

شبیه‌سازی سرندهای صنعتی دو طبقه بر پایه مدل‌سازی اجزای گسسته توسط نرم افزار PFC3D

زهرا فرجی^۱، اکبر فرزنانگان^{۲*}

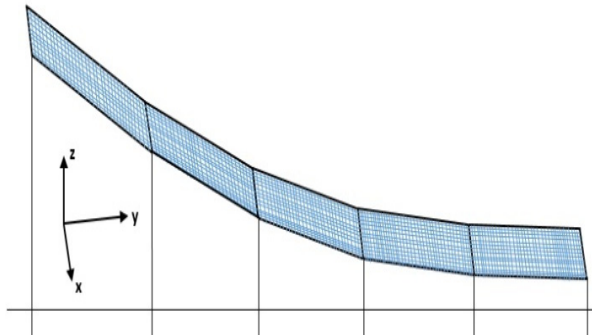
۱. گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۲. دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: دریافت: ۱۱ تیر ۹۵ دریافت پس از اصلاح: ۱۱ دی ۹۵ پذیرش نهایی: ۳۰ بهمن ۹۵	سرندهای ارتعاشی دو طبقه صنعتی موزی شکل برای جداسازی جامد از جامد بر اساس اندازه ذرات استفاده می‌شوند. روش اجزای گسسته نوعی رویکرد عددیست که برهم‌کنش‌های بین ذرات، بین ذرات و شبکه سرندها و حرکت آنها را می‌تواند محاسبه نماید. در این مقاله، نتایج شبیه‌سازی طبقه‌بندی ذرات در یک سرندها موزی شکل پنج صفحه‌ای با روش اجزای گسسته و در محیط نرم‌افزار PFC3D ارائه می‌شود. شبیه‌سازی‌های اجزای گسسته با هدف بررسی تأثیر شرایط عملیاتی و طراحی سرندها بر روی عملکرد طبقه‌بندی انجام شد. به منظور اعتبارسنجی، نتایج پیش‌بینی‌ها در این پژوهش با نتایج گزارش شده قبلی در منابع مقایسه شدند. میانگین خطای نسبی منحنی توزیع برای محصولات روسرندها، میانی و زیرسرندها به ترتیب ۳۸/۶، ۱۶/۹ و ۱۲/۸ درصد به دست آمد. با توجه به تطابق کلی روند منحنی‌های توزیع در مطالعه جدید و قبلی و میزان و منشاء خطای پیش‌بینی‌ها، صحت شبیه‌سازی در این پژوهش قابل قبول ارزیابی می‌شود.
کلمات کلیدی: مدل‌سازی شبیه‌سازی سرندها موزی شکل مدل‌سازی اجزای گسسته PFC3D	

* عهده دار مکاتبات
farzanegan@ut.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه



شکل (۱) طرح ساده‌ای از یک سرند موزی شکل پنج صفحه‌ای

در سال ۲۰۰۳ کمبل^۳ و پندیلا^۴ مطالعه‌ای را بر روی حرکت ذرات گسسته روی سرند با استفاده از روش اجزای گسسته انجام دادند که در آن نقش منفی ذرات با اندازه نزدیک به اندازه دهانه‌های سرند و نقش مثبت ذرات درشت دانه در خوراک بر کارایی سرند، که قبلاً توسط استندیش^۵ بیان شده بود، مورد تأیید قرار گرفت [۳]. در ادامه در سال ۲۰۰۶، سونگ^۶ و همکاران، الگوریتمی را برای برخورد ضربه‌ای ذرات قرصی شکل تشریح کردند [۴]. در سال ۲۰۰۹ استفاده از این روش برای شبیه‌سازی سرندها گسترش یافت و چن^۷ و تونگ^۸ یک شبیه‌سازی سه بعدی از فرآیند سرند کردن انجام دادند [۵]. فرناندز^۹ و همکاران از روش کوپل یک سویه هیدرودینامیک ذره هموار^{۱۰} برای شبیه‌سازی سرندهای موزی شکل صنعتی تر استفاده کردند [۶].

در ایران نیز در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای شبیه‌سازی فرآیندهای فرآوری مواد معدنی بر اساس روش اجزای گسسته انجام گرفته است. رفاهی و همکاران پژوهشی برای پیش‌بینی انرژی سنگ‌شکنی و تعیین شاخص باند با استفاده از پارامترهای مکانیکی سنگ انجام داده‌اند [۸،۷] و از نرم افزار PFC3D برای مدل‌سازی رفتار شکست سنگ در داخل یک سنگ شکن فکی استفاده کردند. آنها نشان دادند که روش اجزای گسسته می‌تواند انرژی خردایش ویژه یک ذره کروی و شاخص باند را به خوبی پیش‌بینی کند. آتشی با استفاده از روش اجزای گسسته و به کمک نرم‌افزار PFC3D به شبیه‌سازی حرکت بار در آسیای گلوله‌ای پرداخت و تاثیر

سرند کردن یکی از قدیمی‌ترین روشهای جدایش مواد و یک واحد عملیاتی مهم در کارخانه‌های فرآوری برای جدا کردن مواد بر طبق اندازه‌شان می‌باشد [۱]. یکی از انواع جدید سرندها، سرند موزی شکل^۱ است که این نوع سرند لرزان، از صفحاتی تشکیل شده است که شیب این صفحات با یکدیگر متفاوت است. در ابتدای آن، یعنی منطقه خوراک‌دهی شیب تندی دارد و در انتها، سرند مسطح می‌گردد که این طراحی برای دستیابی به ضخامت لایه یکسان در طول سرند می‌باشد که باعث افزایش ظرفیت سرند می‌شود. در شکل (۱) نمایی از یک سرند موزی شکل پنج صفحه‌ای نشان داده شده است. به طور کلی چگونگی کنترل و بهینه‌سازی عملکرد سرندها و بویژه این نوع سرندها یک هدف مهم در کارخانه‌های فرآوریست که نیازمند دانسته‌های اساسی و بنیادی در مورد فرآیند سرند کردن می‌باشد [۲].

بیشتر مدل‌های ریاضی فرآیند سرند کردن مدل‌های پدیده‌شناختی می‌باشند. این نوع مدل‌ها صرفاً حاصل از اصول نظری فیزیکی نمی‌باشند و به دلیل نبود شناخت کافی از فرآیند سرند کردن برخی از پارامترهای مورد استفاده در این نوع مدل‌ها به صورت تجربی می‌باید تعیین شوند. این عدم درک کامل نیز مربوط به پیچیدگی توزیع اندازه ذرات و تأثیر مهم حرکت ذرات تحت عوامل عملیاتی مختلف است. برخی از مدل‌های ساده که پیشنهاد شده‌اند پیرو نظریه‌های سینتیک واکنش و احتمال می‌باشند، مانند سینتیک مرتبه اول که نظریه شناخته شده‌ای است که تغییرات در وزن (W) تهریز سرند (زیرسرندی) و سرریز سرند (روسرندی) را به عنوان تابعی از زمان بیان می‌کند که k ثابت نرخ سرند کردن است:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -kW \quad (1)$$

در عمل، رفتار ذرات در یک سیستم بستگی به نتیجه کنش و برهم کنش ذرات و ذرات و دیواره‌ها دارد. بنابراین باید پدیده سرند کردن را در مقیاس ذره‌ای بشناسیم [۲]. از آنجا که شناخت و تعیین رفتار ذرات در مقیاس میکروسکوپی با روش‌های آزمایشگاهی بسیار دشوار می‌باشد، شبیه‌سازی عددی به روش اجزای گسسته^۲، یک روش مؤثر برای انجام چنین مطالعاتی می‌باشد. مطالعات مختلفی در مورد سرندها با استفاده از این روش صورت گرفته است.

³ Campbell

⁴ Pandiella

⁵ Standish

⁶ Song

⁷ Chen

⁸ Tong

⁹ Fernandez

¹⁰ Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

¹ Banana screen

² Discrete Element Method (DEM)

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{ij}^n + F_{ij}^s) + m_i g \quad (2)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (R_{ij} \times F_{ij}^s - \mu_r R_i |F_{ij}^n| \hat{\omega}_i) \quad (3)$$

که در آن v_i : سرعت انتقالی، ω_i : سرعت زاویه‌ای، I_i : ممان اینرسی ذره i ، g : شتاب جاذبه، R_{ij} : بردار از مرکز ذره i تا نقطه برخورد با ذره j ، F_{ij}^n : نیروی قائم برخورد و F_{ij}^s : نیروی مماسی برخورد هستند. نیروهای قائم و مماسی از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$F_{ij}^n = \left[\frac{2}{3} E \sqrt{R} \xi_n^{\frac{2}{3}} - \gamma_n E \sqrt{R} \sqrt{\xi_n} (v_{ij} \cdot \hat{n}_{ij}) \right] \hat{n}_{ij} \quad (4)$$

$$F_s = \mu_s |F_n| \left[1 - (1 - \min(\xi_s, \xi_{s,max}) / \xi_{s,max})^{\frac{3}{2}} \right] \hat{n}_{ij} \quad (5)$$

$$\bar{R} = R_i R_j / (R_i + R_j) \quad (6)$$

$$\xi_{s,max} = \mu_s [(2 - \bar{\sigma}) / 2 (1 - \bar{\sigma})] \xi_n \quad (7)$$

$$\hat{n}_{ij} = (R_i - R_j) / |R_i - R_j| \quad (8)$$

$$E = Y / (1 - \bar{\sigma}^2) \quad (9)$$

که در آن R_i و R_j شعاع ذرات i و j [۱]، Y : مدول یانگ، $\bar{\sigma}$: نسبت پواسون، γ_n : ضریب میرایی ساده، μ_s : ضریب اصطکاک غلطشی و ξ_s : جابجایی کلی مماسی است. μ_r : ضریب اصطکاک غلطشی است [۲]. برهم‌کنش ذرات و دیواره‌ها بر طبق معادلات بالا محاسبه می‌شوند و ذرات خشک در نظر گرفته می‌شوند [۲].

۳- مواد و روش‌ها

در این پروژه برای انجام شبیه‌سازی‌ها از بسته نرم‌افزاری PFC3D^{۱۳} نسخه ۳ (۱۹۹۸) که در دسترس می‌باشد، استفاده شد [۱۵]. در اولین مرحله از شبیه‌سازی، لازمست تا سطوح (طبقات) سرنده طراحی و به همراه ذرات خوراک در محیط نرم‌افزار ساخته شود. مشخصات سرنده واقعی و قسمت‌های مختلف تشکیل دهنده آن، با توجه به اطلاعات داده شده در منبع [۱۶] در نظر گرفته شد. این سرنده موزی شکل بوده و شامل دو طبقه سرنده می‌باشد. بر اساس مشخصات داده شده، سرنده مجازی در محیط نرم‌افزار PFC3D ساخته شد که با توجه به محورهای مختصات x ، y و z در شکل (۱) در فضای سه بعدی نشان داده شده است. همانطور که بیان شد، این نوع سرنده از صفحات متصل به هم تشکیل شده است که شیب صفحات از ابتدا تا انتهای سرنده کاهش می‌یابد. تصویر سطح بالایی سرنده مجازی (طبقه اول) در شکل (۳) و سطح پایینی سرنده مجازی (طبقه دوم) در شکل (۴) دیده می‌شوند.

سرعت چرخش آسیا را بر میزان خردایش و شکل بار داخل آسیا بررسی نمود [۹]. اسحاقی به شبیه‌سازی عملیات سنگ‌شکنی و فرآیند سرنده کردن با چند طبقه سرنده آزمایشگاهی پرداخت و منحنی‌های توزیع اندازه ذره بدست آمده از روش اجزای گسسته را برای دو نوع سنگ گرانیتی و آهکی در دو حالت مکعبی و کروی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود [۱۰]. قاسمی و همکاران تاثیر گام زمانی بر دقت نتایج در شبیه‌سازی حرکت ذرات به روش اجزای گسسته را بررسی کردند [۱۱]. همچنین جهانی و همکاران شبیه‌سازی سرنده صنعتی دو طبقه پنج صفحه‌ای و آزمایشگاهی یک طبقه را در محیط نرم‌افزار متن باز LIGGGHTS انجام دادند [۱۲]. شبیه‌سازی اجزای گسسته سرندهای ارتعاشی موزی شکل یک طبقه سه صفحه‌ای در مقاله دیگری توسط نویسندگان مورد بررسی و بحث قرار گرفته است [۱۳]. در مقاله حاضر، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی سرندهای دو طبقه موزی شکل پنج صفحه‌ای به روش اجزای گسسته ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد. در این مقاله سعی شده است تا با توجه به اطلاعات در دسترس مطالعات قبلی، سرنده موزی شکل، شبیه‌سازی شود و تاثیر عوامل مختلف بر کارایی آن بررسی و نتایج اعتبارسنجی شود. اشاره می‌شود که روش اعتبارسنجی مورد استفاده متکی بر مقایسه منحنی‌های توزیع^{۱۱} (کارآیی) پیش‌بینی شده در این پژوهش با منحنی‌های توزیع گزارش شده در مطالعات قبلی می‌باشد. همچنین برای انجام محاسبات آماری خطای پیش‌بینی منحنی‌های توزیع برای اندازه‌های مختلف با توجه به اعتبارسنجی انجام گرفته توسط پژوهشگران در مطالعات قبلی فرض می‌شود که منحنی‌های توزیع گزارش شده توسط آنان «دقیق» می‌باشند.

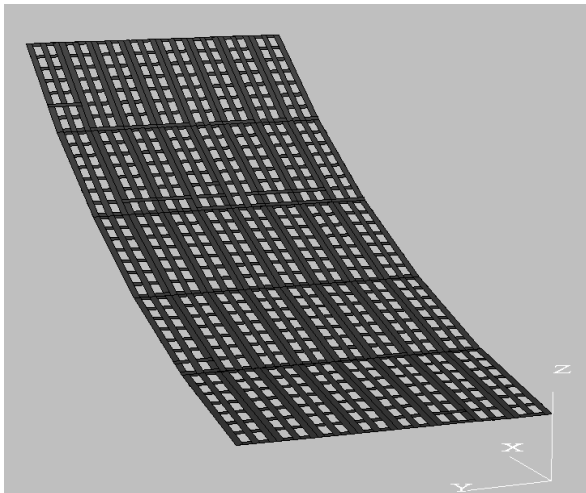
۲- مفاهیم نظری

روش اجزای گسسته در سال ۱۹۷۰ توسط کندانال^{۱۲}، برای حل مسایل مکانیک سنگی توسعه یافت [۱۴]. در این روش، برخورد‌های بین ذرات و برخورد‌های بین ذرات و دیواره‌ها که در اینجا دیواره، سطح سرنده می‌باشد، با استفاده از قانون نیروهای برخورد، مدل‌سازی می‌شوند. به عبارت دیگر یک طرح عددی ساده و واضح برای تعقیب حرکت ذرات و برهم‌کنش ذرات استفاده می‌شود. برای ذره i ، حرکت انتقالی و حرکت چرخشی با رابطه‌های زیر تعیین می‌شوند:

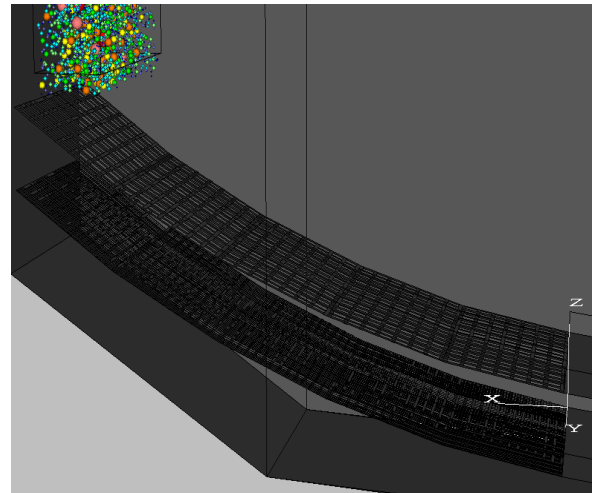
¹¹ Partition curve

¹² Cundall

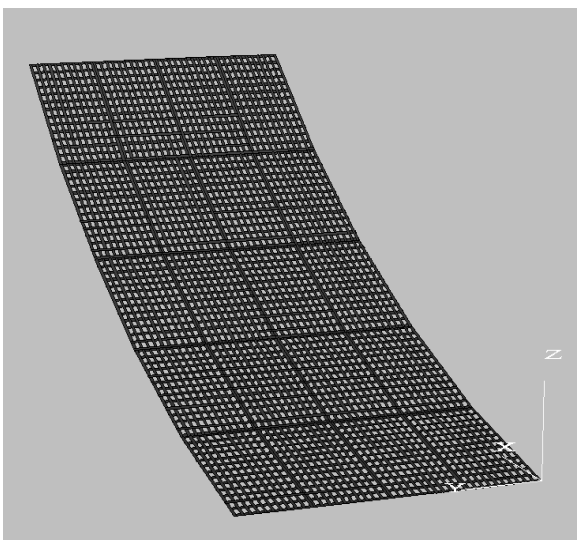
¹³ Particle Flow Code in Three Dimension



شکل (۲) سطح سرند طبقه بالایی دستگاه سرند مجازی موزی شکل شبیه‌سازی شده با روش اجزای گسسته



شکل (۱) تصویر سرند مجازی ساخته شده در محیط نرم‌افزار PFC3D



شکل (۳) سطح سرند طبقه پایینی دستگاه سرند مجازی موزی شکل شبیه‌سازی شده به روش اجزای گسسته

جدول (۱) پارامترهای عملیاتی و هندسی سرند [۱۶]

ویژگی	مشخصات
طول سرند (متر)	۶/۱
عرض سرند (متر)	۲/۱
تعداد طبقات سردی	۲
نوع سرند	موزی
شکل دهانه‌ها	مستطیل
اندازه دهانه سطح سردی بالایی (mm)	۷۰ در ۱۳۰
اندازه دهانه سطح سردی پایینی (mm)	۳۵ در ۶۵
بسامد ارتعاش (دور بر دقیقه)	۱۰۰۰
دامنه ارتعاش (میلی‌متر)	۵ تا ۱۴
نوع ارتعاش	خطی (۴۵ درجه نسبت به افق)
دبی جریان خوراک (تن بر ساعت)	۱۰۰۰

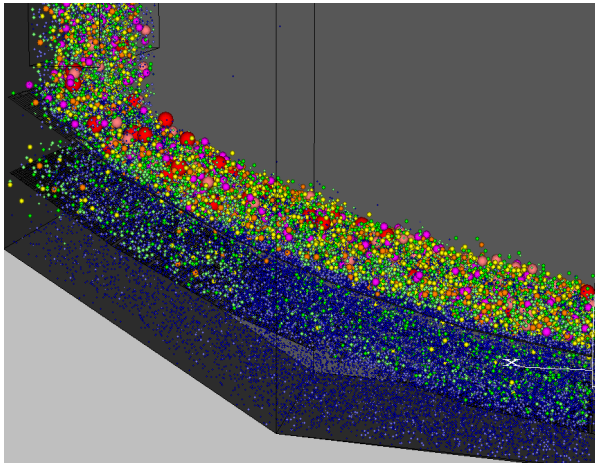
تفاوت اندازه دهانه‌ها در سطوح سرندهای طبقات بالایی و پایینی دستگاه سرند مجازی شکل به خوبی قابل مشاهده است. جزئیات هندسه سرند و شرایط عملیاتی مورد استفاده نیز در جدول (۱) آمده است [۱۶]:

تعداد سطوح سرند، از سطحی که خوراک وارد می‌شود تا انتهای سطحی که تخلیه صورت می‌گیرد، محاسبه می‌گردد که در اینجا سرند دارای پنج صفحه (قطعه) است [۲]. شکل (۵) گلوله‌های تعریف شده در شبیه‌سازی که نقش ذرات خوراک را ایفا می‌کنند به رنگهای مختلف نشان می‌دهد. بازه تغییرات اندازه ذرات خوراک از ۱۵ تا ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد که با رنگ قرمز (درشت‌ترین ذره) تا آبی تیره (ریزترین ذره) نمایش داده شده‌اند.

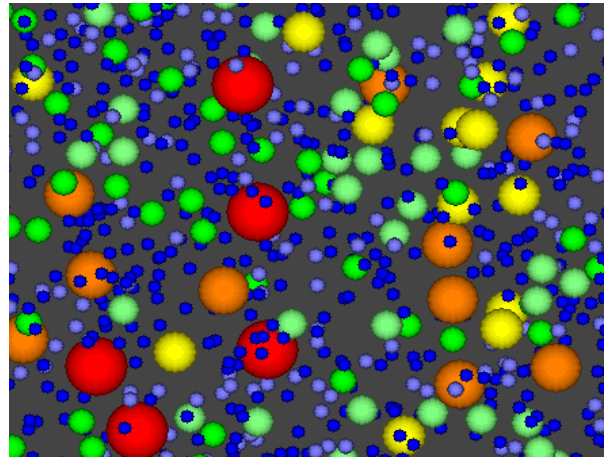
توزیع اندازه ذره خوراک ورودی به سرند در جدول (۲) نشان داده شده است. ذرات خوراک در میان یازده «فاصله» اندازه ذره» با حدود معین بالا و پایین توزیع شده‌اند و ذرات کوچکتر از ۱۵ میلی‌متر در خوراک وجود ندارند.

با آغاز شبیه‌سازی، مخلوطی از ذرات با اندازه‌های مختلف بطور پیوسته با یکدیگر برخورد کرده و روی سرند در حال نوسان ریخته می‌شوند که تعدادی از سطح سرند عبور می‌کنند و عده‌ای از انتهای سرند تخلیه می‌شوند [۲]. با توجه به شکل (۶)، می‌توان باقی ماندن ذرات درشت روی سطح سرند و عبور ذرات ریز را مشاهده نمود که بیشتر جدایش ذرات ریز در ابتدای سرند انجام می‌گردد.

برای تعیین چگونگی عملکرد سرند و تأثیر عوامل مختلف بر آن از منحنی توزیع استفاده می‌شود.



شکل (۵) جریان مواد شبیه‌سازی شده روی سرندها با شتاب نوسان ۱۴g



شکل (۴) نمایش ذرات خوراک در طبقات اندازه ذره مختلف با کددهی بر پایه رنگ

جدول (۲) توزیع اندازه ذره خوراک [۶]

ترکیب در خوراک (درصد)	فاصله اندازه ذره (میلیمتر)	طبقه
۵	۲۰۰- تا ۱۴۰+	۱
۵	۱۴۰- تا ۱۰۰+	۲
۱۰	۱۰۰- تا ۷۰+	۳
۱۰	۷۰- تا ۶۰+	۴
۱۰	۶۰- تا ۴۹+	۵
۱۰	۴۹- تا ۴۲+	۶
۱۰	۴۲- تا ۳۵+	۷
۱۰	۳۵- تا ۲۸+	۸
۱۰	۲۸- تا ۲۲+	۹
۱۰	۲۲- تا ۱۸+	۱۰
۱۰	۱۸- تا ۱۵+	۱۱

می‌گیرند. یک روند کاهشی در ذرات ریز آبی رنگ، در طول طبقه سردی بالایی دیده می‌شود. در ابتدای طبقه سردی بالایی، ترکیب شیب زیاد صفحه و نوسان سرد باعث افزایش سرعت ذرات می‌شود. با کاهش شیب در صفحات بعدی، سرعت ذرات کاهش می‌یابد و آنها فرصت بیشتری برای عبور از دهانه‌ها را دارند؛ پس در این منطقه، لایه‌بندی و جدایش بهتری مشاهده می‌شود. ذرات عبور کرده از طبقه سردی بالایی، مانند جریان بارشی روی سطح طبقه سردی پایینی می‌ریزند که بیشتر ریزش مواد از صفحات میانی و انتهایی طبقه سردی بالاییست. به همین دلیل، جریان از میان صفحات اولی سرد پایینی نیز ضعیف است. جریان ریزدانه شامل ذرات آبی تیره و روشن است. چون در قسمت درشت دانه سرد بالایی و جریان میانی هنوز ذرات آبی (ریزدانه) وجود دارند، پس جدایش از حالت بهینه پایین‌تر است.

در این مقاله، منحنی توزیع بر پایه درصد جرم بازیابی شده ذرات خوراک با اندازه معین به جریان‌های «درشت‌دانه سرد»^{۱۴} یا روسرندی سرد طبقه اول، میانی یا روسرندی سرد طبقه دوم و «ریزدانه سرد»^{۱۵} یا زیرسردی سرد طبقه دوم محاسبه شده است. محاسبات آماری و خطای منحنی‌های توزیع با استفاده از ابزار تحلیل آماری صفحه گسترده Excel انجام شده است.

۴- ارایه یافته‌ها و بحث

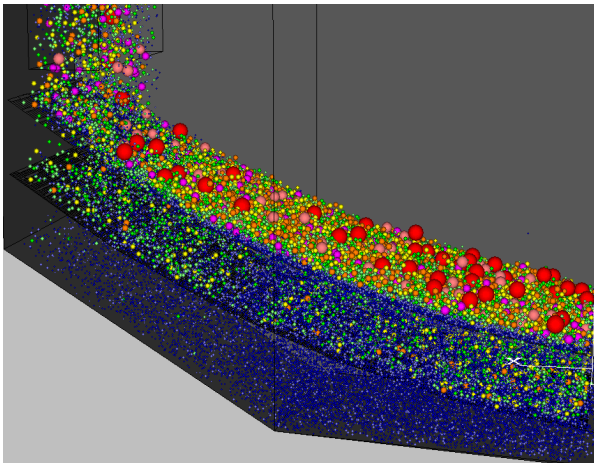
سرد صنعتی موزی شکل، سردی می‌باشد که با بسامد بالا جدایش را انجام می‌دهد. ارتعاش سرد متناسب با دامنه و بسامد نوسانات می‌باشد. با ثابت بودن بسامد بالای نوسان سرد، می‌توان با تغییر دامنه نوسان، ارتعاش سرد را که معمولاً ضربی از شتاب جاذبه می‌باشد، تنظیم نمود. در این مرحله، شبیه‌سازی‌ها برای ارتعاش سرد با شتاب ۱۴g و ۶g صورت گرفته است.

۴-۱- جریان ذرات شبیه‌سازی شده روی سرد با شتاب نوسان ۱۴g

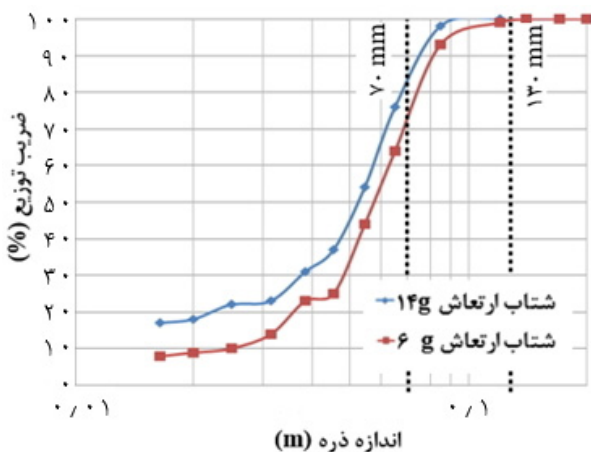
در این حالت، به دلیل ثابت بودن بسامد ارتعاش، برای داشتن ارتعاشی به شدت ۱۴g، دامنه نوسانات حدود ۱۳ میلی‌متر می‌باشد. شکل (۶) جریان ذرات بر روی سرد را با شتاب بیشینه ۱۴g نشان می‌دهد که ذرات درشت با رنگ قرمز، ذرات متوسط با رنگ سبز و ذرات ریز با رنگ آبی نشان داده شده‌اند. طبقه‌بندی توسط نفوذ ذرات ریز ایجاد می‌شود که ذرات ریز آبی رنگ در ته لایه و ذرات درشت روی آنها قرار

¹⁴ Screen overflow (oversize)

¹⁵ Screen underflow (undersize)



شکل (۶) جریان مواد شبیه‌سازی شده روی سرندها با شتاب نوسان ۶g



شکل (۷) منحنی کارایی جدایش طبقه سرندها بالایی برای شتابهای ارتعاش ۶g و ۱۴g

همانطور که در نمودار شکل (۸) مشاهده می‌شود، در هر دو حالت، تمام ذرات بزرگتر از ۱۳۰ میلی‌متر روی طبقه سرندها بالایی باقی مانده‌اند. چون اندازه این ذرات از اندازه دهانه‌های سرندها (۱۳۰ میلی‌متر در ۷۰ میلی‌متر) بزرگتر است و وارد جریان درشت دانه می‌شوند. در ابتدای منحنی، برای ذرات ۱۵ میلی‌متر تا حدود ۳۰ میلی‌متر، کمترین درصد مواد باقیمانده دیده شد، یعنی بیشترین درصد عبوری و انتقال به طبقه سرندها پایینی، در این ناحیه است. البته اگر شتاب ارتعاش کم باشد، مقادیر کمتری از ذرات ریز روی سرندها باقی می‌ماند و اگر شتاب ارتعاش زیاد باشد (در حدود ۱۴g)، ذرات به دلیل شدت ارتعاش زیاد فرصت کافی برای عبور نداشته‌اند و مقادیر بیشتری از ذرات روی سرندها باقیمانده‌اند، در صورتی که باید به طبقه سرندها پایینی انتقال می‌یافتند. در بقیه نقاط، منحنی کارایی جدایش در محدوده ذرات ۳۵ تا ۱۴۰ میلی‌متر تغییر می‌کند. باز در این مناطق نیز منحنی با شتاب

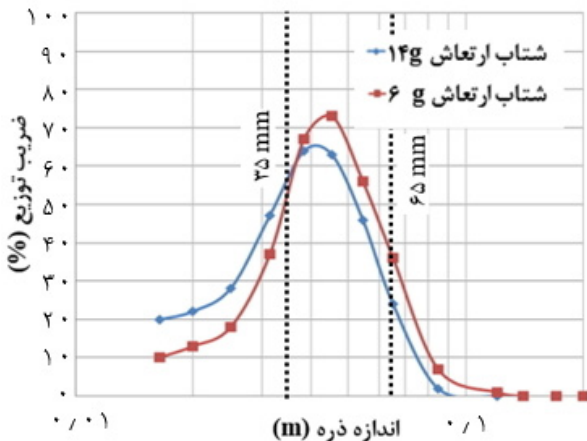
۴-۲- جریان ذرات شبیه‌سازی شده روی سرندها با شتاب نوسان ۶g

برای شتاب ارتعاش ۶g، دامنه نوسانات ۵ میلی‌متر است. شکل (۷) جریان مواد بر روی سرندها با شتاب بیشینه ۶g نشان می‌دهد. همانند مورد قبل، ذرات با اندازه درشت تا ریز (مطابق خوراک) با رنگ قرمز، سبز تا آبی نمایش داده شده‌اند. با نگاهی به طبقه سرندها بالایی متوجه می‌شویم که ذرات آبی رنگ در صفحات اول تا سوم کاهش می‌یابند و مقدار خیلی کم به صفحات انتهایی می‌رسند. این رفتار به دلیل کاهش شدت ارتعاشات است که به ذرات توانایی و فرصت بیشتری برای جابجا شدن و رسیدن به سطح سرندها و عبور از آن را می‌دهد. این بهبود جدایش، حتی در صفحات اولیه سرندها، جایی که شیب صفحات زیاد است نیز قابل ملاحظه می‌باشد و باعث انتقال جریان خوبی از این صفحات بر روی طبقه سرندها پایینی شده است. در انتهای طبقه سرندها بالایی نیز، می‌توان باقی ماندن ذرات دانه درشت (قرمز رنگ) را دلیل بر جدایش خوب این ذرات دانست. این بدین معناست که زمان اقامت ذرات روی سطح سرندها و همچنین زمان عبور ذرات از دهانه‌ها افزایش یافته است و بنابراین، فرصت اینکه ذرات به طور مناسب از چشمه‌های سرندها بگذرند نیز افزایش می‌یابد و باعث بهبود کارایی جدایش طبقه سرندها بالایی می‌گردد.

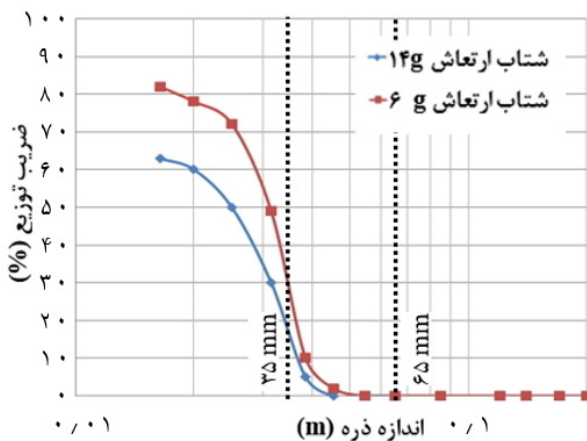
وقتی جریان بهتری از سطح سرندها بالایی عبور می‌کند، منجر به تشکیل لایه مناسبی از ذرات روی طبقه سرندها پایینی نیز می‌شود. لایه مواد بر روی طبقه سرندها پایینی به سرعت تشکیل می‌شود و اغلب ذرات به رنگ آبی و سبز می‌باشند. بر روی صفحه انتهایی طبقه سرندها پایینی شاهد ذرات سبز و نارنجی بیشتری نسبت به حالت قبل هستیم. با مشاهده جریانی که از طبقه سرندها پایینی به ریزدانه می‌ریزد، واضح است که این جریان مواد ریزدانه از حالت قبل بیشتر و خیلی بهتر می‌باشد.

۴-۳- پیش‌بینی کارایی سرندها بر پایه شبیه‌سازی‌ها

شکل (۸) منحنی کارایی جدایش طبقه سرندها بالایی، برای حالت‌های شتاب ارتعاش ۶g و ۱۴g و کسرهای مختلف اندازه ذرات را نشان می‌دهد. محور افقی نمودار، اندازه ذرات را در مقیاس لگاریتمی و محور قائم، درصد وجود ذرات در جریان درشت دانه طبقه سرندها بالایی را نشان می‌دهد. استفاده از مقیاس لگاریتمی، به دلیل نمایش بهتر ذرات ریز می‌باشد.



شکل (۸) منحنی کارایی جدایش سرد پایی برای شتابهای ارتعاش ۶g و ۱۴g



شکل (۹) منحنی ریزدانه برای شتابهای ارتعاش ۶g و ۱۴g

از آنجا که انجام آزمایش‌های مختلف سردکنی در مقیاس صنعتی برای بررسی تاثیر عوامل مورد معمول به دلیل هزینه‌بر و زمانبر بودن امکانپذیر نیست، از اینرو، اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش بر مبنای مقایسه آنها با نتایج انتشار یافته توسط پژوهشگران دیگر در منابع [۱۷،۱۶] انجام شده است. با وجود این، این نکته را می‌باید در نظر داشت که به دلیل در دسترس نبودن برخی از جزئیات مطالعات قبلی در منابع یاد شده، بخشی از عدم همخوانی نتایج به دلیل یکسان نبودن ورودی شبیه‌سازی‌هاست.

۱-۵- مقایسه جریان ذرات روی سرد با شتاب اوج ۱۴g

در شکل (۱۱) خصوصیات خوراک و نوسانات سرد مشابه در منبع [۱۶] است. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر دو مطالعه طبقه سردنی بالایی جدایش خوبی اتفاق نمی‌افتد و ذرات درشت (با رنگ قرمز) در طول سرد پراکنده‌اند و به خوبی به سمت درشت دانه رانده نشده‌اند. ذرات ریز نیز با رنگ

۶g وضعیت بهتری را نشان می‌دهد. چون با این شتاب ارتعاش، ذرات توانایی عبور بهتری از حالت ۱۴g دارند.

نمودار شکل (۹) توزیع جریان محصول درشت دانه طبقه سردنی پایینی را برای شتابهای ارتعاش ۱۴g و ۶g نشان می‌دهد. در منحنی مربوط به شتاب ۶g مشاهده می‌شود که بیشترین کارایی جدایش، برای ذرات ۴۰ تا ۵۰ میلیمتر دیده می‌شود که در حدود ۷۴ درصد می‌باشد. با درشت‌تر شدن ذرات مقادیر باقیمانده روی طبقه سردنی پایینی کاهش می‌یابد و در انتها به صفر درصد می‌رسد؛ زیرا این ذرات درشت توسط طبقه سردنی بالایی به درشت دانه انتقال یافته‌اند.

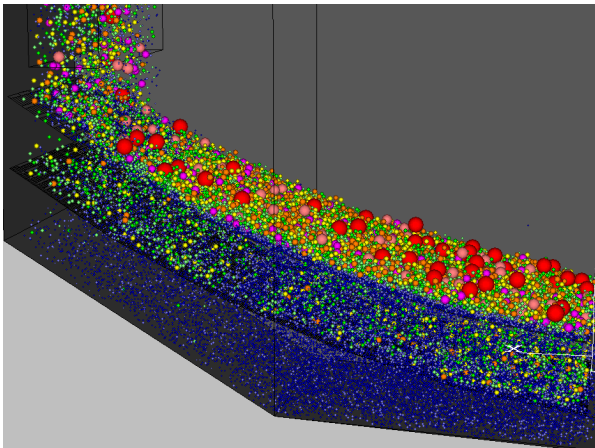
با افزایش شدت ارتعاش از ۶g به ۱۴g شاهد این هستیم که بیشترین کارایی به حدود ۶۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین محدوده ذرات با بیشترین کارایی نیز به ۳۵ تا ۴۵ میلیمتر انتقال یافته است.

شکل (۱۰) نیز منحنی ریزدانه برای شتابهای ارتعاش ۱۴g و ۶g را نشان می‌دهد. در هر دو منحنی، ذراتی بزرگتر از ۵۰ میلیمتر در آنها وجود ندارد؛ زیرا این اندازه از ذرات توسط دو طبقه سردنی جدا شده و به جریان درشت دانه این دو طبقه سردنی راه یافته‌اند. مقدار کارایی با شتاب ارتعاش ۶g برای ذرات ۳۰ میلیمتر تا ۳۵ میلیمتر به حدود ۵۰ درصد می‌رسد و برای ذرات ریزتر تا ۸۰ درصد افزایش دارد. با افزایش شدت ارتعاش سردنی به ۱۴g، می‌بینیم که برای ذرات ۳۰ تا ۳۵ میلیمتر، کارایی به ۳۰ درصد کاهش یافته است و بیشترین کارایی برای ذرات ریزتر نیز حدود ۶۵ درصد است که نسبت به حالت قبل میزان ریزدانه افت قابل توجهی داشته است.

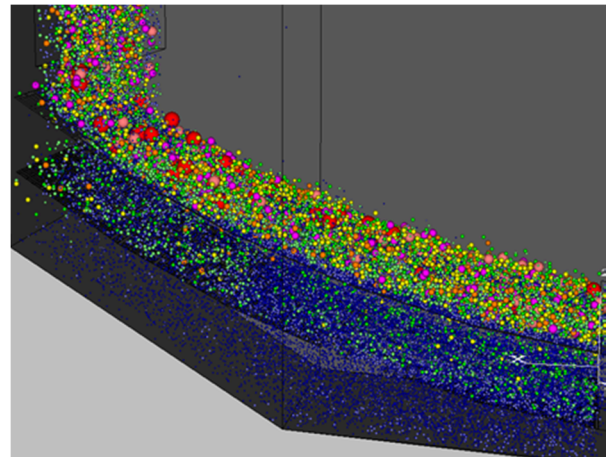
با توجه به نتایج بدست آمده، می‌بینیم که در شتابهای بالای نوسان سردنی، تلاطم زیاد ذرات باعث ایجاد سریع لایه‌بندی مواد و بهبود جریان مواد می‌شود ولی از طرف دیگر زمان اقامت ذرات را روی سطح سردنی کاهش می‌دهد و ذرات کمتری از دهانه‌ها عبور می‌نمایند. شتابهای خیلی پایین نیز کارایی جدایش را کاهش می‌دهد زیرا لایه‌بندی به خوبی تشکیل نشده است که ذرات با فرصتی که در اختیار دارند از سطح سردنی عبور نمایند. پس وجود یک شتاب ارتعاش متناسب برای بهبود کارایی سردنی لازم است.

۵- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها

روش اجزای گسسته یک روش عددی مناسب برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار ذرات است. در این پژوهش با نرم‌افزار PFC3D مبتنی بر روش اجزای گسسته، تأثیر شرایط عملیاتی و هندسه سردنی بر عملکرد طبقه‌بندی ذرات بررسی شد.



شکل (۱۲) جریان ذرات شبیه‌سازی شده روی سرند با شتاب
ارتعاش ۶g



شکل (۱۱) جریان ذرات شبیه‌سازی شده روی سرند با شتاب
ارتعاش ۱۴g

طبقه سرندي بالایی، ذرات درشت به خوبی به انتهای سطح سرند و ذرات ریز نیز به طبقه سرندي پایینی انتقال یافته‌اند. روی طبقه سرندي پایینی نیز علاوه بر ذرات آبی و سبز، مقداری ذرات به رنگ زرد و نارنجی (ذرات با اندازه متوسط) نیز مشاهده می‌شوند که البته نتایج مطالعات قبلی جدایش بهتری را نشان می‌دهد. این اختلافات به دلیل تفاوت شرایط و استفاده از نرم‌افزارهای متفاوت می‌باشد. جریان ریزدانه، در هر دو مورد بهبود یافته است ولی در نتایج مطالعات قبلی قابل توجه‌تر است.

۳-۵- مقایسه کارایی جدایش طبقه سرندي بالایی در محدوده شتاب اوج ۶g

همانطور که از اشکال قسمت قبل پیداست، سرند با شتاب نوسان ۶g بهتر از حالت ۱۴g کار می‌کند. همچنین در هر دو مورد نتایج مطالعات قبلی بهتر از نتایج مطالعه جدید این تحقیق است. با توجه به نمودار شکل (۱۳) که کارایی سرند بالایی را با برای دو مطالعه قبلی و جدید در محدوده شتاب نوسان ۶g نشان می‌دهد، متوجه می‌شویم که روند منحنی سرند شبیه‌سازی شده جدید در کل نزدیکی خوبی را با نمودار مطالعات قبلی نشان می‌دهد؛ مخصوصاً در نقاطی که اندازه ذرات ۴۵ تا ۵۰ میلیمتر می‌باشد. در بقیه نقاط نیز مطالعات قبلی نتایج بهتری را ارائه می‌نمایند [۱۷]. محاسبات آماری بر روی مقادیر خطای نسبی مربوط به تمامی نقاط روی منحنی توزیع در محیط Excel انجام گرفت. میانگین خطای نسبی معادل ۳۸/۶ درصد و با فاصله اطمینان ۲/۲۹ درصد در سطح اعتماد ۹۵ درصد محاسبه شد. در مقایسه با دو حالت

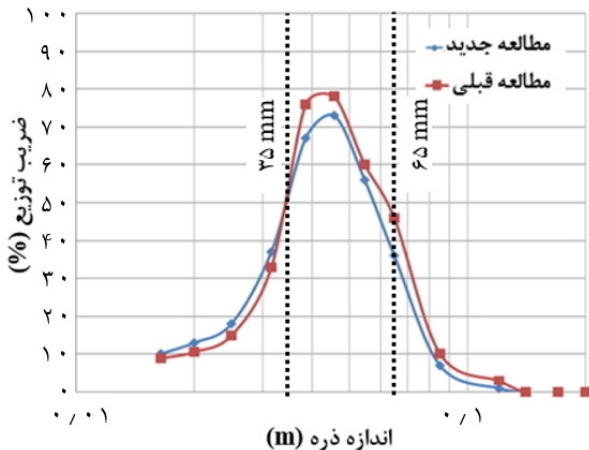
آبی و آبی کمرنگ نیز روی سرند بالایی به خوبی قابل مشاهده‌اند که نشان دهنده کارایی پایین سرند است.

با نگاهی به طبقه سرندي پایینی در مطالعه قبلی متوجه می‌شویم که ذرات زیادی در ابتدای سرند وجود ندارند ولی در شکل (۱۱) که مربوط به شبیه‌سازی در این مطالعه است، در ابتدای طبقه سرندي پایینی نیز ذرات جدا شده‌اند که هم ذرات آبی و هم ذرات سبز رنگ موجودند. اختلاف در رنگ ذرات موجود به دلیل این است که در مطالعه قبلی به طور واضح مشخص نشده است که هر دسته یا طبقه اندازه با چه رنگی نمایش داده شده‌اند. ولی در این مطالعه هر دسته یا طبقه اندازه با رنگ معینی کدهی و نشان داده شده‌اند و این اختلاف در ظاهر به دلیل یاد شده است که نتایج قابل مشاهده در نمودارها این موضوع را به روشنی تایید می‌نماید.

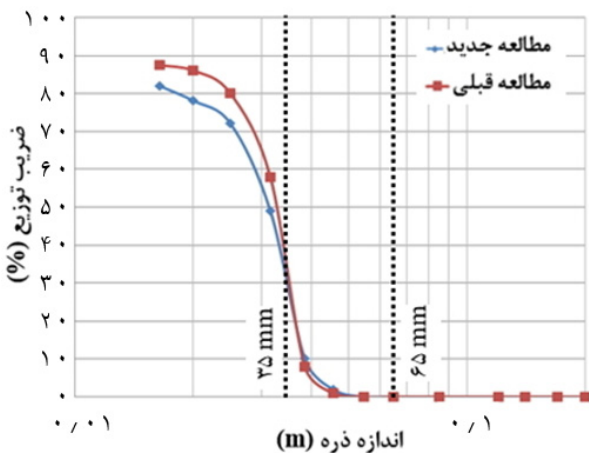
به طور کلی، از ظرفیت صفحه‌های بالایی سطح سرندي پایینی به دلیل ضخامت کم لایه مواد در این صفحات به طور کامل استفاده نمی‌شود که به دو دلیل است: (۱) سرعت زیاد ذرات در هنگام ریخته شدن روی سطح سرندي بالایی که فرصت زمانی کمی به ذرات برای عبور از دهانه‌ها در این ناحیه در اختیار آنها می‌گذارد (۲) ذرات ریز در سطح سرندي بالایی می‌باید به عمق لایه در حال حرکت برای رسیدن به دهانه‌ها نفوذ کنند.

۲-۵- مقایسه جریان ذرات روی سرند با محدوده شتاب اوج ۶g

شکل (۱۲) جریان روی سرند با شدت ارتعاش ۶g را در این مطالعه نشان می‌دهد. با کاهش شتاب ارتعاش نوسانات سرند، در هر دو مورد شاهد جدایش بهتری از مواد هستیم. در



شکل (۱۴) منحنی کارایی طبقه‌سرنندی پایینی برای مطالعه جدید این تحقیق و مطالعه قبلی [۱۷] در محدوده شتاب اوج ۶g

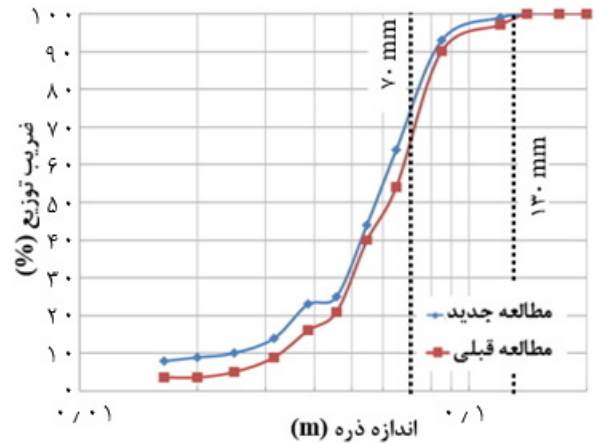


شکل (۱۵) منحنی جریان ریزدانه برای مطالعه جدید این تحقیق و مطالعه قبلی [۱۷] در محدوده شتاب ۶g.

همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو نمودار با اختلاف بسیار جزئی، ذرات بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر وجود ندارد چون توسط دو طبقه‌سرنند جدا شده‌اند. برای ذرات با اندازه کوچکتر از ۲۰ میلی‌متر کارایی جریان ریزدانه برای مطالعات قبل، حدود ۸۸ درصد است که این مقدار در نتایج مطالعات جدید به حدود ۸۲ درصد کاهش یافته است [۱۷]. میانگین خطای نسبی در این حالت معادل ۱۲/۸ درصد و فاصله اطمینان در سطح اعتماد ۹۵ درصد معادل ۱۶/۵ درصد محاسبه شدند.

۶- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی با روش اجزای گسسته قادر است منحنی عملکرد سرندهای جدید را با جزئیات کافی و به‌خوبی پیش‌بینی کند. در این مقاله، جریان ذرات روی سرند به روش عددی، شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر شرایط



شکل (۱۰) منحنی کارایی طبقه‌سرنندی بالایی برای مطالعه جدید این تحقیق و مطالعه قبلی [۱۷] در محدوده شتاب اوج ۶g.

دیگر که در قسمت‌های ۴-۵ و ۵-۵ توضیح داده شده‌اند مقدار میانگین خطای نسبی در اینجا بسیار بزرگتر است که به دلیل مقادیر بزرگ خطای نسبی مربوط به نقاط در قسمت ریزدانه (محدوده ۱۵ تا ۴۵ میلی‌متر) می‌باشد.

۴-۵- مقایسه کارایی جدایش طبقه‌سرنندی پایینی در محدوده شتاب اوج ۶g

نمودار شکل (۱۴) کارایی طبقه‌سرنندی پایینی را در محدوده شتاب نوسان ۶g برای مطالعه قبلی و جدید نشان می‌دهد. در محدوده ذرات ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر سرند بیشترین کارایی را دارد که این مقدار در نتایج قبلی حدود ۸۰ درصد است و در شبیه‌سازی جدید به حدود ۷۴ درصد کاهش یافته است. برای ذرات بزرگتر از آن محدوده نیز، هر دو منحنی افت می‌یابند تا به صفر می‌رسند. چون بیشتر این ذرات توسط سرند بالایی جدا شده و روی آن باقی مانده‌اند [۱۷].

برای ذرات کوچکتر از ۴۰ میلی‌متر در مطالعه جدید ذرات بیشتری روی سرند باقی مانده‌اند که در مطالعات قبلی ذرات کمتری باقی مانده‌اند و بیشتر به ریزدانه منتقل شده‌اند. دو منحنی نیز با وجود اختلافاتی که دارند ولی نتایج مشابهی را منتج می‌نمایند. برای این حالت، میانگین خطای نسبی معادل ۱۶/۹ درصد با فاصله اطمینان ۱۱/۳ درصد در سطح اعتماد ۹۵ درصد به دست آمد.

۵-۵- مقایسه جریان ریزدانه در محدوده شتاب اوج ۶g

نمودار شکل (۱۵) منحنی‌های ریزدانه را برای دو مطالعه قبلی و جدید مقایسه می‌نماید که در هر دو مورد شتاب ارتعاش سرند در محدوده ۶g بوده است.

- [4] Y. Song, R. Turton, F. Kayihan, (2006) "Contact detection algorithms for DEM simulations of tablet-shaped particles", *Powder Technol.*, 161, 32–40.
- [5] Y. CHEN, X. Tong, (2009) "Application of the DEM to screening process: a 3D simulation", *Min. Sci. Technol.*, 19, 493–497.
- [6] J.W. Fernandez, P.W. Cleary, M.D. Sinnott, R.D. Morrison, (2011) "Using SPH one-way coupled to DEM to model wet industrial banana screens", *Miner. Eng.*, 24, 741–753.
- [7] آ. رفاهی، (۱۳۸۶) "پیش بینی انرژی لازم برای خردایش مواد معدنی با استفاده از پارامترهای مقاومتی سنگ"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
- [8] A. Refahi, J. Aghazadeh Mohandesi, B. Rezai, (2010) "Discrete element modeling for predicting breakage behavior and fracture energy of a single particle in a jaw crusher", *Int. J. Miner. Process.*, 94, 83–91.
- [9] آ. آتشی، (۱۳۸۶) "کاربرد روش اجزای گسسته در بهینه سازی آسیاها"، پروژه کارشناسی، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
- [۱۰] ح. اسحاقی، (۱۳۸۸) "پیش بینی دانه بندی محصول سنگ شکن فکی با استفاده از مدل اجزای گسسته"، پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
- [۱۱] ع. قاسمی، س. ا. موسوی، ص. بنیسی، (۱۳۹۲) "تاثیر گام زمانی بر دقت نتایج در شبیه سازی حرکت ذرات به روش اجزای گسسته (راگ)"، نشریه علمی-پژوهشی روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۲۳–۳۲.
- [12] M. Jahani, A. Farzanegan, M. Noaparast, (2015) "Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver", *Powder Technol.*, 283, 32–47.
- [13] A. Farzanegan, Z. Faraji, (2013) "Modeling and Simulation of Modern Industrial Screens using Discrete Element Method", *International Journal of Engineering, TRANSACTIONS B: Application*, 26, No. 8, 927-932.
- [14] P.A. Cundall, O.D.L. Strack, (1979) "A discrete numerical model for granular assemblies." *Géotechnique*, 29, 47–65.
- [15] Itasca Consulting Group Inc., (1988) *Distinct Element Particle Flow Codes PFC2D and PFC3D*.
- [16] P.W. Cleary, M.D. Sinnott, R.D. Morrison, (2009) "Separation performance of double deck banana screens – Part 1: Flow and separation for different accelerations", *Miner. Eng.*, 22, 1218–1229.
- [17] P.W. Cleary, M.D. Sinnott, R.D. Morrison, (2009) "Separation performance of double deck banana screens – Part 2: Quantitative predictions", *Miner. Eng.*, 22, 1230–1244.

مختلف عملیاتی و هندسه سرند موزی شکل بر عملکرد سرند (منحنی توزیع) نیز مطالعه شد.

نتایج نشان داد که کارایی سرند می تواند با کاهش دامنه و بسامد ارتعاشات بهبود یابد. چون وقتی بسامد افزایش یابد، هم سرعت نفوذ و هم سرعت برخورد و بازگشت افزایش می یابد. همچنین کاهش زاویه شیب صفحات نیز در افزایش کارایی مؤثرند. زیرا با کاهش شیب هم میزان اندازه مؤثر دهانه ها افزایش می یابد و هم سرعت ذرات کاهش یافته و فرصت عبور را دارا می باشند. درصد عبوری ذرات در شرایط مختلف، مربوط به سرعت آنان می باشد. معمولاً یک کاهش مناسب سرعت، درصد عبوری را افزایش می دهد اما سرعت های خیلی پایین، باعث تجمع ذرات می شود. در مورد منحنی های توزیع پیش بینی شده در شبیه سازی انجام گرفته توسط نویسندگان محاسبات آماری و خطا نیز انجام شد. میانگین خطای نسبی منحنی توزیع برای محصولات روسرندی، میانی و زیرسردی به ترتیب ۳۸/۶، ۱۶/۹ و ۱۲/۸ درصد به دست آمد. با توجه به تطابق کلی روند منحنی های توزیع در مطالعه جدید این تحقیق و قبلی و میزان و منشاء خطای پیش بینی ها، صحت شبیه سازی در این پژوهش قابل قبول ارزیابی می شود. در پایان، همخوانی کلی این نتایج با نتایج مطالعات انجام شده قبلی (با وجود عدم دسترسی به اطلاعات دقیق در مطالعه قبلی)، به خوبی نشان می دهد که روش اجزای گسسته توانایی این را دارد تا برای برخی مطالعات بنیادی مورد استفاده قرار گیرد. امید است تا در آینده بتوان نه تنها برای ذرات خشک، بلکه برای ذرات سیال نیز مطالعات وسیعتری انجام داد و از دستاوردهای چنین پژوهش هایی برای بهبود عملکرد در کارخانه های فرآوری مواد معدنی استفاده نمود.

مراجع

- [1] B.A. Wills, T.J. Napier-Munn, (2011) "Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery." Elsevier Science.
- [2] K.J. Dong, a. B. Yu, I. Brake, (2009) "DEM simulation of particle flow on a multi-deck banana screen", *Miner. Eng.*, 22, 910–920.
- [3] Li, C. Webb, S.S.S. Pandiella, G.M.M. Campbell, (2003) "Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation", *Powder Technol.*, 133, 190–202.

Simulation of double-deck vibrating screens based on DEM using PFC3D software

Zahra Faraji¹, Akbar Farzanegan^{2,*}

1. Department of Mining Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2. School of Mining, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT

Double-deck industrial vibrating screens are extensively used for solid-solid separation based on particle size. Discrete Element Method (DEM) is a numerical simulation approach that can compute interactions between particles, particles and screen surface and their movement. In this article, the results of simulation of particles classification in a 5-panel banana screen with DEM under PFC3D environment is presented. DEM simulations were performed to study the effects of operating conditions and geometry on classification performance. The results previously reported in literature by other researchers were used to validate DEM predications in current research. The mean relative error of partition curves for screen overflow, middlings and underflow were 38.6 %, 16.9 % and 12.8 %, respectively. Given the close agreement between trends of partition curves in previous and current studies, values and sources of prediction errors, the accuracy of performed simulation is evaluated as acceptable.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: July 01, 2016

Revised in: December 31, 2016

Accepted: February 18, 2017

Key words:

Modeling

Simulation

Banana screen

DEM

PFC3D

All right reserved.

* Corresponding author
farzanegan@ut.ac.ir
