

شبیه‌سازی عددی به روش المان محدود- المان گسسته فرآیند فشرده‌سازی سرد پودرهای فلزی

راحله خان محمدی^۱، امیر عبدالله^۲، وحید فرتاش‌وند^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: rah.khanmohammadi@aut.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: Fartashvand@aut.ac.ir

چکیده

با توجه به تعدد پارامترهای فشرده‌سازی پودرهای فلزی، برای پیش‌بینی رفتار سیستم و بهینه‌سازی کمیت‌های فرآیند، فشرده‌سازی پودر به روش‌های المان محدود و المان گسسته توسعه یافته‌اند. یک روش نوین مدل‌سازی، کاربرد ترکیبی روش‌های المان محدود و المان گسسته است تا بتوان از مزایای هر دو استفاده نمود. این امر سبب افزایش دقت شبیه‌سازی و نزدیکی به ماهیت فیزیکی فرآیند می‌شود. در این مقاله، رفتار پودرهای فلزی در حین فشرده‌سازی بصورت المان محدود-المان گسسته با استفاده از نرم افزار Abaqus مدل‌سازی شده است.

کلمات کلیدی: فشرده‌سازی سرد پودر، شبیه‌سازی المان محدود، شبیه‌سازی المان گسسته.

مقدمه

گونگونی با فرض‌های مختلف برای مواد متخلخل ارائه نموده‌اند. از جمله این تئوری‌ها، تئوری گارسون^۴ می‌باشد [۶]. در حال حاضر در نرم‌افزارهای المان محدودی همچون Abaqus برای شبیه‌سازی مواد متخلخل از همین تئوری استفاده می‌شود.

یکی دیگر از دیدگاه‌های پیوسته در مدل‌سازی فرآیند فشردن پودر از مکانیک خاک گرفته شده است که محققان مدل‌های گوناگونی از آن را از طریق آزمایش ارائه نموده‌اند. یکی از کاملترین آن‌ها مدل DPC [۷] می‌باشد. این مدل برای یک ماده الاستو-پلاستیک، عمدتاً از سه پارامتر معیارهای تسلیم، پتانسیل جریان و معیارهای سخت‌شوندگی تشکیل شده است. از معایب مدل DPC این است که پارامترهای الاستو-پلاستیک آن از طریق انجام آزمایش تعیین می‌شوند، همچنین مدل DPC قادر به بررسی میکروسکوپی تماس بین ذره‌ها نیست. مدل DPC در نرم‌افزار Abaqus تعریف شده است.

روش المان گسسته (DEM)

روش DEM برای مطالعه رفتار پودر در طول فشرده‌سازی توسط کندال^۵ و همکارش استفاده شد [۴]. در این روش هر ذره به صورت یک جسم صلب در نظر گرفته می‌شود و فعل و انفعال بین ذره‌ها تعیین‌کننده رفتار سینماتیک پودرهای بهم فشرده است. این مدل بر مبنای قانون تماسی است که ارتباط بین نیروی تماسی و جابجایی نسبی بین دو ذره در تماس را تشریح می‌کند. باید نیروهای داخلی و خارجی در تعادل با هم باشند. این روش فقط برای چگالی‌های نسبی کم کاربرد دارد.

روش ترکیبی المان محدود و المان گسسته (MPFEM)

روش MPFEM در سال ۲۰۰۵ به عنوان روش جایگزین DEM توسط پروکوپو^۶ و همکارش [۸] توسعه داده شد. در این روش هر ذره به صورت یک جسم تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته شده و مش زده می‌شود، در نتیجه می‌توان رفتار هر ذره را به صورت جداگانه در فشرده‌سازی‌هایی با چگالی نسبی بالا که در بردارنده تغییرشکل‌های بزرگ هستند، بررسی نمود. در واقع در روش MPFEM از مزایای هر دو روش المان محدود و المان گسسته استفاده شده و در نتیجه دقت شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. تنها

فرآیند متالورژی پودر از جمله روش‌های شکل‌دهی است که به طور گسترده برای تولید اقتصادی قطعات با اشکال پیچیده و نیز برای مواد سخت با نقطه ذوب بالا استفاده می‌گردد. معمولاً توزیع چگالی در قطعه خام فشرده شده در قالب یکنواخت نبوده و عدم یکنواختی توزیع چگالی در قطعه خام باعث غیریکنواختی خواص در سرتاسر قطعه می‌شود. از اینرو تخمین صحیح پارامترهای فرآیند بسیار ضروری می‌باشد. شبیه‌سازی ابزاری است که می‌تواند در این زمینه سودمند باشد. طی سال‌های اخیر، نقش مدل‌سازی و شبیه‌سازی در طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای فشرده‌سازی پررنگ‌تر شده و تا کنون روش‌های گوناگونی جهت شبیه‌سازی فرآیند متالورژی پودر ارائه شده است. در یک نگاه کلی می‌توان آن‌ها را به سه دسته روش المان محدود (FEM^۱)، روش المان گسسته (DEM^۲) و روش ترکیبی المان محدود و المان گسسته (MPFEM^۳) تقسیم نمود.

تا کنون مقاله‌های بسیاری در زمینه مدل‌سازی فرآیند فشردن پودر به روش المان محدود در کنفرانس‌های مرتبط ارائه شده است که مراجع [۱-۳] نمونه‌هایی از آن می‌باشد. در هر کدام از این مطالعات پودر به صورت یک جسم پیوسته در نظر گرفته شده و فرآیند فشردن مدل می‌شود. روش دیگر شبیه‌سازی فرآیند فشردن پودر، روش المان گسسته می‌باشد که در مقیاس ذره‌ای بوده و در آن برای هر ذره جرم و ممان اینرسی در نظر گرفته شده و رفتار هر ذره جداگانه بررسی می‌شود [۴]. تعدادی از محققین نیز با استفاده از روش سوم که ترکیبی از روش المان محدود و گسسته است، به شبیه‌سازی فرآیند فشردن پودر پرداخته‌اند. در این روش هر ذره به عنوان یک جسم تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته شده و مش زده می‌شود، سپس شبیه‌سازی انجام می‌شود [۵]. در این مقاله ابتدا به بررسی هر کدام از این روش‌ها و مزایا و معایب آن‌ها پرداخته و در نهایت فرآیند فشرده‌سازی سرد پودر به روش MPFEM مدل‌سازی می‌شود.

روش المان محدود (FEM)

در شبیه‌سازی المان محدود، اغلب توده پودر به صورت یک ماده پیوسته دارای تخلخل در نظر گرفته می‌شود. محققین تئوری‌های پلاستیسیته

⁴ Gurson
⁵ Cundall
⁶ Procopio

¹ Finite Element Method
² Discrete Element Method
³ Multi Particle Finite Element Method