باشد. دو روش ذکر شده بر پایه تولید از حالت مذاب می‌باشد [۸ و ۹].

روش‌های تولید از حالت جامد بیشتر برای تولید فوم از فلزاتی که دمای ذوب بالا دارند استفاده می‌شود. یکی از پرکاربردترین این فرآیندها، تولید فوم با استفاده از تکنولوژی متالورژی پودر و کاربرد مواد گاز زا مانند  $\text{MgCO}_3$ ،  $\text{SrCO}_3$ ،  $\text{TiH}_2$  و... است. در این روش فوم‌های سلول بسته با پراکندگی و اندازه حفرات قابل قبول تولید می‌شود. روش دیگر تولید از حالت جامد، استفاده از مواد فضا‌ساز<sup>۲</sup> می‌باشد. در این روش مواد فضا‌ساز مانند: NaF، NaCl و... همراه با پودر فلز مخلوط و پرس شده و پس از زینتر، فضا‌ساز از سیستم حذف می‌شود [۸]. این روش بیشتر برای فلزات با دمای ذوب پایین مانند آلومینیوم کاربرد دارد [۱]. از مزایای این روش می‌توان به کنترل اندازه تخلخل با استفاده از تغییر در اندازه ذرات فضا‌ساز، یکنواختی تقریبی تخلخل‌ها، قابل کنترل بودن اندازه تخلخل‌ها و سهولت انجام کار اشاره نمود [۲ و ۹]. با توجه به این که روش استفاده از فضا‌ساز فرآیند ساده‌ای دارد، در سال‌های اخیر برای تولید نمونه‌های فومی آزمایشگاهی کاربرد زیادی پیدا کرده است. ونجوان و همکارانش [۹] فوم تیتانیومی را با استفاده از این روش و کربامید به عنوان فضا‌ساز تولید نمودند. به طریق مشابه لینگ‌هاوو و همکاران [۱۰] نیز فوم منیزی را تولید کردند. ژائو و همکاران [۷] نیز فوم آلیاژ نیکل-تیتانیوم را با استفاده از نمک NaCl تولید نموده و درصد تخلخل قطعات تولید شده را به دست آوردند. در آزمایش‌های مشابه از مواد دیگری مانند NaF و پلیمرهایی مانند PMMA به عنوان فضا‌ساز استفاده شده

جدول (۱): مشخصات مواد اولیه استفاده شده

تولید کننده	دانه بندی (میکرون)	خلوص	مواد اولیه
مرک آلمان	۱۰	٪۹۹	آهن
ایران- صنعتی	۴۰	> ٪۹۷	آلومینیوم
مرک آلمان	۲۰۰-۵۰۰	٪۹۹/۹	نمک NaCl

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2)$$

پارامتر شبکه آهن قبل از انجام آسیاب کاری ۲/۸۵ آنگستروم بدست آمد و پس از انجام ۲۵ ساعت آسیاب کاری ۲/۸۸ آنگستروم شد.

ایلمان<sup>۴</sup> و همکارانش [۱۱] توانستند محلول جامد جانشینی آلومینیوم در آهن را پس از ۳۶ ساعت آسیاب کاری با نسبت گلوله به پودر ۱:۴ بدست آورند.

این محققین پارامتر شبکه نمونه آهن همراه با ۱۰ درصد آلومینیوم را ۲/۸۸ آنگستروم و حرکت پیک را به میزان ۰/۰۳ به سمت چپ گزارش کردند که با نتایج بدست آمده در این تحقیق همخوانی دارد. تغییر پارامتر شبکه را می توان به حل شدن آلومینیوم در آهن یا کرنش شبکه حاصل از آسیاب کاری نسبت داد.

در این تحقیق با توجه به حذف شدن پیک آلومینیوم پس از ۲۵ ساعت آسیاب کاری و همچنین مقایسه پارامتر شبکه با کارهای انجام شده قبلی و در نظر گرفتن این موضوع که نمونه در دمای بالاتر از دمای ذوب آلومینیوم قرار داده و در عمل هیچگونه مذابی مشاهده نشد می توان نتیجه گرفت آلومینیوم موجود در آهن حل شده و محلول جامد جانشینی آلومینیوم در آهن بدست آمده است.

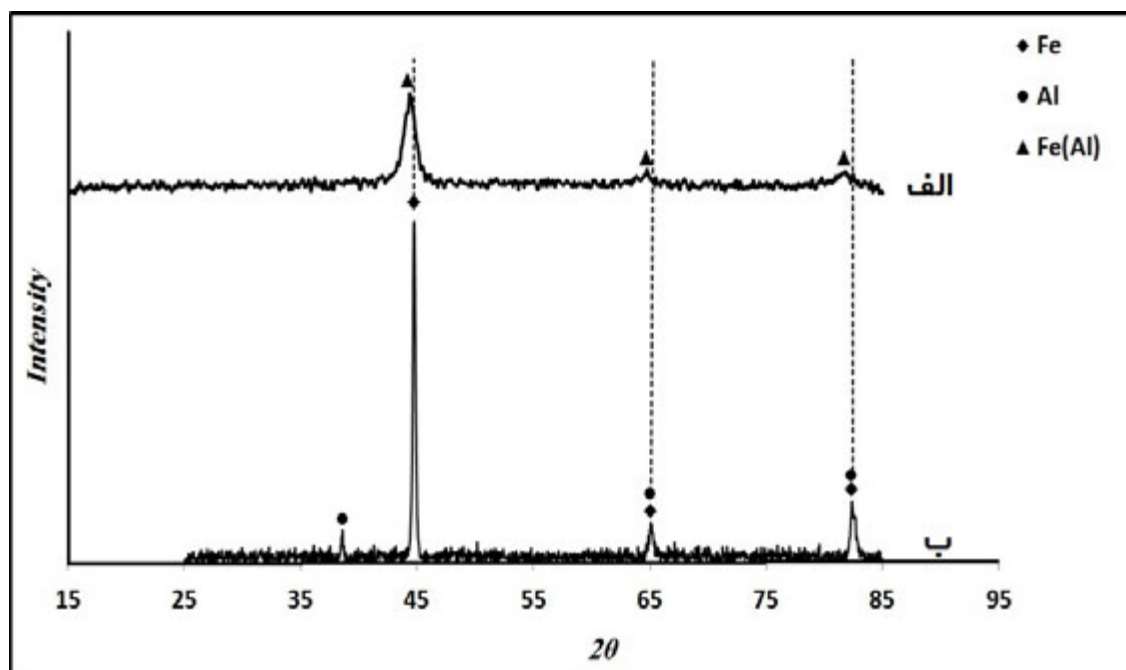
در ادامه نمونه ها از وسط بریده و میزان خروج نمک از آن ها مورد بررسی قرار گرفت. در پایان پس از به دست آوردن زمان مورد نیاز برای خروج نمک از آب، نمونه های نهایی تهیه و طی دو سیکل حرارتی در کوره لوله ای به فوم فلزی تبدیل شدند. در سیکل حرارتی اول قرص ها در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۰ دقیقه حرارت داده شد تا رزین پلی استر خارج شود، در سیکل حرارتی دوم قرص ها در دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۷۵ دقیقه در اتمسفر آرگون با خلوص ۹۹ درصد قرار گرفتند تا زینتر گردند.

درصد تخلخل فوم ها بوسیله قانون ارشمیدس و طبق استاندارد ASTM C373-88 اندازه گیری شد. شکل و اندازه تخلخل ها بوسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی seron technology مدل AISI2000 مورد ارزیابی قرار گرفت.

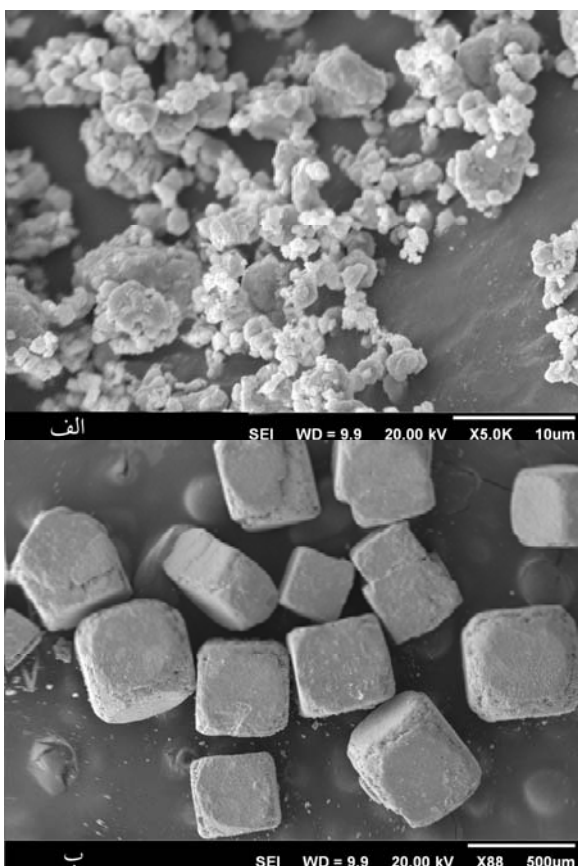
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- آلیاژسازی

شکل (۱) الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه مخلوط شده و هم چنین نمونه ۲۵ ساعت آسیاب کاری شده را نشان می دهد. در شکل (۱-الف) پیک های آهن و آلومینیوم قبل از آسیاب کاری بصورت مجزا قابل مشاهده هستند اما در شکل (۱-ب) پس از ۲۵ ساعت آسیاب کاری پیک های آلومینیوم حذف شده و پیک های آهن به سمت چپ حرکت کرده اند. تشکیل محلول جامد را می توان با استفاده از تغییرات پارامتر شبکه آهن اثبات نمود. آهن دارای شبکه کریستالی مکعبی است و پارامتر شبکه آن توسط قانون براگ<sup>۳</sup> بدست می آید:



شکل (۱) الگوی پراش اشعه ایکس مخلوط: الف) قبل از آسیاب کاری و ب) بعد از آسیاب کاری

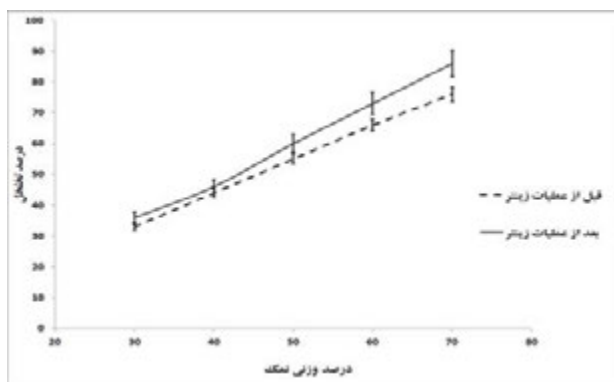


شکل (۲): الف) پودر محلول جامد آلومینیوم در آهن و ب) نمک NaCl

### ۳-۲- تولید فوم

شکل (۲) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پودر آلیاژسازی شده و نمک NaCl را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است اکثر ذرات پودر تولید شده دارای اندازه کمتر از ۵ میکرومتر هستند. با توجه به اختلاف سایز بین نمونه پودری تولید شده و نمک NaCl و همچنین اختلاف دانسیته آن‌ها، برای مخلوط سازی نیاز به یک ماده تر بود، همچنین با در نظر گرفتن دمای زینتر بالای نمونه آهنی که بالاتر از دمای ذوب نمک (۸۰۱ درجه سلسیوس) می‌باشد، باید نمک قبل از عملیات زینتر از نمونه خارج شود، به همین دلیل باید از چسبی استفاده شود که در آب حل نگردد و پس از حرارت دادن نیز از نمونه خارج شود، رزین پلی استر مورد نظر را داشت. رزین پلی استر، پلیمری است که از دمای ۲۲۰ درجه سلسیوس شروع به سوختن و خارج شدن از داخل قطعه می‌کند. با استفاده از آنالیز TGA مشخص شد در صورت افزایش مداوم دما خروج بایندر تا ۵۸۰ درجه سلسیوس ادامه می‌یابد، که افزایش دما تا این درجه حرارت ممکن است باعث افزایش میزان اکسیداسیون در

تخلخل نمونه‌ها پس از انجام عملیات زینتر محاسبه شد. نتایج حاصل از هر دو مرحله در شکل (۴) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود درصد تخلخل نمونه‌ها قبل از زینتر با افزایش میزان نمک بصورت خطی افزایش می‌یابد اما پس از زینتر این روند دچار تغییر شده و در درصدهای نمک بالا تخلخل بیشتری ملاحظه می‌شود. دلیل این اتفاق را می‌توان این‌گونه توضیح داد که درصد تخلخل پس از زینتر ناشی از جای خالی نمک و همچنین خروج بایندر در حین عملیات زینتر شدن است و با توجه به این که میزان بایندر مورد استفاده به مقدار ۱۰ درصد وزنی نمک مصرفی است، بنابراین در درصدهای نمک بالاتر، بایندر بیشتری اضافه شده و در نتیجه تخلخل بیشتری مشاهده می‌شود.

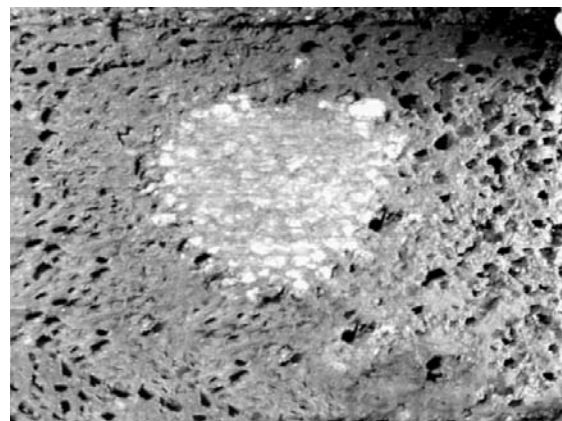


شکل (۴): میزان تخلخل نمونه‌ها با مقدار نمک متفاوت

#### ۴-۳- بررسی ساختار

نمای ظاهری فوم تولید شده با ۶۰ و ۷۰ درصد وزنی نمک در شکل (۵) آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است تخلخل‌ها بصورت یکنواخت در تمام قطعه پراکنده شده‌اند. برای بررسی اندازه تخلخل‌ها، قطعات فومی با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد اندازه تخلخل‌ها بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرون متغیر می‌باشد. شکل (۶) نشان دهنده اندازه تخلخل‌ها در سطح بیرونی قطعه است همان‌گونه که در شکل مشخص است زوایای اکثر تخلخل‌های بدست آمده قبل و بعد از زینتر تغییر چندانی نکرده است.

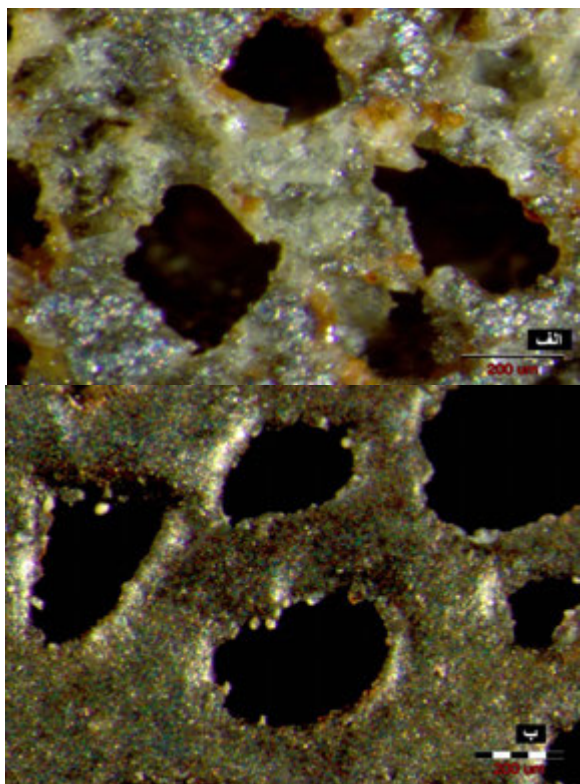
قطعه شود. به همین دلیل قطعه به مدت ۴۰ دقیقه در ۴۵۰ درجه سلسیوس نگه داشته شد. این زمان با استفاده از قرارگیری نمونه‌های مختلف در کوره و بررسی میزان خروج بایندر از آن‌ها به دست آمد. مقدار رزین استفاده شده در هر نمونه متفاوت و به مقدار ۱۰ درصد وزنی از نمک موجود در آن نمونه است، به همین دلیل با افزایش مقدار نمک، میزان رزین پلی استر مصرفی نیز بیشتر می‌شود. آزمایش‌های انجام شده برای بررسی سرعت خروج نمک از درون نمونه‌ها، نشان داد که نمک موجود در قرص‌هایی که تا سه روز در آب قرار گرفته‌اند، بطور کامل خارج نمی‌گردد. شکل (۳) این موضوع را به روشنی نشان می‌دهد. در صورتی که نمک در نمونه‌هایی که به مدت ۴ روز در آب قرار گرفت بطور کامل خارج گردید.



شکل (۳): نمک باقی‌مانده پس از ۳ روز قرار دادن قطعه در آب

#### ۳-۳- بررسی میزان تخلخل

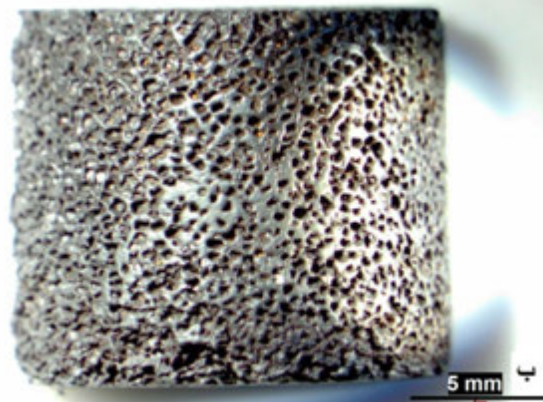
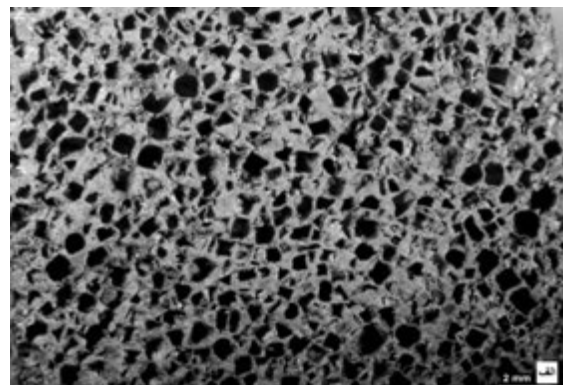
تخلخل برای نمونه‌ها با ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد وزنی نمک محاسبه و سپس نمودار درصد تخلخل بر حسب میزان نمک رسم گردید. نمونه حاوی ۸۰ درصد نمک شکل اولیه خود را از دست داد، به همین دلیل در محاسبات درصد تخلخل آورده نشده است. میزان تخلخل برای نمونه‌های یاد شده در دو مرحله محاسبه گردید، مرحله اول پس از خروج نمک که نمونه‌ها خشک و سپس درصد تخلخل آن‌ها بدست آمد. در مرحله بعد



شکل (۶): تصویر میکروسکوپ نوری از نمای بیرونی تخلخل‌ها:  
الف) قبل از زینتر و ب) بعد از زینتر

در تحقیقی مشابه ونگ<sup>۶</sup> و همکارانش [۴] فوم مسی را با استفاده از نمک کلرید سدیم تولید نمودند. فوم تولید شده توسط آن‌ها نیز دارای حفره‌های ریز در دیواره بین تخلخل‌ها و نزدیک به تخلخل‌های اصلی است. در دو تحقیق ذکر شده فشار استفاده شده برای پرس بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ مگا پاسکال گزارش شده که این فشار باعث شکسته شدن ذرات نمک و به وجود آمدن امکان ورود این قسمت‌های شکسته شده به دیواره بین تخلخل‌ها می‌شود. در این تحقیق بدلیل استفاده از رزین پلی استر از فشار کمتری استفاده شد و همان‌گونه که در شکل (۷-ج) مشاهده می‌شود هیچگونه حفره‌ای در دیواره بین تخلخل‌ها دیده نمی‌شود. یکی از مهمترین پارامترهای تأثیر گذار بر روی استحکام فوم اندازه و یکنواختی دیواره بین تخلخل‌ها است. اندازه دیواره بین تخلخل‌ها با تغییر در درصد نمک دچار تغییر می‌شود. در درصدهای نمک بسیار بالا دیواره شکل طبیعی خود را از دست داده و استحکام فوم بسیار کاهش می‌یابد.

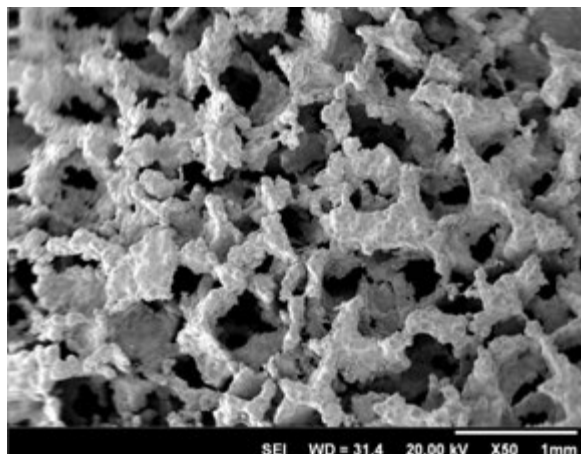
برای بررسی بیشتر تخلخل‌ها و دیواره بین آن‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. شکل (۷) نشان دهنده دیواره بین تخلخل‌ها می‌باشد. اندازه دیواره بین تخلخل‌ها در این نمونه بین ۱۵۰ تا ۳۵۰ میکرومتر متغیر است.



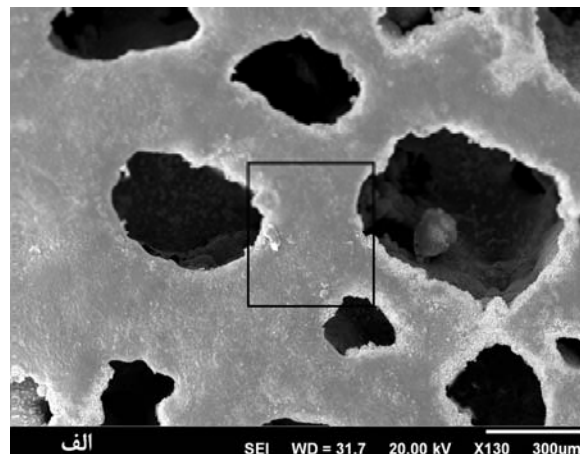
شکل (۵): تصویر میکروسکوپ نوری نمونه: الف) ۷۰ درصد نمک و  
ب) ۶۰ درصد نمک

شکل (۷-ج) نشان دهنده دیواره بین تخلخل‌ها با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر است که از آن می‌توان نتیجه گرفت دیواره به خوبی زینتر شده است.

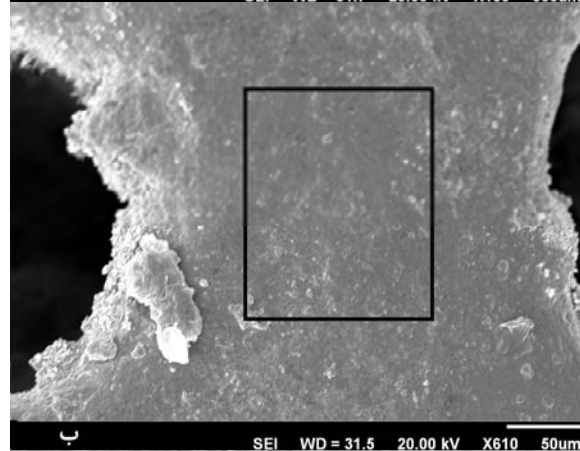
ژائو<sup>۵</sup> و همکارانش [۷] با استفاده از نمک NaCl فوم فلزی نیکل-تیتانیومی تولید کردند. بزرگترین مشکل فوم تولید شده توسط آن‌ها وجود تخلخل‌های ریز با اندازه کوچکتر از ۵ میکرون در دیواره بین تخلخل‌های اصلی است، این تخلخل‌های ناخواسته باعث کاهش استحکام فوم می‌شود.



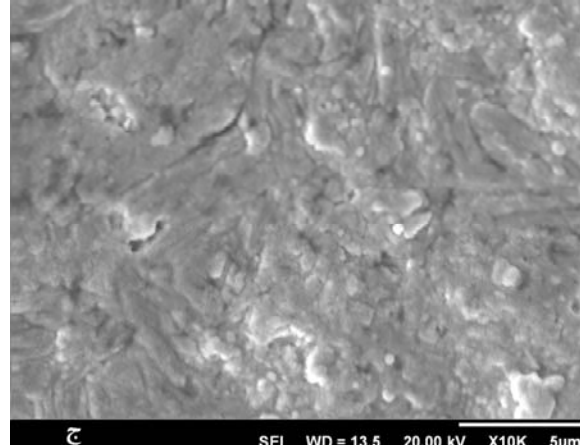
شکل (۸): نمای ظاهری نمونه تولید شده با ۸۰ درصد نمک



الف



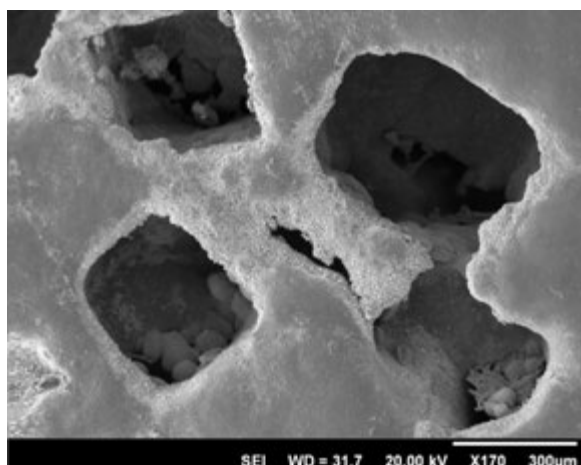
ب



ج

شکل (۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از دیواره بین

تخلخل‌ها



شکل (۹): شکست در دیواره بین تخلخل‌ها بدلیل نزدیک به هم بودن

دو دانه نمک

یکی از مشکلات اصلی در تحقیقات انجام شده به این روش در گذشته، مربوط به دیواره‌های شکسته در برخی نقاط فوم‌های تولید شده است. دلیل این شکستگی‌ها نزدیک به هم قرار گرفتن دو دانه نمک و نازک شدن بیش از حد دیواره می‌باشد. بانسیده‌ی<sup>۷</sup> و همکارانش [۱۲] در تحقیقی فوم فلزی آلیاژ نیکل - تیتانیوم را با استفاده از نمک NaCl تولید و خواص مکانیکی آن را بررسی نمودند.

مهم‌ترین دلیل کاهش خواص مکانیکی در کار آنها توزیع غیر یکنواخت نمک در کل قطعه و نزدیک به هم قرار گرفتن ذرات

شکل (۸) نمایی از فوم با ۸۰ درصد وزنی نمک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است فوم تولید شده با ۸۰ درصد وزنی نمک شکل یکنواخت خود را از دست داده و عملاً هیچ‌گونه استحکامی ندارد.

- [3] R. Surace, "Morphological Investigation of Foamed Aluminum Parts Produced by Melt Gas Injection", *Materials Science and Engineering*, Vol 9, Article ID 506024, 2009.
- [4] Q. Wang, "Open-Celled Porous Cu Prepared by Replication of NaCl Space Holders", *Materials Science and Engineering (A)*, Vol 527, pp. 1275-1278, 2009.
- [5] C. Y. Zhao, "The Temperature Dependence of Effective Thermal Conductivity of Open-Celled Steel Alloy Foams", *Materials Science and Engineering (A)*, Vol 367, pp. 123-131, 2004.
- [6] S. Ahmad, "Producing of Titanium Foam Using Titanium Alloy (Al3Ti) by Slurry Method", *Journal Biomaterials*, Vol 24, pp. 3293-3302, 2004.
- [7] X. Zhao, "Pore Structures of High-Porosity NiTi Alloys Made from Elemental Powders with NaCl Temporary Space-Holders", *Materials Letters*, Vol 63, pp. 2402-2404, 2009.
- [8] N. Babcsan, "Metal Foams- Manufacture and Physics of Foaming", *Materials Science and Engineering (A)*, Vol 367, pp. 86-97, 2000.
- [9] M. Wenjuan, "Preparation and Characterization of Porous Titanium using Space-Holder Technique", *Rare Metals*, Vol. 28, No. 4, pp. 338-343, 2009.
- [10] L. Hao, "Processing and Mechanical Properties of Magnesium Foams", *Journal of Porous Material*, Vol. 16, pp. 251-256, 2009.
- [11] D. Eelman, "An Investigation of Mechanically Alloyed Fe-Al", *Alloys and Compounds*, Vol. 266, pp. 234-240, 1998.
- [12] A. Bansiddhi, D. C. Dunand, "Shape-Memory NiTi Foams Produced by Solid-State Replication with NaF", *Intermetallics*, Vol. 15, pp. 1612-1622, 2007.

## ۷- پی نوشت

- 1- Metal foam
- 2- Space holder
- 3- Bragg
- 4- Eelman
- 5- Zhao
- 6- Wang
- 7- Bansidhi

نمک در قسمت‌هایی از نمونه گزارش شده است، که این موضوع در نهایت منجر به شکسته شدن دیواره‌های بین تخلخل‌ها و کاهش شدید استحکام و جذب انرژی فوم می‌شود. در این تحقیق بدلیل استفاده از ماده تر، پراکنندگی ذرات نمک بسیار مناسب است و شکست در دیواره‌ها به حداقل رسید. در شکل (۹) یک مورد از این شکستگی‌ها به وضوح دیده می‌شود.

## ۴- نتیجه گیری

- ۱- فوم فلزی محلول جامد آلومینیوم در آهن با استفاده از فضا ساز NaCl با موفقیت تولید گردید.
- ۲- با توجه به دمای زینتر آلیاژ آهن- آلومینیوم که بالاتر از دمای ذوب نمک بود، می‌توان از این روش برای تولید فوم از دیگر فلزات با دمای زینتر بالا نیز استفاده نمود.
- ۳- درصد نمک مطلوب برای تولید فوم از این روش بین ۳۰ تا ۷۰ درصد بدست آمد.
- ۴- در مقایسه با کارهای مشابه می‌توان گفت رزین استفاده شده در این تحقیق باعث پراکنندگی بهتر ذرات نمک در کل نمونه شد.

## ۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از مسئول آزمایشگاه آنالیز دانشکده مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد آقای مهندس چمی به دلیل همکاری صادقانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

## ۶- مراجع

- [1] M. F. Ashby, "Metal Foams: A Design Guide", Butterworth-Heinemann, 2000.
- [۲] م. دیواندری، "فوم‌های فلزی"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۵.