



## خوردگی و ارتعاش: عوامل مؤثر بر تغییرات جهت گیری فاز متخلخل در چدن خاکستری

مریم اکبری، عسل حسینی منزه\*

گروه مواد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۴-۲۳  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۷-۰۸  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۱۹  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۰۳

### کلمات کلیدی:

چدن خاکستری  
میرایی ارتعاش  
محیط خورنده  
جهت گیری فاز متخلخل

**خلاصه:** چدن خاکستری به دلیل وجود سیلیسیوم، قابلیت ریخته‌گری بالایی دارد. توانایی بالای ماشین‌کاری قطعات ریخته شده و میرایی ارتعاش دو خاصیت تقریباً خاص این آلیاژ هستند که سبب کاربرد گسترده آن در صنعت گردیده است. استفاده از براده‌های ماشین‌کاری به‌عنوان ماده اولیه ساخت قطعات، در چند سال اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این پژوهش، از براده ماشین‌کاری چدن خاکستری به‌عنوان ماده اولیه جهت تولید ساختارهای متخلخل استفاده گردید. ساختارهای متخلخل تولیدی تحت دو فرآیند عمده و مخرب صنعتی یعنی خوردگی و ارتعاش به‌صورت متوالی و موازی قرار داده شد. به‌منظور نشان دادن قدرت تخریب و مقایسه این فاکتور در این دو فرآیند، تغییرات جهت گیری فاز متخلخل (ناشی از جذب انرژی‌های دو فرآیند مخرب) اندازه‌گیری گردید. مشاهده گردید بیشترین میزان جذب انرژی که همراه با بیشترین تغییرات در جهت‌گیری فاز متخلخل می‌باشد؛ تابع میزان تخلخل، نوع فرآیند مخرب و ترتیب اعمال خوردگی و ارتعاش می‌باشد. در حالتی که دو فرآیند ارتعاش و خوردگی به‌صورت متوالی اعمال شود؛ مکانیزم غالب در اعمال تغییر جهت فاز متخلخل، خوردگی می‌باشد؛ که توانایی کمتری در ایجاد تغییرات ریزساختاری دارد. در صورتی که فرآیندهای مخرب به‌صورت موازی اعمال شود؛ نمونه‌ای با مقدار متوسط تخلخل ۴۲٪، بیشترین جذب انرژی را داشته و مکانیزم غالب در این حالت، ارتعاش است.

### ۱- مقدمه

به‌طور کلی، فرآیند ساخت و بررسی رفتار متالورژیکی فلزات متخلخل اعم از فوم‌های فلزی و یا فلزات با بافت سلولی، بیش از ۹۰ سال است که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱ و ۲]. مواد فلزی متخلخل، کاربردهای وسیعی در کنترل نوفه<sup>۱</sup> موجود در صنایع مختلف دارند. مقاومت حرارتی، وزن پایین و سفتی این گروه از مواد، به‌عنوان مزیت شناخته شده و سبب کاربرد این گروه در صنایع مختلف می‌گردد [۳-۵]. در چندین سال اخیر، با گسترش مطالعات و فرآیندهای ساخت مواد متخلخل فلزی، مواد صوتی با مشخصه قابلیت جذب صدا، براساس بهینه‌سازی ساختار متخلخل مورد اهمیت و توجه قرار گرفته‌اند [۶]. در ساختار مواد متخلخل، منطقه‌ای که فضای خالی است؛ حفره یا سلول نامیده می‌شود و فاز جامد نیز منطقه چگال و یا فاز مادر نام می‌گیرد [۷]. وجود حفرات سبب شده است

که مواد متخلخل علاوه بر قابلیت بالا در زمینه جذب صدا و نوفه، ظرفیت جذب انرژی مکانیکی و الکتروشمیایی بالایی داشته باشند [۸]. میزان جذب انرژی و نوفه تابع اندازه، شکل، کسر حجمی، توزیع، و ریخت‌شناسی<sup>۲</sup> و ضخامت فاز مادر در مواد متخلخل می‌باشد [۹]. میرایی به‌عنوان یکی از مقادیر قابل اندازه‌گیری، توانایی ماده برای پراکنده نمودن انرژی کرنشی الاستیک در طول ارتعاش مکانیکی و پخش امواج در داخل حجم<sup>۳</sup> قطعه است [۱۰]. قابلیت میرایی ارتعاش اغلب در فلزات قابل مشاهده است [۱۱]. که یکی از دلایل آن مشخصه ویسکوالاستیک این دسته از مواد می‌باشد. عیوبی هم‌چون نابجایی‌ها، مرزهای فازی، مرزخانه‌ها و انواع مختلفی از فصل مشترک‌ها در میرایی ارتعاش مشارکت نموده و آن را تقویت می‌نمایند. دلیل این امر، حرکت آهسته عیوب ذکر شده و هم‌چنین لغزش بسیار کم و محدود سطح در حین جذب انرژی می‌باشد؛ که سبب می‌گردد یکپارچگی

2 Morphology  
3 Bulk

1 Noise

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a\_hosseinionazzah@sbu.ac.ir



کل ساختار حفظ شود [۱۲]. علاوه بر نقش ویژگی‌های ریزساختاری فوم‌ها در جذب نوفه، جذب انرژی الکتروشمیایی در این دسته از مواد تابع ریخت‌شناسی و ابعاد فاز متخلخل می‌باشد. خوردگی به‌عنوان یک واکنش الکتروشیمیایی، یک روند پیچیده مخرب است. حملات خوردگی یک فرآیند منظم هستند و به حالات قرارگیری اتم‌ها روی سطحی که حمله خوردگی آن‌جا در حال اتفاق افتادن است؛ بستگی دارد. در مواد متخلخل، با افزایش میزان تخلخل، مقاومت به خوردگی کاهش می‌یابد؛ که همراه با اعمال تغییرات در ریزساختار نمونه است [۱۳-۱۵]. شایان ذکر است میزان میرایی ارتعاش و مقاومت در برابر خوردگی در ساختارهای متخلخل، علاوه بر ویژگی‌های ریزساختاری، تابع جنس و ترکیب شیمیایی ماده اولیه نیز می‌باشد [۹].

در این میان، چدن خاکستری به دلیل دارا بودن گرافیت‌هایی با هندسه کشیده، نقش اصلی را در میرایی ارتعاشات مکانیکی عهده‌دار است؛ مضاف بر آن حضور ساختار لایه‌ای صفحات گرافیتی، سبب سهولت روان‌کاری در حالت جامد و در نتیجه کاهش اصطکاک و سایش در قطعات صنعتی می‌گردد [۱۶]. بنابراین در صورت ساخت فوم از چدن خاکستری، امکان دستیابی به ویژگی‌های بالا وجود دارد. چدن خاکستری متخلخل به‌روش ریخته‌گری [۱۷] و متالورژی پودر تولید می‌شود. در روش جامد، از براده‌های ماشین‌کاری به‌عنوان پودر مصرفی استفاده می‌گردد [۱۸ و ۱۹]. از منظری دیگر، در میان تمام براده‌های ماشین‌کاری، براده‌های فولاد و چدن، دارای اهمیت بالاتری هستند. دلیل این گفته، در نظر گرفتن حجم و کیفیت محصولات تولیدی است. در حقیقت، لزوم و اهمیت قسمت اقتصادی فرآیندهای صنعتی، سبب گردیده است که رویکرد استفاده از براده‌های ماشین‌کاری، به‌خاطر عدم نیاز به فرآیندهای ذوب مجدد که هم سبب ایجاد هزینه و هم ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی می‌گردد؛ مثبت شده و رو به افزایش رود [۲۰].

در این پژوهش، با تکیه بر استفاده از روشی صنعتی و ارزان قیمت در جهت تولید پودر اولیه، از براده‌های ماشین‌کاری شده چدن خاکستری به‌عنوان ماده اولیه جهت تولید فوم GG۲۵ با میزان تخلخل متفاوت استفاده گردید. در انتخاب فرآیند مخرب، با تکیه بر این نکته که در صنعت، چندین عامل سبب تغییر ریزساختار و تخریب ماکروسکوپی قطعات می‌گردند؛ دو عامل اثرگذار و مخرب ارتعاش و خوردگی، که در اکثر محیط‌های تولیدی و صنعتی حضور

دارند؛ انتخاب گردید. سپس تغییرات ریزساختار ناشی از حضور فرآیندهای مخرب خوردگی و ارتعاش در نمونه‌هایی با کسر حجمی متفاوت از فاز متخلخل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ارتعاش به‌دلیل ماهیت موجی خود، دارای انرژی است. نمونه‌ای که تحت ارتعاش قرار می‌گیرد؛ مقداری از انرژی فوق را جذب و بقیه انرژی را نشر می‌نماید. شایان ذکر است، قدرت جذب جسم، تابعی از جنس آن است. انرژی جذب شده در قطعه، به‌صورت انرژی پتانسیل در ذرات ذخیره شده و سبب تغییرات ریزساختاری نمونه می‌گردد [۲۱]. تغییرات ریزساختاری در حالت گذر گاز از ساختار متخلخل در پژوهش‌های گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است. ونگاس و همکاران [۲۲]، تغییر رفتار سیال ناشی از تغییر ابعاد و هندسی فاز متخلخل مورد بررسی قرار دادند. در پژوهشی دیگر، لیو و همکاران [۲۳]، نشان دادند که تغییرات ریزساختاری در نمونه‌های متخلخل تحت اثر امواج را با جابجایی فاز سیال و جامد در هنگام آزمون می‌توان بررسی نمود. باتوجه به مطالعات صورت گرفته پیرامون نقش موج و انرژی بر تغییرات ریزساختاری فاز متخلخل، جهت بررسی اولیه، بزرگترین فاز میکروسکوپی: فاز مادر و فاز تخلخل، در نظر گرفته شده و جهت‌گیری آنها نسبت به یکدیگر (جهت‌گیری در متالورژی، به زاویه قرارگیری دو دانه نسبت بهم و یا دانه و مرز نسبت به یکدیگر اطلاق می‌گردد) مورد بررسی قرار گرفته است. حال اگر فاز مادر و فاز تخلخل را که به‌صورت پراکنده در قطعات قراردارند؛ به‌صورت دو فاز نسبت به یکدیگر در نظر بگیریم؛ می‌توان برای آنان جهت‌گیری نسبت به یکدیگر تعریف نمود. شایان ذکر است جهت دستیابی به میزان و اهمیت مکانیزم کنترل‌کننده تخریب، اثر توالی و هم‌زمانی دو فرآیند مخرب خوردگی و ارتعاش بر تغییرات ریزساختار که در نتیجه تغییر جهت‌گیری فاز متخلخل ایجاد می‌شود، بررسی گردید. هم‌چنین، به‌دلیل پایین بودن زمان نگهداری نمونه‌ها در محیط‌های مخرب، در این تحقیق، فقط سطح نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. دلیل این امر نیز قطعیت تغییر ریزساختار در سطح و عدم قطعیت از تغییرات ریزساختاری در مغز نمونه، با توجه به زمان اندک نگهداری در محیط‌های مخرب، بوده است. در صورت نگهداری در محیط‌های مخرب در مدت زمان بالاتر، تغییرات ریزساختار و اثرات تخریبی محیط آزمایش، به مغز نمونه نیز خواهد رسید. هم‌چنین فاکتور مورد بررسی (جهت‌گیری)، در دو بعد تعریف شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

بعد از عملیات ماشین کاری، فرآیند تولید قطعات آغاز گردید. سپس با استفاده از آزمایش الک، اندازه ذرات و نحوه پراکندگی آنها مورد مطالعه قرار گرفت. چگالی ظاهری در دمای محیط، بر مبنای روش جریان پذیری پودرها به دست آمد

این قسمت خود به دو بخش تولید و مشخصه یابی پودر و همچنین تولید قطعات تقسیم می گردد.

### ۲-۱- تولید و مشخصه یابی پودر

باتوجه به اهمیت بازیابی براده های ماشین کاری و تولید قطعات متخلخل از آنها [۲۰-۲۲]، در این پژوهش، ماشین کاری قطعه چدنی آنیل شده؛ با روش ماشین کاری روتراشی با دستگاه BR ۵۰ TN انجام پذیرفت. قطعات به صورت شمشه ای آنیل شده تهیه گردید. ترکیب شیمیایی تقریبی آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش در جدول زیر آورده شده است:

گفتنی است؛ فرآیند در سرعت پایین (۲۵۰ rpm) و با میزان بار ۰/۱ mm و میزان پیش روندگی (۰/۷ mm/rev) انجام گرفته است و در نتیجه میزان اصطکاک و گرمای تولید شده بسیار پایین بوده و تقریباً هیچ اثری بر ترکیبات شیمیایی آلیاژ نخواهد داشت. در حین فرآیند، به علت سرعت و نرخ پیش روندگی پایین، میزان تنش پسماند ایجاد شده در لایه بعدی از قطعه تقریباً ناچیز بوده است. شایان ذکر است از همان میزان اندک تنش پسماند ایجاد شده در حین اعمال فرآیند که از حضور آن گریزی نیست؛ به عنوان عاملی (به دلیل کارسخت شدن لایه بعدی قطعه که هدف ماشین کاری در پاس بعدی بوده است) برای حصول پراکندگی مناسبی از اندازه براده ها، بهره برده شد. پیرامون ثابت در نظر گرفتن پارامترهای ماشین کاری، انتخاب اعداد برای به دست آوردن ریزترین براده ها به صورت تجربی بوده و هدف از این پژوهش بررسی دقیق میزان براده های حاصل از فرآیند نبوده است بلکه به دنبال ایجاد براده هایی ریز و نزدیک به پودرهایی با اندازه میکرومتری بوده ایم. شایان ذکر است؛ عملیات آنیل به منظور سهولت در فرآیند ماشین کاری و کاهش سختی قطعه چدن اولیه صورت گرفته است. در این مقاله، خلاف مطالعات پیشین [۲۴-۲۶]، براده های تولید شده تحت عملیات مکانیکی خردایش قرار نگرفته و به صورت مستقیم

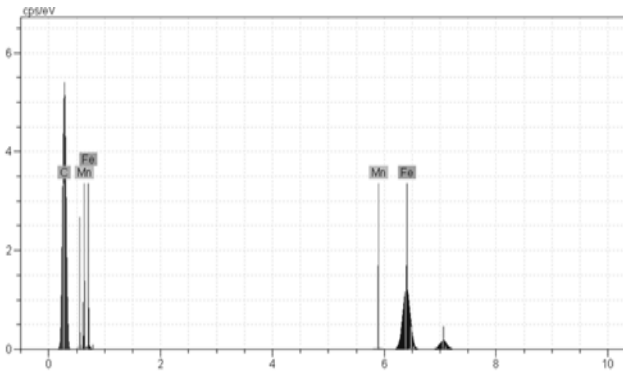
### ۲-۲- تولید قطعات

قطعات متخلخل به وسیله دستگاه پرس تک محوره (RMC، ظرفیت ۷۰ ton) در مدت زمان ثابت ۵s و تحت نیروهای مختلف تولید شدند. شایان ذکر است که باتوجه به قطر قالب (۱۷mm)، کمینه مقدار فشار لازم جهت رسیدن به استحکام خام MPa ۱۸۵ می باشد، به عبارت دیگر در نیروهایی کمتر از ۴۲ kN، امکان دست یابی به قطعه ای با ساختار یک پارچه وجود ندارد. علاوه بر فشار MPa ۱۸۵ جهت بررسی نقش میزان تخلخل بر تغییرات ریزساختاری ناشی از ارتعاش و خوردگی، قطعات تحت نیروی ۵۷ kN و ۸۰ kN قرار گرفتند؛ که سبب تولید فوم های با فشار MPa ۲۵۰ و MPa ۳۵۰ شده است (شکل ۱). نمونه های تولید شده در این مرحله، دارای استحکام خام مناسب بوده و چگالی خام آن ها اندازه گیری شده است. شایان ذکر است؛ در تمامی نمونه های تولیدی که ارتفاع حدودی آنها ۲ mm بوده است؛ هیچ گونه ترک سطحی مشاهده نشده و پدیده بشکته ای شدن نیز رخ نداده است. موارد فوق، بیانگر استحکام خام فشاری مناسب فوم های تولیدی می باشد. احتمال بروز واکنش شیمیایی بین سیلیسیوم و اکسیژن و تشکیل اکسید سیلیسیوم سبب می گردد؛ که از انجام فرآیند تفجوشی بر روی قطعات متخلخل چدن خاکستری صرف نظر گردد [۲۷]. لذا در پژوهش حاضر، نقش دو فرآیند مخرب ارتعاش و محیط خورنده بر تغییر جهت گیری فاز متخلخل قطعات خام مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور بررسی اثر ارتعاش بر روی جهت گیری فاز متخلخل، از فرکانس ۵۰ Hz به صورت تک محوره استفاده گردید. فرکانس مذکور، نیم دامنه فرکانس ۱۰۰ Hz می باشد؛ که به عنوان مخرب ترین فرکانس صنعتی شناخته شده است [۲۸]. در

جدول ۱: ترکیب شیمیایی چدن خاکستری مورد استفاده در این پژوهش

Table 1: Chemical composition of Grey cast iron used in this study

عنصر	کربن	سیلیسیوم	منگنز	فسفر	گوگرد	آهن
درصد وزنی	۲/۹	۱/۸	۰/۵	۰/۲	۰/۰۷	مقدار باقی مانده



شکل ۳: آنالیز طیف انرژی پراکنده اشعه X پودر GG25 تولید شده توسط فرآیند ماشین کاری

Fig. 3. EDS analysis of GG25 powder produced by machining process

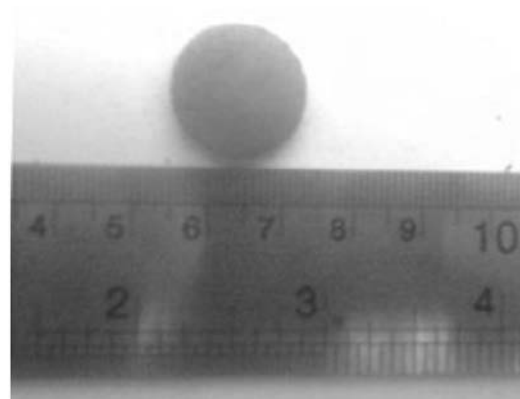
کلمه Salt و نشانه V مخفف کلمه Vibration می باشد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مشخصات پودر و نمونه های تولیدی

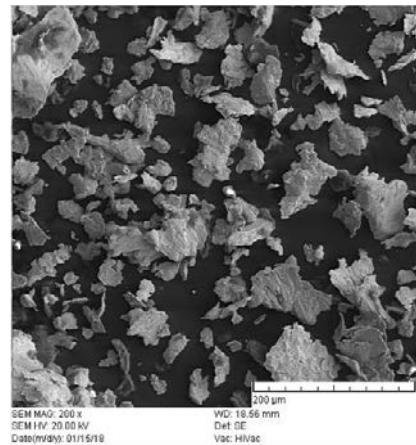
##### ۳-۱-۱- ریخت شناسی و آنالیز پودر تولید شده

در شکل ۲، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اسکن شده<sup>۱</sup> از پودر چدن تولید شده با روش ماشین کاری ارائه شده است. با دقت در تصویر میکروسکوپی می توان گفت که هندسه پودرهای تولید شده به صورت کشیده و زاویه دار و دارای گستره ابعادی وسیع می باشد. آنالیز طیف انرژی پراکنده اشعه X<sup>۲</sup> مربوط به پودرهای فوق در شکل ۳، نشان دهنده عناصر اصلی موجود در پودر می باشد؛ که با عناصر موجود در ترکیب شیمیایی استاندارد حجم بدون تخلخل تطابق داشته و نشان دهنده چدن خاکستری GG25 است. در تفسیر پیک های این آنالیز باید گفته شود که دلیل اصلی قابلیت بالای ماشین کاری چدن خاکستری، لایه ای بودن ساختار ترکیب آن است و پیوندهای ضعیف واندروالسی که بین ترکیبات هر لایه قرار دارند؛ حین ماشین کاری شکسته شده و براده ایجاد می نمایند. حال ممکن است براده هایی که جهت بررسی طیف انرژی پراکنده اشعه X، از مناطق مختلف لایه های شکسته شده انتخاب شده اند، دارای میزان متفاوتی از عناصر نسبت به ترکیب کلی آلیاژ اولیه باشند. شایان ذکر است با توجه به موضعی بودن آنالیز طیف انرژی پراکنده اشعه X، فرضیه فوق مورد



شکل ۱: نمونه خام تولید شده از براده چدن خاکستری

Fig. 1. Green sample made of cast iron swarf



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر چدن خاکستری تولیدی

Fig. 2. SEM image of produced grey cast iron powder

این حالت قطعات قرص خام به مدت ۱۵ min بر روی میز لرزان تحت ارتعاش قرار داده شدند. جهت بررسی نقش محیط خورنده بر تغییرات ریزساختاری از آب دریا استفاده گردید. قدرت بالای خوردگی و متداول بودن آب دریا، سبب گردیده که محققان توجه ویژه ای به محیط فوق جهت بررسی های الکتروشیمیایی داشته باشند [۲۹]. در این تحقیق نمونه های فوم با درصد های متفاوت تخلخل به مدت ۱۵ min در آب دریا غوطه ور شدند. جهت بررسی اهمیت نقش فرآیندهای مخرب، طراحی آزمایش بر جایگشت و همزمانی دو فرآیند ارتعاش و خوردگی صورت گرفته است. به منظور ساده سازی شرایط آزمایش، اسامی نمونه ها به صورت مخفف در جدول ۲ ارائه شده است. در فرآیند نشانه گذاری، GG همان چدن خاکستری (GG25) و نشانه S مخفف

1 Scanning Electron Microscope (SEM)  
2 Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

جدول ۲: نشانه‌گذاری نمونه‌های ساخته‌شده در این پژوهش

Table 2. Symbols utilized for specimen fabricated in this research

ردیف	توضیحات	کد انتخاب شده
۱	نمونه خام تحت فشار ۱۸۵ مگاپاسکال	GG185
۲	نمونه خام تحت فشار ۲۵۰ مگاپاسکال	GG250
۳	نمونه خام تحت فشار ۳۵۰ مگاپاسکال	GG350
۴	نمونه تحت ارتعاش - فشار ۱۸۵ مگاپاسکال	GG185(V)
۵	نمونه تحت ارتعاش - فشار ۲۵۰ مگاپاسکال	GG250(V)
۶	نمونه تحت ارتعاش - فشار ۳۵۰ مگاپاسکال	GG350(V)
۷	نمونه تحت خوردگی - فشار ۱۸۵ مگاپاسکال	GG185(S)
۸	نمونه تحت خوردگی - فشار ۲۵۰ مگاپاسکال	GG250(S)
۹	نمونه تحت خوردگی - فشار ۳۵۰ مگاپاسکال	GG350(S)
۱۰	نمونه ابتدا تحت ارتعاش، سپس خوردگی - فشار ۱۸۵ مگاپاسکال	GG185(V)(S)
۱۱	نمونه ابتدا تحت ارتعاش، سپس خوردگی - فشار ۲۵۰ مگاپاسکال	GG250(V)(S)
۱۲	نمونه ابتدا تحت ارتعاش، سپس خوردگی - فشار ۳۵۰ مگاپاسکال	GG350(V)(S)
۱۳	نمونه ابتدا تحت خوردگی، سپس ارتعاش - فشار ۱۸۵ مگاپاسکال	GG185(S)(V)
۱۴	نمونه ابتدا تحت خوردگی، سپس ارتعاش - فشار ۲۵۰ مگاپاسکال	GG250(S)(V)
۱۵	نمونه ابتدا تحت خوردگی، سپس ارتعاش - فشار ۳۵۰ مگاپاسکال	GG350(S)(V)
۱۶	نمونه تحت خوردگی و ارتعاش به صورت همزمان - فشار ۱۸۵ مگاپاسکال	GG185(VS)
۱۷	نمونه تحت خوردگی و ارتعاش به صورت همزمان - فشار ۲۵۰ مگاپاسکال	GG250(VS)
۱۸	نمونه تحت خوردگی و ارتعاش به صورت همزمان - فشار ۳۵۰ مگاپاسکال	GG350(VS)

۱۰۰ پودر اولیه، به شرح زیر است.

براساس جدول ۳، ذرات تولید شده دارای اندازه‌ای کمتر از  $841 \mu\text{m}$  هستند. با دقت در نتایج آزمون الک، می‌توان گفت که اکثر اندازه ذرات در محدوده کمتر از  $300 \mu\text{m}$  قرار گرفته است. نکته حائز اهمیت، امکان دستیابی به گستردگی توزیع اندازه ذرات با استفاده از عملیات ماشین‌کاری است. به عبارت دیگر، هیچ‌گونه عملیات ثانویه خردایش روی براده‌های حاصل از ماشین‌کاری صورت نگرفته است. در شکل ۴، نمودار هیستوگرام جدول فوق ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است؛ برخلاف حالت‌های مرسوم پودرهای

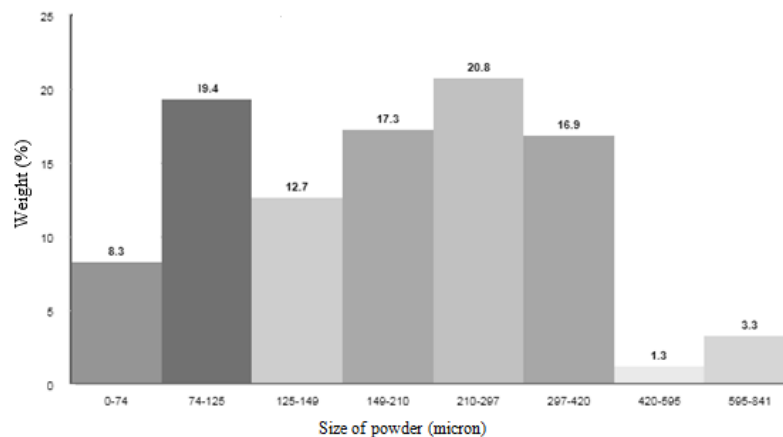
تایید می‌باشد. همچنین به دلیل نرم‌تر بودن ساختار گرافیت نسبت به آهن، با استناد به مورد مطالعاتی قمبری و همکارانش [۳۰]، گرافیت لایه‌ای نسبت به سایر ترکیبات موجود در چدن بیشتر و راحت‌تر شکسته شده و در آنالیز نمونه پودری، پیک کرین با شدت توزیع بیشتری نشان داده شده است.

به منظور تعیین گستره اندازه پودرهای تولید شده به روش ماشین‌کاری، از آزمون الک براساس استاندارد ASTM B214-99 استفاده شده است. نتایج آزمایش در قالب جدول ۳، شامل اندازه پودر، عدد مش الک و میزان جرم عبوری از هر الک به ازای  $g$

جدول ۳: نتایج آزمون الک براساس عدد مش و وزن پودر

Table 3. Results of sieving test based on mesh number and powder weight

اندازه پودر، میکرومتر	عدد مش	جرم پودر عبوری از الک، gr
۸۴۱	۲۰	۱۰۰/۰۰
۵۹۵	۳۰	۹۶/۷۰
۴۲۰	۴۰	۹۵/۴۰
۲۹۷	۵۰	۷۸/۵۰
۲۱۰	۷۰	۵۷/۷۰
۱۴۹	۱۰۰	۴۰/۴۰
۱۲۵	۱۲۰	۲۷/۷۰
۷۴	۲۰۰	۸/۳۰
<۷۴	کف	۸/۳۰



شکل ۴: توزیع اندازه ذرات پودر نمونه GG25

Fig. 4. Particle size distribution of GG25 sample

در دمای اتاق برای پودر تولید شده؛  $2/11 \text{ g/cm}^3$  بدست آمد. شایان ذکر است با توجه به میانگین اندازه ذرات، عدد جریان پذیری مناسب بوده که این امر به سبب حضور سه عامل: ۱- زاویه دار بودن پودرهای تولید شده، ۲- وجود زبری سطح روی براده‌های ماشین کاری و ۳- حضور دو پیک در نمودار توزیع اندازه ذرات که نشان دهنده این است که ذرات ریز و خیلی ریز نسبت به دو پیک در مجموعه پودر مورد استفاده وجود دارد و این پودرهای ریز در بین ذرات درشت‌تر به راحتی

تولید شده توسط روش‌های افشانش، حالت زنگوله‌ای در نمودار مشاهده نمی‌گردد. این امر نشان‌دهنده توزیع تقریباً یکنواخت ذرات در گستره‌ای از اندازه ذرات می‌باشد.

### ۳-۱-۲- چگالی

چگالی ظاهری پودر و نمونه‌های خام GG25 اندازه‌گیری شده است. با انجام آزمون جریان‌پذیری توسط قیف هال، چگالی ظاهری

جدول ۵: اندازه تغییرات جهت گیری فاز متخلخل در نمونه GG185(V)(S) نسبت به GG185

Table 5. The orientation changes of porous phase in the GG185 (V)(S) sample relative to GG185

نمونه	کمینه زاویه جهت گیری	بیشینه زاویه جهت گیری	متوسط زاویه جهت گیری
GG185	۰°	۱۷۱/۵۶°	۴۶/۰۱°
GG185(V)(S)	۰°	۱۷۷/۱۹°	۴۸/۱۸°
اختلاف نسبی	۰	٪ ۳/۲۸	٪ ۴/۷۲

که به وسیله نرم افزار کلمکس<sup>۱</sup> تعیین گردیده است؛ نسبت به نمونه اولیه (GG185، GG250، و GG350) در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. بیان این نکته ضروری است که به جهت جلوگیری از تعدد جداول، نتایج نهایی (تغییرات نسبی متوسط جهت گیری) در سه حالت نمونه تحت محیط خورنده بعد از اعمال ارتعاش (V)(S)، تحت ارتعاش بعد از قراردادن در محیط خورنده (V)(S) و ارتعاش و محیط خورنده به صورت همزمان (V/S) در جدول ۶ ارائه شده است.

علاوه بر داده‌های ذکر شده در جداول ۵ و ۶، تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار کلمکس، با تعیین دو فاز مادر و متخلخل در فرآیند تفکیک فازی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از نرم‌افزار فوق، به دلیل وضوح تصاویر و کیفیت بالاتر آن‌ها نسبت به تصاویر میکروسکوپی در جدول ۷ آورده شده است. در این تصاویر، در حالت خام و (V)(S)، فاز متخلخل به رنگ مشکی و در دو حالت (S)(V) و (V/S)، فاز متخلخل، با رنگ خاکستری نشان داده شده است.

بر اساس پژوهش‌های گذشته، اعمال فرآیندهای ارتعاش (ناشی از صوت و یا لرزش) و خوردگی (در محیط‌های خوردگی متفاوت) سبب بروز تغییراتی در ریزساختار و در نتیجه رفتار مکانیکی، فیزیکی و الکتروشیمیایی نمونه‌ها می‌گردد. مقدار ضریب جذب صوت و ارتعاش، تابع میزان تخلخل می‌باشد. بیشینه مقدار جذب، به‌ازای درصد تخلخل بهینه حاصل می‌شود [۳۴ و ۳۵]. در صورتی که با افزایش میزان تخلخل، مقاومت به خوردگی با نرخ افزایش، کاهش می‌یابد [۳۶-۳۸] عامل ارتعاش، در مواد جامد حجمی [۳۹] و در هنگام

جدول ۴: چگالی خام و درصد تخلخل در نمونه‌ها

Table 4. Raw density and percent of porosity in samples

نمونه	چگالی خام، g/cm <sup>3</sup>	درصد تخلخل
GG185	۳/۵۵	٪۶۷
GG250	۳/۸۳	٪۴۲
GG350	۵/۸۸	٪۱۸

جریان می‌یابند می‌باشد. و در ادامه در قابلیت فشرده‌سازی حین پرس سرد تاثیر مثبت دارد [۹]. نتایج چگالی خام نمونه‌ها، پس از پرس سرد، در دمای اتاق و تحت سه فشار متفاوت ۱۸۵، ۲۵۰ و ۳۵۰ MPa در جدول ۴ آورده شده است. در بحث متالورژی پودر و روش پرس سرد-تفجوشی، نمونه‌های تولید شده به صورت استوانه، تا ۶ میلی‌متر فاقد گرادیان چگالی بوده و در کل ارتفاع، نمونه دارای چگالی یکسان می‌باشد [۲]. با استفاده از همین اصل، که در ساخت قرص‌های فلزی به روش پرس سرد-تفجوشی مرسوم است؛ ارتفاع قطعات ساخته شده نیز زیر ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲- بررسی‌های ریزساختاری

ارتعاش [۳۱] و خوردگی [۳۲]، دو عامل تأثیرگذار و گاهی مخرب در فرآیندهای ساخت و استفاده از تجهیزات در صنایع مختلف می‌باشند. این دو عامل می‌توانند به صورت هم‌زمان و یا به صورت متوالی در فرآیند حضور داشته باشند و با تغییراتی که در ریزساختار نمونه ایجاد می‌کنند (تغییرات قطر حفره نمونه‌های متخلخل) [۳۳]، تأثیرات قابل ملاحظه‌ای در خواص قطعات (مکانیکی، فیزیکی و الکتروشیمیایی) به وجود آورند.

تغییرات جهت‌گیری فاز متخلخل نمونه نسبت به حالت اولیه، گویای اثرگذاری شرایط آزمون تحت اعمال دو فرآیند مخرب صنعتی یعنی ارتعاش با فرکانس پایین (زیر ۳۰۰ Hz و علی‌الخصوص فرکانس ۵۰ Hz) و محیط خورنده متداول (رطوبت یا آب دریا) می‌باشد. طراحی آزمایش به‌گونه‌ای بوده است که این دو فرآیند با توالی و به صورت هم‌زمان روی قطعات اعمال گردد. بیان این نکته حائز اهمیت می‌باشد که بررسی‌های ریزساختاری که در ادامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد؛ در یک المان ثابت از سطح که از ابتدای فرآیند تولید قطعات تعیین گردید؛ انجام پذیرفته است. نتایج تغییرات جهت‌گیری فاز متخلخل

جدول ۶: اندازه تغییرات جهت گیری فاز متخلخل در نمونه های GG185، GG250 و GG350 تحت ارتعاش و خوردگی نسبت به نمونه خام (اعداد ذکر شده، مقادیر متوسط می باشند)

**Table 6. The orientation changes of porous phase in GG185, GG250 and GG350 samples that vibrated and corroded relative to the green sample (the numbers are average values)**

نمونه	اندازه درصد تغییرات نسبی بر مبنای مقدار متوسط تغییرات جهت گیری
GG250(V)(S)	٪ ۱۸/۰۴
GG350(V)(S)	٪ ۳۵/۸۹
GG185(S)(V)	٪ ۱۱/۰۱
GG250(S)(V)	٪ ۲/۷۵
GG350(S)(V)	٪ ۲/۷۷
GG185(VS)	٪ ۲/۳۵
GG250(VS)	٪ ۵۶/۳۶
GG350(VS)	٪ ۴۱/۳۵

جدول ۷: تصاویر آنالیز شده میکروسکوپ نوری توسط نرم افزار کلمکس

**Table 7. Analyzed images of optical microscope by Celmex software**

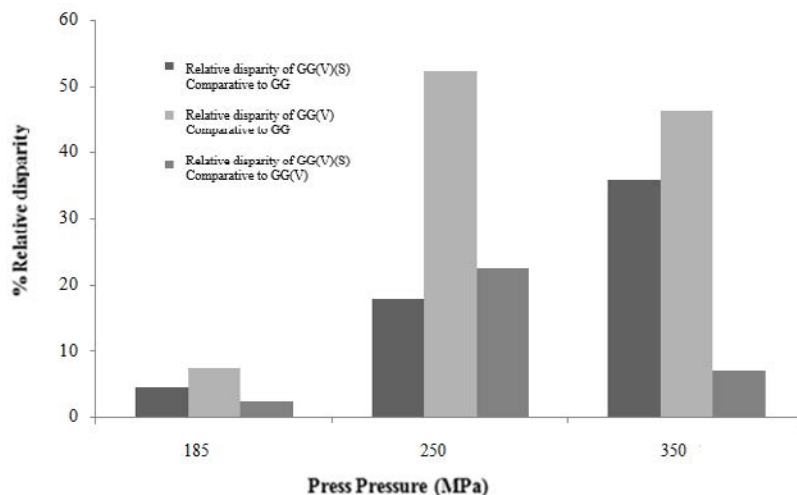
وضعیت	۱۸۵ MPa	۲۵۰ MPa	۳۵۰ MPa
Green Compact			
(V)(S)			
(S)(V)			
(VS)			

به خوردگی پایین تری نسبت به فولاد دارد [۴۵]. در ادامه، نمودارهای مستخرج از جداول ۵ و ۶، به صورت شکل های ۴ الی ۶ رسم گردیده است. شایان ذکر است؛ تغییرات نسبی زاویه متوسط جهت گیری نسبت به قطعه خام و مرحله مخرب اولیه به ازای هر فرآیند ارائه شده است. رنگ غالب در هر تصویر، نشان دهنده فاز مادر و رنگ دوم، نشان دهنده فاز تخلخل است.

میزان تغییرات ریزساختار تابع نوع فرآیند مخرب و مقدار فاز متخلخل می باشد. در فرآیند ارتعاش، جذب انرژی موج مرتعش شده

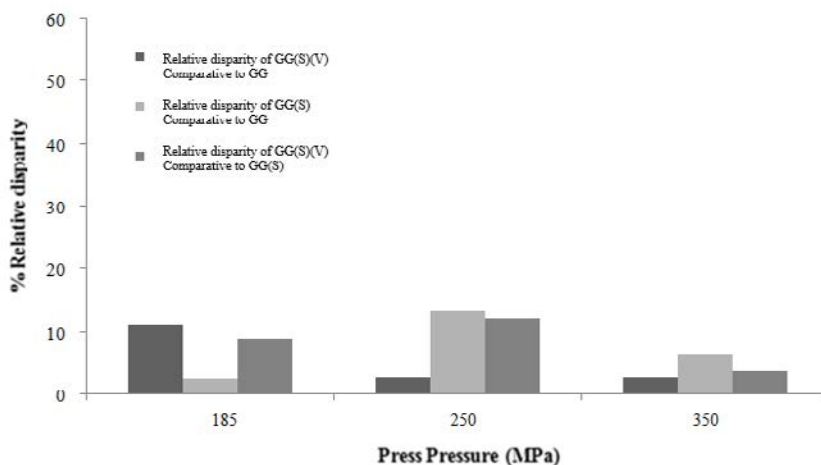
ریخته گری (نیمه جامد) [۴۰ و ۴۱]، سبب تغییر ریزساختار می گردد. تغییر ریزساختار به واسطه مشاهده تغییرات جهت گیری فیبرهای موجود در کامپوزیت چگال در محیط مرتعش نیز مشاهده گردیده است [۴۲]. محیط خورنده نیز توانایی تغییر ریزساختار و تغییرات جهت گیری دانه ها را داراست [۴۳]. عامل ارتعاش می تواند بر سرعت خوردگی نیز اثرگذار باشد. بدین صورت که با افزایش ارتعاش، سرعت خوردگی در قطعات حجمی افزایش می یابد [۴۴]. در این بین، چدن خاکستری به دلیل ترکیب شیمیایی خاص خود، به طور کلی مقاومت





شکل ۵: درصد تغییرات نسبی جهت‌گیری فاز متخلخل نسبت به قطعه خام و محیط خورنده بعد از آزمون ارتعاش

Fig. 5. %Relative changes of porous phase orientation compared to green material and corrosive atmosphere after vibration test (V)(S)



شکل ۶: درصد تغییرات نسبی جهت‌گیری فاز متخلخل نسبت به قطعه خام و محیط مرتعش بعد از آزمون خوردگی

Fig. 6 %Relative changes of porous phase orientation compared to green material and vibrated atmosphere after corrosion test (S)(V)

تخلخل، جرم مؤثر و مقدار محصولات خوردگی می‌باشد. با افزایش تخلخل‌ها، فضای بیشتری برای تماس محیط خورنده با فاز مادر وجود دارد؛ اما از سوی دیگر به دلیل کاهش جرم مؤثر، میزان محصولات خوردگی کاهش می‌یابد. حضور محصولات خوردگی سبب ایجاد اعوجاج در ساختار ماده می‌گردد. پدیده فوق ناشی از اختلاف اندازه ذرات فاز مادر و محصولات خوردگی است. با کاهش چگالی در فوم‌ها، پراکندگی توزیع محصولات خوردگی افزایش یافته و تنش کمتری در ساختار ایجاد می‌نمایند.

مطابق با شکل ۵، با در نظر گرفتن تغییرات نسبی نمونه GG(V)(S)

همراه با تغییرات ریزساختاری است. مقدار انرژی جذب شده، تابع جرم مؤثر و مقدار تخلخل می‌باشد. تخلخل‌ها و عیوب موجود در جسم با پراکندگی موج وارده سبب میرایی موج و در نتیجه میرایی ارتعاش می‌شوند. در ساختارهای متخلخل، با کاهش چگالی، هر چند میزان پراکندگی موج ناشی از حضور حفرات افزایش می‌یابد؛ اما کاهش جرم مؤثر و استحکام، بویژه در قطعات خام که سفتی ویژه اندکی دارند؛ سبب کاهش میرایی ارتعاش و انرژی جذب شده می‌گردد. علاوه بر امواج مکانیکی، محیط خورنده الکتروشیمیایی نیز سبب تغییر در ریزساختار نمونه می‌شود. میزان تغییرات در این حالت، تابع میزان

که اشاره گردید؛ در نمونه‌هایی که ابتدا تحت ارتعاش و سپس تحت خوردگی قرار گرفتند؛ نتایجی مشابه با نمونه‌های  $GG(V)$  نسبت به نمونه اولیه مشاهده گردید. شایان ذکر است در حالت بیشینه فشار اعمالی (۳۵۰ MPa)، مقدار محصولات خوردگی و نرخ خوردگی بدلیل کاهش حجم تخلخل‌ها کم می‌باشد؛ لذا مقدار انرژی جذب شده ناشی از تغییرات ریزساختار کم است. همچنین در شرایطی که میزان تخلخل بیشینه است، مقدار جرم مؤثر ناچیز بوده، و در نتیجه جرم محصولات خوردگی کاهش می‌یابد. در این حالت به دلیل توزیع گسترده محصولات خوردگی داخل حجم بزرگی از تخلخل‌ها، اعوجاج شبکه کاهش یافته و در نتیجه تغییرات ریزساختاری نیز ناچیز می‌باشد. لذا انتظار می‌رود در این شرایط مقدار بهینه‌ای از چگالی، همراه با بیشینه مقدار تغییرات ریزساختاری باشد.

مقایسه شکل‌های ۶ و ۵، حاکی از آن است که، میزان تغییرات ریزساختاری در نمونه‌هایی که تحت ارتعاش هستند و در ادامه تحت محیط خورنده قرار می‌گیرند؛ بسیار بیشتر از نمونه‌هایی است که در ابتدا در تماس با محیط اسیدی هستند. لذا فرآیند ارتعاش در مقایسه با فرآیند خوردگی، تغییرات ریزساختاری بیشتری ایجاد می‌نماید. دلیل این امر می‌تواند قفل شدن حفرات توسط محصولات خوردگی و عدم تغییر در جهت‌گیری آن‌ها به‌ازای تنش‌های اندک ناشی از اعوجاج محصولات فوق باشد.

در شکل ۶، در نمونه‌های  $GG(S)(V)$ ، نسبت به نمونه‌های خام، میزان تغییرات در نمونه  $GG(V)(S)$  از دو نمونه دیگر بالاتر است. شایان ذکر است که به دلیل اعمال محیط خورنده در ابتدای فرآیند، محصولات خوردگی در تمامی نمونه‌ها ایجاد می‌شود. محصولات فوق سبب قفل شدن حفرات و پر شدن آنها می‌گردند. لذا توزیع احتمال وجود تخلخل باز که قابلیت پراکندگی موج ارتعاشی و تغییر جهت ریزساختاری را داشته باشد؛ در نمونه‌ای با چگالی بیشتر، کاهش می‌یابد. مقایسه تغییرات ریزساختاری در نمونه‌های  $GG(S)(V)$  نسبت به  $GG(S)$ ، حاکی از آن است که بیشترین میزان تغییرات به ازای بهینه مقدار تخلخل مشاهده می‌شود. دلیل این پدیده برهمکنش سه مکانیزم است. حضور تخلخل‌ها و جذب انرژی ارتعاش توسط آنها، وجود محصولات خوردگی و قفل کردن حفرات و بستن برخی از تخلخل‌ها و مقدار فاز مادر مؤثر بهینه سبب گردیده که بیشینه جذب انرژی ارتعاشی در فوم خورده شده  $GG(V)(S)$  تحت ارتعاش

نسبت به نمونه خام، روند تغییرات با افزایش میزان پرس صعودی می‌باشد. در توجیه این روند می‌توان گفت در نمونه  $GG(V)(S)$  چون میزان جرم مؤثر پایین است؛ فضا برای انجام فرآیند خوردگی بالا است. و در مقابل، احتمال این مسئله وجود دارد که جرم محصولات خوردگی در این نمونه بالا رود. ذرات خورده شده هم‌چون قفل عمل کرده و مانع از تغییرات جهت‌گیری تخلخل گردند. در نمونه  $GG(V)(S)$ ، عکس نمونه  $GG(V)(S)$ ، حجم تخلخل کمینه است؛ فضا برای انجام فرآیند خوردگی کم است؛ بنا بر مقالات و نتایج مرور شده؛ با کاهش تخلخل نرخ خوردگی نیز کاهش می‌یابد. ولی قطعاً فرآیند الکتروشیمیایی صورت می‌پذیرد و محصولات خوردگی تشکیل می‌شوند. این مواد به دلیل اختلاف در اندازه با ذرات چدن خاکستری، در درون ماده ایجاد تنش می‌کنند که سبب تغییرات جهت‌گیری فاز متخلخل می‌گردد. در این بین نمونه  $GG(V)(S)$  که دارای جرم مؤثر و میزان تخلخل میانی بین دو نمونه فوق است؛ دارای متوسط تغییرات می‌باشد.

جهت بررسی نقش ارتعاش قبل از قرارگیری نمونه در محیط خورنده، میزان تغییرات جهت‌گیری فاز متخلخل در حالت  $GG(V)(S)$  نسبت به مرحله قبل آن یعنی  $GG(V)$  بررسی می‌شود. شایان ذکر است جهت تعیین نقش ارتعاش بر تغییرات ریزساختاری در ابتدا بایستی رفتار نمونه مرتعش شده نسبت به نمونه خام اولیه سنجید شود. مطابق با شکل ۵،  $GG(V)(S)$  دارای بیشترین مقدار تغییرات متوسط جهت‌گیری نسبت به  $GG(V)$  است. در فرآیند اولیه نیز، بیشینه مقدار تغییرات در نمونه  $GG(V)$  نسبت به نمونه اولیه مشاهده می‌شود. در تشریح پدیده فوق مطالعات نشان می‌دهد که، با افزایش میزان تخلخل‌ها که به‌عنوان جاذب نیرو عمل می‌کنند؛ مقدار تغییرات ریزساختاری نیز افزایش می‌یابد. اما از سویی دیگر نباید نقش جرم مؤثر در جذب انرژی و میزان آن در نمونه‌ها نادیده گرفته شود. شایان ذکر است که با توجه به خام بودن نمونه‌ها و پایین بودن استحکام نمونه‌های خام نسبت به نمونه‌های تفجوشی شده، با کاهش جرم مؤثر بهینه، سفتی افت پیدا کرده و تخلخل‌ها فرو می‌ریزند. به عبارت دیگر همانگونه که رابطه بین میزان تخلخل و جذب انرژی ناشی از پراکندگی موج صعودی است؛ تابعیت جذب انرژی از جرم مؤثر نیز صعودی می‌باشد. لذا به‌ازای مقداری بهینه از تخلخل، بیشینه مقدار انرژی جذب شده حاصل می‌شود. همانگونه

درصد حجمی فاز متخلخل هستند. با افزایش چگالی، انرژی جذب شده توسط فاز متخلخل ناشی از پراکندگی امواج، کاهش و فضای لازم جهت تماس محلول خورنده و نرخ خوردگی نیز کاهش می‌یابد. در حالی که، جرم موثر و توزیع تنش ناشی از حضور محصولات خوردگی افزایش می‌یابد. میزان محصولات خوردگی که خود سبب بستن حفرات و یا قفل شدن آنها می‌گردند نیز وابسته به مقدار جرم موثر و درصد فاز متخلخل است. نتایج شکل ۷ حاکی از آن است که، نمونه تولید شده با فشار ۲۵۰ MPa، با دارا بودن فاکتورها و عوامل ذکر شده به میزان بهینه، دارای بالاترین توانایی جذب انرژی و در نتیجه بیشترین میزان تغییرات متوسط جهت‌گیری فاز متخلخل است.

به‌طور کلی، ترکیبی از تخلخل و فاز مادر، و طراحی بهینه قطعه با استفاده از درصد تخلخل مناسب، می‌تواند ساختاری مهندسی شده و نزدیک به اهداف طراحی را دارا باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به‌ترتیب آزمایش‌های انجام شده و مشاهدات و تحلیل‌ها عبارت است از:

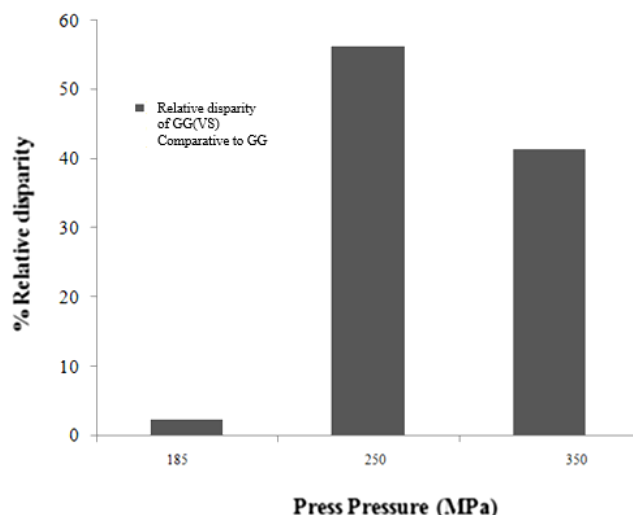
۱- قطعات تولید شده از براده‌های بدون خردایش مکانیکی، جریان‌پذیری و استحکام فشاری خوب و قابلیت پرس بالایی از خود نشان داده‌اند.

۲- بنا بر انتظار، با افزایش فشار پرس، میزان تخلخل کاهش یافته است که این نتیجه برای پودرهایی با هندسه کشیده و اندازه‌هایی تقریباً بزرگ که مورد استفاده در این پژوهش بوده است؛ یکسان است.

۳- انرژی جذب شده ناشی از قرارگیری نمونه‌های متخلخل خام تحت ارتعاش و محیط خورنده، سبب بروز تغییرات ریزساختاری می‌گردد. میزان تغییرات فوق بر مبنای تغییر جهت‌گیری فاز متخلخل با استفاده از نرم‌افزار کلمکس محاسبه گردیده است.

۴- بیشترین میزان تغییرات ریزساختاری در اثر هم‌زمانی دو فرآیند ارتعاش و خوردگی رخ می‌دهد.

۵- اگر دو فرآیند مخرب به‌صورت متوالی روی نمونه اثر بگذارند؛ فرآیند خوردگی با کمترین میزان اثرگذاری بر ریزساختار کنترل‌کننده فرآیند است. در این حالت تغییرات ریزساختار وابسته به توالی قرارگیری نمونه در محیط‌های مخرب می‌باشد.



شکل ۷: درصد تغییرات نسبی جهت‌گیری فاز متخلخل نسبت به قطعه خام بعد از آزمون هم‌زمان خوردگی و ارتعاش

Fig. 7. %Relative changes of porous phase orientation compared to green material in vibrated and corrosive atmosphere (VS)

نسبت به شرایط GG(S) رخ دهد. در مقایسه نمونه خورده شده و نمونه خام اولیه مشاهده گردید که نمونه GG(250) دارای بیشینه مقدار تأثیر خوردگی بر تغییرات ریزساختاری است. هرچند نرخ خوردگی در نمونه‌ای با چگالی کمینه، بایستی بسیار چشمگیر باشد، اما کاهش شدید ماده مؤثر و در نتیجه کاهش محصولات خوردگی و افزایش فضا جهت قرارگیری محصولات فوق، سبب کاهش اعوجاج در شبکه و در نتیجه کاهش تغییرات ریزساختاری می‌گردد. لذا در این حالت نیز مقدار بهینه‌ای از ماده مؤثر جهت مشاهده بیشینه تغییر در جهت‌گیری فاز متخلخل لازم می‌باشد.

در شکل ۷، دو فرآیند مخرب ارتعاش و خوردگی به‌صورت هم‌زمان بر روی قرص‌های چدنی خام اعمال شده است. مقایسه میزان تغییرات ریزساختاری در فرآیندهای مخرب متوالی (شکل‌های ۵ و ۶) نسبت به فرآیند مخرب هم‌زمان (شکل ۷)، حاکی از آن است که، بیشترین تغییرات ریزساختاری در اثر حضور موازی ارتعاش و خوردگی رخ می‌دهد. پدیده فوق نشان‌دهنده نقش هم‌پوشانی دو عامل مخرب در تشدید تغییر و تخریب ریزساختار است. چنانچه مطالعات صنعتی نیز گویای اهمیت هم‌زمانی فرآیندهای مخرب نسبت به شرایط متوالی می‌باشد.

مطابق با نتایج شکل ۷، بیشینه میزان تغییرات در نمونه‌ای با چگالی متوسط مشاهده گردید. در این حالت پنج عامل به‌صورت هم‌زمان بر روی تغییرات ریزساختاری مؤثرند که همگی تابعی از

- [11] I. Ritchie, Z.-L. Pan, High-damping metals and alloys, *Metallurgical Transactions A*, 22(3) (1991) 607-616.
- [12] R. De Batist, High damping materials: mechanisms and applications, *Le Journal de Physique Colloques*, 44(C9) (1983) C9-39-C39-50.
- [13] A. Kandeil, M. Mourad, Effect of surface texture on corrosion behaviour of steel, *Surface and Coatings Technology*, 37(2) (1989) 237-250.
- [14] S. Nakahara, Microporosity induced by nucleation and growth processes in crystalline and non-crystalline films, *Thin Solid Films*, 45(3) (1977) 421-432.
- [15] T. Remmerswaal, The influence of microstructure on the corrosion behaviour of ferritic-martensitic steel, master thesis, Delft University of Technology, Delft, 2015.
- [16] L. da Silva, H. Costa, Tribological behavior of gray cast iron textured by maskless electrochemical texturing, *Wear*, 376 (2017) 1601-1610.
- [17] A. Dawood, S. Nazirudeen, New method for the development of porous gray cast iron castings, *International Journal of Metalcasting*, 3(2) (2009) 43-53.
- [18] H. Abdollahi, R.A. Mahdavinjad, V. Zal, M. Ghambari, Optimization of mechanical properties of iron-based recycled powder metallurgy parts and investigation of these properties by transverse rupture test, (2015).
- [19] H. Abdollahi, R. Panahi Leavoli, R. Ali Mahdavinjad, V. Zal, Investigation of machinability of green and sintered iron-jet milled cast iron powder metallurgy parts, *Modares Mechanical Engineering*, 14(11) (2015).
- [20] C.E. da Costa, W.C. Zapata, M.L. Parucker, Characterization of casting iron powder from recycled swarf, *Journal of materials processing technology*, 143 (2003) 138-143.
- [21] J.-C. Hung, Y.-C. Tsai, C. Hung, Frictional effect of ultrasonic-vibration on upsetting, *Ultrasonics*, 46(3) (2007) 277-284.
- [22] R. Venegas, C. Boutin, O. Umnova, Acoustics of
- [1] J. Banhart, Light-Metal Foams—History of Innovation and Technological Challenges, *Advanced Engineering Materials*, 15(3) (2013) 82-111.
- [2] R.M. German, Powder metallurgy and particulate materials processing: the processes, materials, products, properties, and applications, Metal powder industries federation Princeton, 2005.
- [3] Y. Atalla, R. Panneton, Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements, *Canadian Acoustics*, 33(1) (2005) 11-24.
- [4] O. Doutres, Y. Salissou, N. Atalla, R. Panneton, Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube, *Applied Acoustics*, 71(6) (2010) 506-509.
- [5] H. Meng, Q. Ao, H. Tang, F. Xin, T. Lu, Dynamic flow resistivity based model for sound absorption of multi-layer sintered fibrous metals, *Science China Technological Sciences*, 57(11) (2014) 2096-2105.
- [6] M.A. Biot, Theory of deformation of a porous viscoelastic anisotropic solid, *Journal of Applied Physics*, 27(5) (1956) 459-467.
- [7] R. Goodall, Porous metals: Foams and sponges, in: *Advances in Powder Metallurgy*, Elsevier, 2013, pp. 273-307.
- [8] A. Katayose, R. Yokose, K. Obata, T. Makuta, New fabrication method and properties of porous metals produced by ultrasonic control of microbubble size, *Microsystem Technologies*, 24(1) (2018) 709-713.
- [9] M.A. Atwater, L.N. Guevara, K.A. Darling, M.A. Tschopp, Solid State Porous Metal Production: A Review of the Capabilities, Characteristics, and Challenges, *Advanced Engineering Materials*, (2018) 1700766.
- [10] J. Zhang, R. Perez, E. Lavernia, Documentation of damping capacity of metallic, ceramic and metal-matrix composite materials, *Journal of Materials Science*, 28(9) (1993) 2395-2404.

- [32] J. Švarc, T. Binar, P. Dostál, M. Černý, J. Tippner, The Influence of Corrosion Attack on Grey Cast Iron Brittle-Fracture Behaviour and Its Impact on the Material Life Cycle, *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(4) (2017) 1295-1301.
- [33] R. Yue, Q. Zhang, Changes in Pore Structures of Porous Beds When Subjected to Vertical Vibration, *KONA Powder and Particle Journal*, 34 (2017) 224-233.
- [34] A. Beltzer, The influence of porosity on vibrations of elastic solids, *Journal of Sound and Vibration*, 63(4) (1979) 491-498.
- [35] X. Wang, Porous metal absorbers for underwater sound, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(5) (2007) 2626-2635.
- [36] Z. Abdullah, A. Ismail, S. Ahmad, The Influence of Porosity on Corrosion Attack of Austenitic Stainless Steel, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2017, pp. 012013.
- [37] E. Aghion, Y. Perez, Effects of porosity on corrosion resistance of Mg alloy foam produced by powder metallurgy technology, *Materials Characterization*, 96 (2014) 78-83.
- [38] Y.-H. Li, G.-B. Rao, L.-J. Rong, Y.-Y. Li, The influence of porosity on corrosion characteristics of porous NiTi alloy in simulated body fluid, *Materials Letters*, 57(2) (2002) 448-451.
- [39] W.-q. Zou, Z.-g. Zhang, H. Yang, W. Li, Effect of vibration frequency on microstructure and performance of high chromium cast iron prepared by lost foam casting, *China Foundry*, 13(4) (2016) 248-255.
- [40] W. Jiang, X. Chen, B. Wang, Z. Fan, H. Wu, Effects of vibration frequency on microstructure, mechanical properties, and fracture behavior of A356 aluminum alloy obtained by expendable pattern shell casting, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4) (2016) 167-175.
- [41] L. Qingmei, Z. Yong, S. Yaoling, Q. Feipeng, Z. multiscale sorptive porous materials, *Physics of Fluids*, 29(8) (2017) 082006.
- [23] Z. Liu, M. Fard, J.L. Davy, Acoustic properties of the porous material in a car cabin model, in: *Proc 23rd International Congress on Sound and Vibration*, 2016, pp. 10-14.
- [24] M.I. Ab Kadir, M.S. Mustapa, N.A. Latif, A.S. Mahdi, Microstructural Analysis and Mechanical Properties of Direct Recycling Aluminium Chips AA6061/Al Powder Fabricated by Uniaxial Cold Compaction Technique, *Procedia Engineering*, 184 (2017) 687-694.
- [25] K. Mahmood, W.U.H. Syed, A.J. Pinkerton, Innovative reconsolidation of carbon steel machining swarf by laser metal deposition, *Optics and lasers in engineering*, 49(2) (2011) 240-247.
- [26] M.E. Shaibani, N. Eshraghi, M. Ghambari, Sintering of grey cast iron powder recycled via jet milling, *Materials & Design*, 47 (2013) 174-178.
- [27] E. Androsik, G. Dubrovskaya, I. Kundikov, I. Potapnev, Optimum conditions for the liquid-phase sintering of parts from ground cast-iron swarf and iron powder, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 14(5) (1975) 383-386.
- [28] J.K. Sinha, Significance of vibration diagnosis of rotating machines during installation and commissioning: a summary of few cases, *Noise & Vibration Worldwide*, 37(5) (2006) 17-27.
- [29] J.W.a. Sons, THE CORROSIVE BEHAVIOR OF NON-FERROUS METALS IN SEA WATER, *American Society for Naval Engineering*, 73(2) (1961) 187-394.
- [30] M. Ghambari, M.E. Shaibani, N. Eshraghi, Production of grey cast iron powder via target jet milling, *Powder Technology*, 221 (2012) 318-324.
- [31] B. Yan, W. Shi, C. Hua, J. Liu, D. Dong, J. Chen, Vibration damage mechanism analysis on rotor of diesel generating set with rigid coupling, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2015, pp. 012071.

- of Standards, 58(3) (1957) 157.
- [44] H. Jasim, Investigating the effect of vibration on corrosion rate of crude oil storage tanks, *Materials and Corrosion*, 67(9) (2016) 988-993.
- [45] J.O. Olawale, J.K. Odusote, A.B. Rabi, E.O. Ochapa, Evaluation of corrosion behaviour of grey cast iron and low alloy steel in cocoa liquor and well water, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1(2) (2013) 44-48.
- Qijie, Influence of ultrasonic vibration on mechanical properties and microstructure of 1Cr18Ni9Ti stainless steel, *Materials & design*, 28(6) (2007) 1949-1952.
- [42] K. Teh, C. Huang, The effects of fibre orientation on free vibrations of composite beams, *Journal of Sound and Vibration*, 69(2) (1980) 327-337.
- [43] T.H. Orem, Influence of crystallographic orientation on the corrosion rate of aluminum in acids and alkalies, *Journal of Research of the National Bureau*