

بررسی تأثیر شکل دانه بر ساختار بستر و خصوصیات جریان خروجی از سیلوها با استفاده از شبیه‌سازی عددی به روش المان‌های مجزا (DEM)

*محمدحسین عباسپور فرد^۱، باقر عمادی^۲ و مهدی خجسته‌پور^۳

^۱استادیار، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، آستادیار، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد،

^۲استادیار، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۸۶/۱۱/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۹/۱۶

چکیده

به منظور بررسی اثرات شکل دانه روی ساختار مواد در سیلوها و رفتار آنها در حین تخلیه، از یک مدل DEM که قادر است دانه‌های غیر کرووی تولید نماید، استفاده شد. سیلوی شبیه‌سازی شده از نوع کف مسطح با عرض ۱۰۰ سانتی‌متر و متشکل از دو محفظه مجزای بالایی و پایینی تشکیل شد به طوری که دانه‌ها ابتدا در قسمت بالا به صورت فله انباشته، و سپس با حذف دریچه، اجازه تخلیه مواد به قسمت پایین داده می‌شد. جهت بررسی اثرات شکل دانه‌ها چهار بار متفاوت با چهار شکل دانه مختلف ولی حجم ثابت شبیه‌سازی شد، به گونه‌ای که چهار نوع دانه میله‌ای شکل با نسبت‌های طول به قطر مختلف از یک الی ۴ میلی‌متر ایجاد گردید. تعداد کل دانه‌ها در هر بار ۵۰۰۰ بود و برای این که ارتفاع سیلوی شبیه‌سازی شده نزدیک به ارتفاع سیلوهای واقعی باشد دانه‌ها همگی در یک لایه عمودی تولید شدند. توزیع بخش جامد در بستر مواد نشان داد که با بلندتر شدن شکل دانه‌ها این توزیع به سمت نرمال نزدیک‌تر می‌گردد. علاوه بر این بستر مواد تشکیل شده از دانه‌های کرووی نشان‌دهنده نواحی با تراکم زیاد است که توسط باریکه‌هایی از مواد با تراکم کم از هم جدا شده‌اند. مشاهده شد که با میله‌ای شدن هر چه بیشتر شکل دانه‌ها سطح نواحی متراکم کم ولی تعداد آنها افزایش می‌یابد به طوری که در بستر متشکل از دانه‌های با نسبت طول به قطر چهار تعداد این نواحی به قدری زیاد می‌شود که از هم قابل تشخیص نیستند. از طرف دیگر با افزایش طول دانه‌ها ارتفاع بستر افزایش یافته که نشان‌دهنده وجود تخلخل بیشتر در این گونه مواد نسبت به مواد کرووی است. رفتار مواد در هنگام تخلیه نشان می‌دهد که تفاوت فاحشی بین مواد کرووی و میله‌ای شکل وجود دارد، در حالی که حرکت دانه‌های کرووی به صورت اجسامی مستقل در داخل توده مواد صورت گرفته و در نتیجه یک جریان خروجی یکنواختی با مقاومت برشی کم ایجاد می‌شود؛ مواد متشکل از دانه‌های میله‌ای در هنگام تخلیه از خود مقاومت برشی بیشتری بروز داده که این امر به دلیل قفل شدن دانه‌ها در داخل هم می‌باشد. قفل شدن دانه‌ها با هم در حین تخلیه سبب بروز پدیده پل در مواد می‌گردد. تشکیل و شکسته شدن مکرر پل در بستر اینگونه مواد سبب یک جریان تخلیه نامنظم و بهم‌نوار می‌شود که در تصاویر به دست آمده از شبیه‌سازی کاملاً قابل مشاهده بود. در نتیجه این گونه رفتار مواد میله‌ای، شدت جریان خروجی کمتری نسبت به مواد کرووی به دست آمد. براساس نتایج به دست آمده لازم است در شبیه‌سازی مواد کشاورزی با دانه‌های میله‌ای، دانه‌هایی در مدل ایجاد شود که به شکل واقعی دانه‌ها نسبتاً نزدیک‌تر باشد.

واژه‌های کلیدی: المان‌های مجزا، شبیه‌سازی، شکل دانه، سیلوی

مقدمه

نحوه انباشت و رفتار دینامیکی مواد دانه‌ای^۱ اعم از مواد صنعتی و کشاورزی در طی فرایندهای مختلف، از مواردی است که همواره مورد توجه محققان بوده است. نتایج به‌دست آمده از این مطالعات نشان می‌دهند که شکل و اندازه دانه‌ها دو عامل جدا ناپذیر و مرتبط با هم هستند که در حیطه مکانیک این گونه مواد و توصیف رفتار آنها نقش عمده‌ای ایفا می‌نمایند. با این وجود اهمیت، این دو عامل در مواردی وضعیتی دو چندان پیدا می‌کند. برای مثال در بخش فناوری پودرها (مثلاً آرد) بیشتر دانه‌ها در حد میلی‌متر و نسبتاً هم شکل هستند در حالی که در مورد مواد کشاورزی تنوع زیادی در شکل و اندازه دانه‌ها از اندازه‌های میلی‌متری در بذر سبزیجات تا اندازه‌های چند ده سانتی‌متری در بیشتر میوه‌ها مشاهده می‌شود، در حالی که از نظر شکل نیز بسیار متنوع هستند. مطالعات انجام شده بر روی مواد غیر کروی نشان می‌دهد که نه تنها رفتار این مواد کاملاً متمایز از رفتار مواد کروی است، بلکه رفتار مکانیکی مواد فله‌ای متشکل از دانه‌های غیرکروی به دلیل شکل دانه‌ها و خلل و فرج به وجود آمده کاملاً از رفتار انفرادی دانه‌ها متمایز بوده (فاتز و تامپسون، ۱۹۹۳) و همچنین رفتار انفرادی دانه‌های غیرکروی در بارگذاری‌ها در جهات مختلف نیز متفاوت می‌باشد (موی سای و لامبرت، ۱۹۸۷). مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی جریان مواد دانه‌ای در سیلوها نیز نشان می‌دهد که یکی از عوامل مهم در رفتار این‌گونه مواد در سیلوها شکل دانه‌ها و یا اجزاء تشکیل‌دهنده مواد فله‌ای می‌باشد (بهرینگر و باکستر، ۱۹۹۴؛ ندرمن، ۱۹۸۵). با این وجود به دلیل نبودن امکان مشاهده مواد در داخل سیلوها، نتایج به‌دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه بسیار محدود می‌باشد. علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی، مطالعات عددی زیادی نیز بر روی رفتار مواد در سیلوها انجام پذیرفته است (ژانگ و اویی، ۱۹۹۸؛ کانو، ۱۹۹۸؛ تورنتون و کافوی، ۱۹۹۷؛ لانگستون و همکاران، ۱۹۹۷؛ رانگ و

همکاران، ۱۹۹۵a؛ ۱۹۹۵b). در میان روش‌های عددی، شبیه‌سازی به روش المان‌های مجزا^۲ (DEM) به‌عنوان یک ابزار موثر در اینگونه مطالعات شناخته شده است. با این وجود به دلیل اینکه اکثر این مطالعات از طریق مدل‌هایی با المان‌های دایره‌ای شکل (کروی در مدل‌های سه بعدی) انجام گرفته است، نتایج این مطالعات به سادگی به رفتار مواد واقعی با دانه‌های غیرکروی (مانند بیشتر میوه‌ها و غلات) قابل تعمیم نمی‌باشد (دوبری و ان جی، ۱۹۹۲؛ ان جی، ۱۹۹۶؛ کافوی و تورنتون، ۱۹۹۷). اولین بار کلیری (۱۹۹۹) توانست با استفاده از یک مدل دوبعدی DEM به شبیه‌سازی دانه‌هایی دایره‌ای و غیر دایره‌ای (مربع و بیضی) اقدام نماید و از این طریق مطالعاتی بر روی اثر شکل دانه بر رفتار دینامیکی مواد هنگام خروج از سیلو پردازد. در تحقیق حاضر به منظور بررسی اثرات شکل دانه‌ها بر روی ساختار مواد در سیلوهایی در حال انباشت و رفتار آنها در حین تخلیه از سیلو از یک مدل DEM که قادر است سیلویی حاوی دانه‌های کروی و غیرکروی میله‌ای نیز تولید نماید، استفاده شده است. این مدل بر مبنای روش کرات ترکیبی (MSM)^۳ استوار بوده به گونه‌ای که هر دانه غیرکروی در مدل، از ترکیب با همپوشانی یا بدون همپوشانی دو یا چند کره ایجاد می‌گردد (عباس‌پورفرد، ۲۰۰۱). این مدل نسخه گسترش یافته و تعمیم داده شده مدل کانبال^۴ است که توسط دوبری و ان جی (۱۹۹۲) برای مطالعه رفتار مواد دانه‌ای کروی ارائه شد. مدل کانبال نیز بر مبنای مدل تروبال^۵ به وجود آمده است. مدل تروبال توسط کانندال که پیشکسوت روش DEM است طی سال‌های ۱۹۸۰-۱۹۷۹ به زبان Fortran^۶ نوشته شد (کانندال و استراک، ۱۹۷۹). مدل کرات ترکیبی طی سال‌های ۲۰۰۱-۱۹۹۹ توسط عباس‌پورفرد (۲۰۰۱) برای شبیه‌سازی مواد دانه‌ای کروی و غیرکروی در سیستم‌های

2- Discrete Element Method

3- Multi-Sphere Method

4- CONBAL

5- TRUBAL

6- Fortran

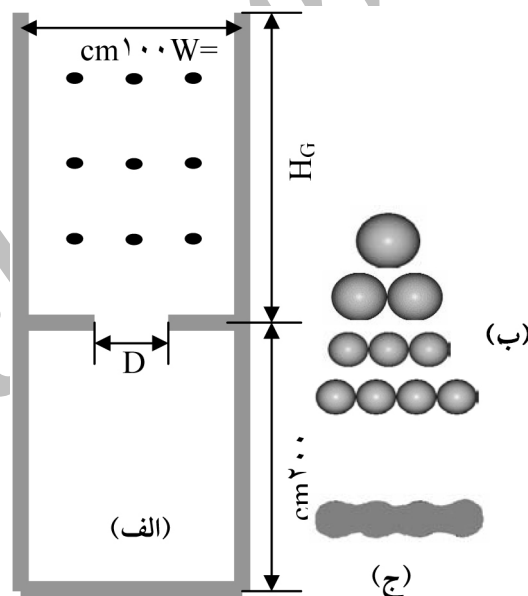
1- Particulate Materials

سه بعدی گسترش و ابداع گردید. به منظور نشان دادن اعتبار و توانایی مدل "کرات ترکیبی" در شبیه سازی مواد دانه ای، این مدل مورد ارزیابی قرار گرفت (عباس پورفرد، ۲۰۰۴). این ارزیابی ها نشان داد که مدل مذکور می تواند به صورت مطلوب و موثری پدیده های دینامیکی مواد دانه ای را شبیه سازی و مورد مطالعه قرار دهد.

مواد و روش ها

در این تحقیق برای مطالعه رفتار دینامیکی مواد کروی و غیرکروی از مدل "کرات ترکیبی" که در بخش قبل معرفی گردید استفاده شد (عباس پورفرد، ۲۰۰۱). این مدل همان طور که قبلاً در مقدمه اشاره شد، مدل توسعه یافته تروبال است. مدل مذکور به زبان فرترن ۹۰ نوشته شده و قادر است سامانه هایی متشکل از دانه ها و یا ذرات کروی و غیرکروی را به صورت سه بعدی شبیه سازی و مدل

نماید. حقوق مادی و معنوی این مدل متعلق به نویسندگان این مقاله است با این وجود کدهای آن جهت استفاده قابل ارائه به دیگر محققان نیز می باشد. در این تحقیق از این مدل به منظور انجام شبیه سازی یک سیلوی از نوع کف مسطح^۱ با عرض ۱۰۰ سانتی متر (۵۰ برابر قطر کره به کار رفته برای تشکیل المان ها در مدل) استفاده گردید. المان های سه بعدی (دانه ها) به گونه ای در مدل ایجاد شدند که در نهایت به صورت یک لایه عمودی بر روی همدیگر مستقر گردیدند (سیلویی شبه سه بعدی). سیلو از دو قسمت مجزای بالایی و پایینی تشکیل گردیده به طوری که المان ها پس از تولید ابتدا در قسمت بالا به صورت فله^۲ انباشت گردیده و سپس با حذف دریچه، اجازه تخلیه مواد به قسمت پایین داده شد. شکل ۱ الف وضعیت و ابعاد سیلوی مدل را نشان می دهد.



شکل ۱- (الف) شکل سیلو در مدل، H_G ارتفاع سیلو در بالا که برای مواد با شکل های مختلف متفاوت می باشد. • محل تقریبی دانه های انتخاب شده و نشان گذاری شده در سیلوی مدل. (ب): المان های (دانه ها) به کار رفته در مدل. تمام المان ها دارای حجم یکسان بوده ولی ضریب رعنائی در آنها متفاوت به طوری که برابر یک در بالاترین المان (کره) و چهار در پایین ترین المان. (ج) شکل واقعی یک دانه میله ای با توجه به محدوده تماس بین دانه ها.

- 1- Flat Bottom
- 2- Bulk

جهت بررسی اثرات شکل دانه‌ها چهار بار شبیه‌سازی با چهار شکل المان مختلف ولی حجم ثابت به کار گرفته شد (هر المان متشکل از یک الی چهار کره با آرایش خطی) به گونه‌ای که چهار المان (دانه) میل‌های شکل با ضریب رعنائی^۱ (نسبت‌های طول به قطر) مختلف از یک الی چهار ایجاد گردید (شکل ۱ ب).

برای این‌که حجم مواد در سیلو برای هر چهار نوع دانه برابر بوده و نتایج به دست آمده قابل مقایسه باشند، باید اندازه کرات تشکیل دهنده هر دانه به گونه‌ای تعیین شود که حجم هر چهار نوع دانه با ضریب رعنائی متفاوت، برابر باشد. بنابراین چنانچه دانه‌ای متشکل از یک کره منفرد (با ضریب رعنائی برابر ۱) و با شعاع واحد به عنوان دانه مبنا با حجم معین در نظر گرفته شود، برای هر دانه‌ای با n کره متشکله (با ضریب رعنائی برابر n) می‌بایست شعاع کرات متشکله آن برابر با معادله ۱ باشد تا حجم دانه به وجود آمده برابر حجم دانه مبنا باشد. در این رابطه n تعداد کرات متشکله المانی با حجمی برابر کره‌ای به شعاع واحد و (R_n) شعاع کرات متشکله آن المان بر حسب سانتی‌متر.

$$R_n = \left(\frac{1}{n}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

به منظور ایجاد توده‌ای کاملاً طبیعی در سیلو، در مرحله تولید دانه‌های غیرکروی، به هر دانه یک جهت کاملاً تصادفی اختصاص یافت و سپس با اعمال شتاب ثقل بر آنها اقدام به شبیه‌سازی انباشت توده مواد در سیلو گردید. این مرحله که عمل تحکیم^۲ نامیده می‌شود تا آنجا ادامه پیدا کرد که دانه‌ها به‌طور نسبی به حالت سکون درآیند. ضریب اصطکاک و دیگر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد که در این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول ۱ نشان داده شده است.

این خصوصیات مربوط به کوارتز می‌باشد که از مواد اصلی تشکیل دهنده خاک در کشاورزی می‌باشد. البته در این تحقیق هدف اصلی خصوصیت شکل دانه‌ها است و نه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، بنابراین اگرچه در اینجا خصوصیات فیزیکی و مکانیکی کوارتز مورد استفاده قرار گرفته است ولی هر ماده دیگری نیز ممکن است مورد توجه و استفاده قرار گیرد.

جدول ۱- پارامترها و خواص فیزیکی و مکانیکی به کار رفته در سیلوی مدل^{*}.

عنوان	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	۳/۵	گیگا پاسکال
ضریب پواسیون مواد	۰/۱۷	-----
شعاع کره مبنای متشکله دانه‌ها	۱/۰	سانتی‌متر
ضریب میرایی مواد ^۱	۰/۵	-----
ضریب اصطکاک بین دانه‌ها	۰/۲	-----
ضریب اصطکاک بین دانه‌ها و دیواره سیلوی	۰/۵	-----
چگالی حقیقی دانه‌ها	۲/۶۵	سانتی‌متر / گرم
گام زمانی محاسبات در مدل ^۱	۰/۰۱	میلی ثانیه
تعداد دانه‌ها در سیلوی مدل	۵۰۰۰	-----
تعداد کرات متشکله دانه‌ها	۱۵۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۵۰۰۰	-----

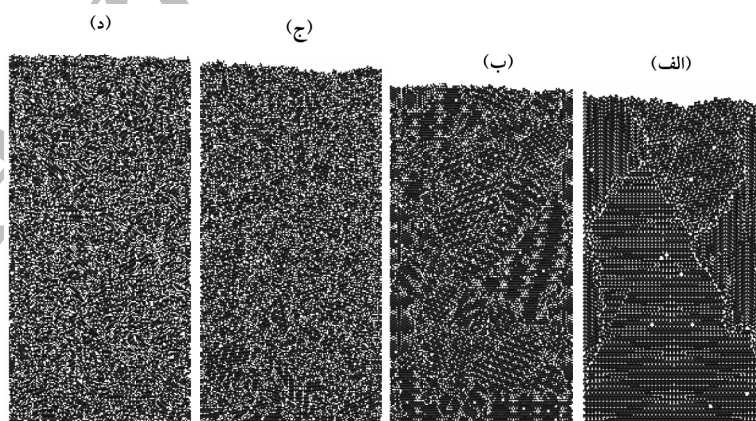
* خواص فیزیکی و مکانیکی برگرفته شده از <http://www.quartz.com/gedata.html>

نتایج و بحث

ساختار بستر مواد فله^۱: اثر شکل دانه‌ها بر روی ساختار مواد انباشته شده در انتهای مرحله تحکیم، براساس فاکتورهایی شامل ارتفاع انباشت، توزیع بخش جامد مواد^۲ در داخل توده، که از نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی توسط مدل محاسبه شد، مورد بررسی قرار گرفت. ارتفاع انباشت در انتهای مرحله تراکم برای بسترهایی از مواد با دانه‌هایی با نسبت‌های مختلف طول به عرض در شکل ۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش ضریب رعنائی دانه‌های متشکله بستر، ارتفاع اولیه انباشت مواد افزایش می‌یابد، این امر نشان می‌دهد که با افزایش ضریب رعنائی دانه‌ها، خلل و فرج بین آنها افزایش یافته که این امر باعث افزایش ارتفاع انباشت در این‌گونه مواد می‌گردد. در طی مرحله تحکیم نحوه حرکت دانه‌های بلند کاملاً از دانه‌های کروی متفاوت بوده به‌گونه‌ای که دانه‌های بلند با جهت‌گیری‌های مختلفی که می‌توانند بگیرند، قادرند خلل و فرج‌هایی با شکل و اندازه مختلف به وجود آورند. چون جهت‌گیری دانه‌ها تصادفی انتخاب می‌شود شکل و اندازه خلل و فرج ایجاد شده در بستر نیز تصادفی ایجاد خواهد شد. این امر سبب می‌گردد تا بستر

این‌گونه مواد متخلخل‌تر گردیده، چگالی ظاهری بستر کاهش یافته که منجر به افزایش ارتفاع انباشت در آنها می‌گردد. این در حالی است که در بستر مواد کروی، این‌گونه دانه‌ها می‌توانند به راحتی بر روی هم بغلتند، بنابراین قادرند فضاهای بیشتری را در بین خود پر نموده، در هم قفل شدن دانه‌ها^۳ کاهش یافته، در نتیجه بستری متراکم‌تر نسبت به دانه‌های غیرکروی به وجود آورند. شکل ۲ همچنین به خوبی نشان می‌دهد که بستر مواد کروی از طریق یک سری نواحی باریک با تخلخل بالا به صورت بلوک‌هایی از هم‌دیگر جدا می‌گردد. این نتایج با یافته‌های دوبری و ان جی (۱۹۹۲) هم‌خوانی دارد که بیان می‌دارد توده‌های متشکل از دانه‌های یکنواخت کروی باعث ایجاد بلوک‌هایی مجزا از هم می‌گردد که در اثر پل‌بندی^۴ بین ذرات به وجود می‌آیند. با افزایش ضریب رعنائی دانه‌ها در بستر، اندازه این بلوک‌ها کاهش یافته و تعداد بلوک‌ها با اشکال کاملاً تصادفی افزایش می‌یابد که بهم قفل شدگی بیشتر دانه‌های غیرکروی را نشان می‌دهد. این رفتار متفاوت در مواد کروی و غیرکروی باعث به وجود آمدن بسترهایی با تخلخل مختلف می‌گردد. شکل ۳ متوسط بخش جامد (عکس میزان خلل و فرج) را برای بسترهای مختلف نشان می‌دهد.

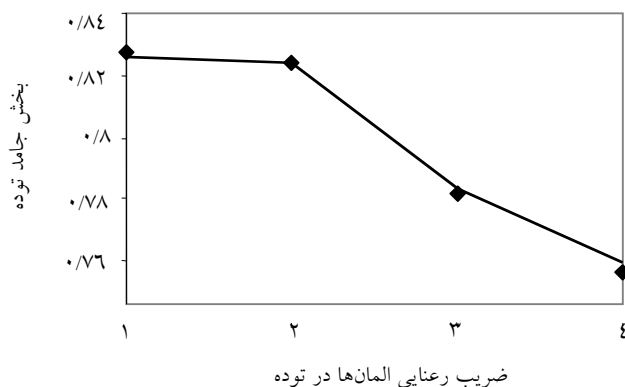


شکل ۲- ساختار بستر در انتهای مرحله تحکیم برای توده‌هایی حاوی المان‌هایی با ضریب رعنائی:

(الف) ۱، (ب) ۲، (ج) ۳ و (د) ۴.

3- Interlocking
4- Bridging

1- Packing Structure
2- Material Solid Fraction



شکل ۳- رابطه بین ضربه رعنائی المان‌ها که نمایانگر میزان میله‌ای شکل بودن دانه است با بخش جامد توده مواد.

انجام شده است که المان‌های کروی (دایره‌ای) داشته‌اند (لانگستون و همکاران، ۱۹۹۵؛ تورنتون و کافوی، ۱۹۹۷؛ کانو، ۱۹۹۸).

کلیری (۱۹۹۹) از طریق شبیه‌سازی عددی با استفاده از یک مدل دوبعدی مطالعاتی در زمینه تأثیر شکل دانه‌ها بر روی رفتار دینامیکی مواد هنگام خروج از سیلو انجام داد. در این مدل از المان‌های دایره‌ای، بیضوی و مربعی شکل استفاده و المان‌های غیردایره‌ای به کمک توابع درجه دو ایجاد گردید. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که ضمن این‌که رفتار مواد میله‌ای^۱ شکل از مواد کروی کاملاً متفاوت بود، شدت جریان مواد خروجی نیز در این مواد تا ۳۰ درصد نیز کمتر از مواد کروی می‌باشد. در تحقیق حاضر مطالعه بیشتری بر روی اثر شکل دانه بر رفتار دینامیکی مواد هنگام خروج از سیلو از طریق شبیه‌سازی توده‌های تحکیم یافته که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند، انجام گیرد. در این مطالعه فاکتورهایی مثل ردیابی حرکت دانه‌ها^۳ در حین خروج از سیلو، جهت حرکت دانه‌ها در سیلو، انرژی جنبشی دانه‌ها، چرخش دانه‌ها و سرعت عمودی و افقی دانه‌ها در سیلو مورد ثبت و بررسی قرار گرفت.

توسعه و تغییر بخش جامد توده در طی خروج مواد از سیلو: ثبت تغییرات بخش جامد توده در داخل سیلو در حین تخلیه مواد نشان داد که توده مواد کروی (در مقایسه

این فاکتور بیان‌کننده عکس میزان پوکی توده می‌باشد (توده‌های با بخش جامد بزرگ‌تر مترکم‌تر می‌باشند). کاهش ایجاد شده در بخش جامد بستر مواد با دانه‌های بلند (میله‌ای با ضربه رعنائی ۴) در مقایسه با بستر مواد کروی در مجموع حدود ۸ درصد می‌باشد که بیشترین این کاهش بین بستر با ضربه رعنائی ۴ و با ضربه رعنائی ۲ ایجاد گردیده است. این امر بیان‌کننده این واقعیت است که اگرچه ممکن است مواد شبه‌کروی رفتاری نزدیک به رفتار مواد کروی داشته باشند ولی رفتار مواد با دانه‌های میله‌ای شکل کاملاً متمایز از رفتار مواد کروی شکل خواهد بود. بنابراین نتایج به دست آمده از آن دسته از مدل‌های عددی که شکل المان‌های به کار رفته در آنها دایره و یا کره فرض می‌گردد نمی‌تواند به سادگی قابل تعمیم به رفتار مواد غیرکروی باشد. در نتیجه کاربرد این‌گونه مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار مواد غیرکروی کشاورزی نتایجی غیرواقع ارائه خواهد داد.

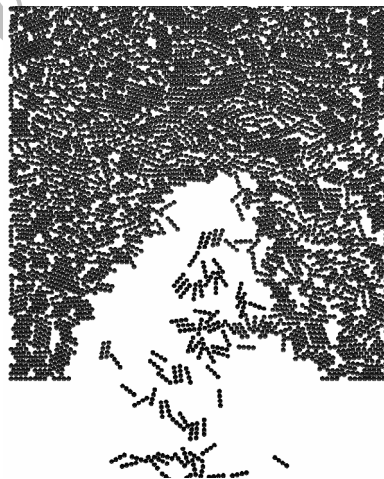
اثر شکل دانه بر روی جریان خروجی مواد از سیلو: رفتار دینامیکی مواد خروجی از سیلو تحت تأثیر ویژگی‌های مختلف مواد موجود در آن می‌باشد. درک تقابل ایجاد شده بین دانه‌ها در حین خروج می‌تواند به بهبود طراحی سیلوها و مخازن کمک نماید. این‌گونه اطلاعات را به ندرت می‌توان از طریق مطالعات فیزیکی و آزمایشگاهی به دست آورد. اگرچه مطالعاتی از طریق شبیه‌سازی عددی با مدل‌های DEM انجام گرفته است با این وجود بیشتر این مطالعات با استفاده از مدل‌هایی

1- Quadric Function
2- Elongated Particles
3- Particle Track

با مواد میله‌ای) در حین تخلیه ساختاری همگن تر و دارای بخش جامد بالاتری بودند. این امر بیان‌کننده این نکته است که دانه‌های کروی حرکتی آزادتر و روان‌تر در سیلو داشته که این مسئله سبب می‌شود تا این مواد با یکنواختی بیشتری از سیلو تخلیه شوند. در حالی که در مواد میله‌ای با داشتن بخش جامد غیریکنواخت و نا همگن هم در بخش‌های مختلف سیلو و هم نسبت به زمان در طی تخلیه، یک جریان خروجی غیریکنواخت را نشان می‌داد. با مشاهده تصاویر تهیه شده از داخل سیلو در مدل شبیه‌سازی شده ملاحظه گردید که در توده مواد میله‌ای با باز شدن دریچه خروجی و حرکت مواد به سمت پایین، دانه‌ها در همدیگر قفل شده و به‌طور متناوب سبب تشکیل پل‌هایی^۱ به‌صورت لحظه‌ای می‌شدند. ایجاد پل در بخش‌های بالایی سیلو سبب می‌شود تراکم مواد در پایین سیلو کمتر از بالای آن گردیده در نتیجه جریان خروجی از سیلو آهسته‌تر شود. شکسته شدن و تشکیل لحظه‌ای و متناوب پل در این توده باعث جریان خروجی نوسانی و غیریکنواخت می‌گردد. شکل ۴ نمونه‌ای از تشکیل یک پل لحظه‌ای را در بستر مواد میله‌ای نشان می‌دهد.

بررسی نحوه حرکت دانه‌ها در حین خروج: بحث ارائه شده در بخش قبل بیشتر به رفتار مواد در مقیاس کلی توده^۲ مربوط می‌گردد. در این بخش رفتار دینامیکی مواد در مقیاس دانه‌ای^۳ با دنبال کردن و ثبت حرکات تعدادی دانه انتخاب شده در داخل هر توده مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور در داخل هر توده و با توجه به شکل ۱ تعداد ۹ دانه در محل‌هایی نسبتاً یکسان برای تمام توده‌ها انتخاب و سرعت، دوران و جابجایی آنها در طی فرآیند تخلیه سیلو ثبت و مورد بررسی قرار گرفت.

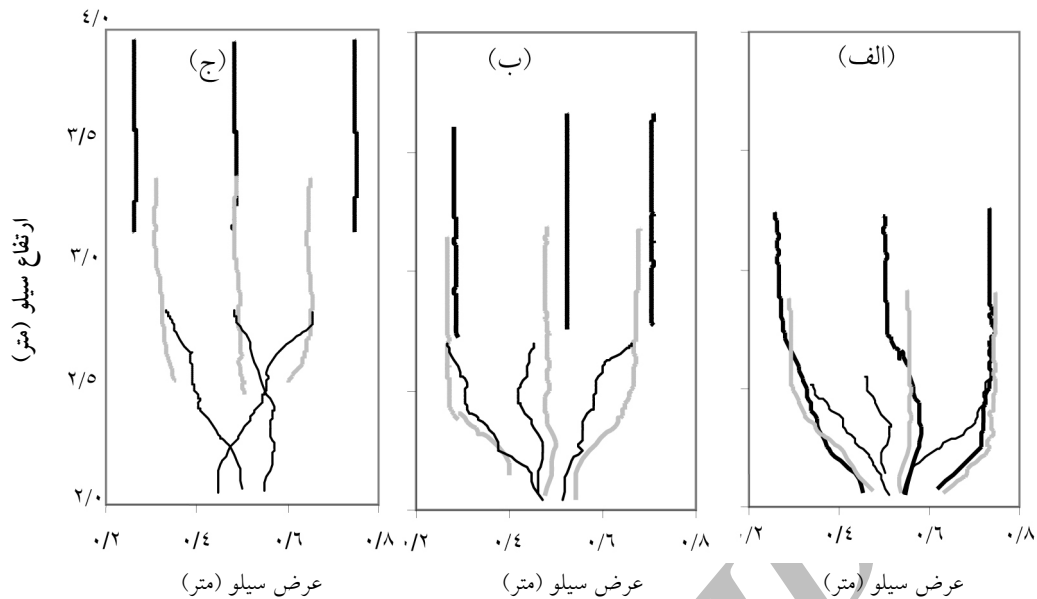
شکل ۵ مسیر حرکت دانه‌های انتخاب شده را در بسترهای مختلف نشان می‌دهد. برای تمام توده‌ها حرکت هم‌گرایی^۴ و قیفی^۵ شکل دانه‌ها که کافوی و تورنتون (۱۹۹۷) نیز در مطالعات خود گزارش داده‌اند، به خوبی در قسمت‌های پایین سیلو قابل مشاهده است. به‌طوری‌که در این قسمت‌ها دانه‌ها در عین حالی که حرکتی رو به پایین دارند حرکتی جانبی به سمت دریچه خروجی نیز می‌گیرند. در حالی که در بخش‌های بالایی سیلو^۶ در تمام توده‌ها حرکت دانه‌ها تقریباً مستقیم انجام شده و جریانی توده‌ای^۷ را نشان می‌دهند.



شکل ۴- نمونه‌ای از تشکیل پل در حین تخلیه مواد در توده‌ای از مواد میله‌ای با ضریب رعنایی ۴.

- 2- Bulk Scale
- 3- Particle Scale
- 4- Convergent
- 5- Funnel
- 6- Plug Flow Region
- 7- Mass Flow

- 1- Arch



شکل ۵- نحوه حرکت دانه‌ها در حین تخلیه مواد از سیلو برای توده‌های حاوی المان‌هایی با ضریب رعنایی مختلف: الف) ۱، ب) ۲، ج) ۳.

$$\text{نسبت انرژی} = \frac{E_r}{E_t} \quad (۲)$$

E_t و E_r به ترتیب عبارت‌اند از انرژی مربوط به حرکت چرخشی و حرکت خطی دانه برحسب نیوتن-متر که برابرند با:

$$E_t = 0.05 m v^2 \quad \text{و} \quad E_r = 0.05 I \omega^2 \quad (۳)$$

در این معادلات ω و v به ترتیب عبارت از جرم (کیلو گرم)، ممان اینرسی (کیلوگرم-متر^۲)، سرعت دورانی (رادیان بر ثانیه) و سرعت خطی (متر بر ثانیه) دانه هستند. چنانچه طبق تعریف بالا نسبت انرژی دانه‌ای در داخل یک توده زیاد باشد نشان‌دهنده این است که این دانه ضمن حرکت دارای چرخش نسبتاً زیادی بوده که این مستقل بوده و به راحتی می‌توانند ضمن حرکت بر روی هم بغلند، به عبارت دیگر ساختار بستر با تراکم کمتری همراه است و حرکت دانه‌ها راحت‌تر و آزادتر انجام شده و نشان‌دهنده مقاومت برشی کمتری در ساختار توده می‌باشد.

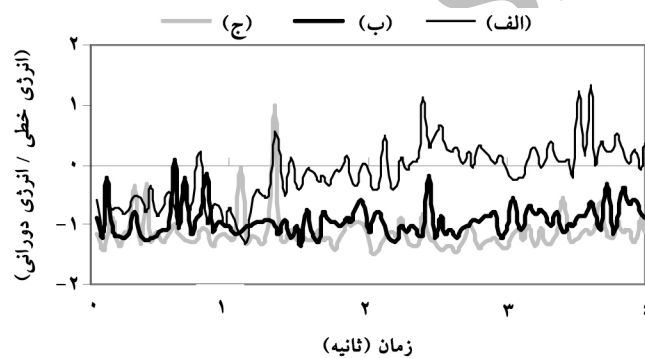
با توجه دقیق‌تر به شکل ۵ مشاهده می‌شود که ارتفاع ناحیه انتقالی^۱ (ناحیه‌ای که دانه‌ها از حرکت توده‌ای به حرکت قیفی تغییر وضعیت می‌دهند) در توده متشکل از دانه‌های میله‌ای بیشتر از مواد کروی می‌باشد ولی هسته مرکزی جریان^۲ در مواد میله‌ای باریک‌تر از مواد کروی می‌باشد (ژانگ و اوپی، ۱۹۹۸). علاوه بر این مسیر حرکت دانه‌ها در منطقه حرکت قیفی نشان می‌دهد که دانه‌های کروی مسیری را تقریباً یکنواخت و با کمترین تغییر جهت ناگهانی طی می‌کنند در حالی که مسیر حرکت دانه‌های میله‌ای غیر یکنواخت و با تغییر جهت‌های ناگهانی و متعدد همراه می‌باشد. این پدیده نشان می‌دهد که این دانه‌ها در حین حرکت مرتب به‌طور در هم‌دیگر قفل شده و نمی‌توانند مانند اجزایی مستقل به راحتی در داخل توده طی مسیر نمایند. این نحوه حرکت بسیار نزدیک به تخلیه مواد واقعی غیرکروی از سیلوهای کف مسطح می‌باشد.

نسبت انرژی دانه‌ها: رفتار دینامیکی بستر در مقیاس دانه‌ای می‌تواند از بعد انرژی هر دانه نیز مورد توجه قرار گیرد. چنانچه نسبت انرژی در یک دانه به صورت زیر تعریف گردد:

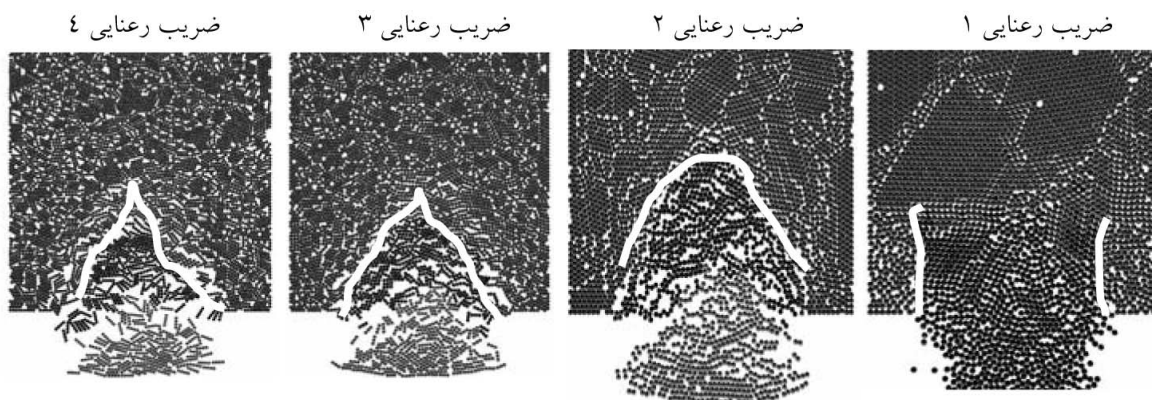
- 1- Transition Zone
- 2- Core Flow Zone

شکل ۶ متوسط نسبت انرژی دانه‌ها را در سه توده کروی و غیرکروی که از نتایج مدل استخراج شده‌اند را در طول تخلیه مواد از سیلو نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود اگرچه تقریباً در تمام توده‌ها انرژی دورانی دانه‌ها کمتر از انرژی خطی آنها بوده است ($1/0 <$ (انرژی خطی / انرژی دورانی) (Log) انرژی دورانی دانه‌های کروی به مراتب بیشتر از دانه‌های غیرکروی بوده است. بررسی دقیق‌تر حرکت دانه‌ها در سه بخش وسط و دو طرف چپ و راست سیلو نشان داد که بیشترین چرخش مربوط به دانه‌هایی است که در دو طرف دریچه خروجی قرار داشته‌اند. رائگ و همکاران (۱۹۹۵b) نیز در مطالعات خود به کمک مدلی با المان‌های دایره‌ای،

چرخش زیاد دانه‌ها را به‌خصوص نزدیک دریچه خروجی گزارش کرده‌اند. این نتایج مجدداً تأکید می‌کنند که توده‌های متشکل از دانه‌های کروی ضمن حرکت به سمت دریچه خروجی با غلتش روی همدیگر سبب جریانی روان و یکنواخت شده در حالی که در توده‌های غیرکروی به‌علت به‌هم قفل‌شدگی چرخش نداشته در نتیجه مقاومت برشی بیشتری از خود بروز داده و باعث می‌شوند جریان خروجی آهسته‌تر و غیریکنواخت باشد. شکل ۷ نحوه تشکیل باند برشی^۱ و فرم کلی آن را که منبعث از این رفتار مواد در مقیاس دانه‌ای است، در توده‌های غیرکروی و کروی به‌خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۶- متوسط نسبت انرژی دورانی به انرژی خطی دانه‌ها در حین تخلیه مواد برای توده‌ها با ضریب رعنایی مختلف: الف) ۱، ب) ۲، ج) ۳.



شکل ۷- شکل‌گیری باند برشی در توده‌های مختلف در حین خروج از سیلو. خطوط سفید رنگ محل تقریبی باندهای برشی را نشان می‌دهند.

در این شکل بخش‌های مختلف توده براساس وضعیت دینامیکی آنها به صورت رنگی کدگذاری شده‌اند به طوری که قسمت‌های قرمز بخش ساکن توده، قسمت آبی بخش جدا شده توده با سرعت کم و قسمت سبز بخش شتاب گرفته توده را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

با توجه به این که برآورد دقیق شدت جریان خروجی و نیروهای وارد بر دیواره‌های سیلو به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تحت تأثیر ساختار توده قبل از باز شدن دریچه خروجی و همچنین رفتار دینامیکی دانه‌ها در حین خروج می‌باشد و با توجه به نتایج به دست آمده از این

تحقیق، در هر دو مورد تفاوت عمده‌ای بین توده‌های کروی و غیرکروی وجود دارد لذا هر گونه مطالعه‌ای بر روی سیلوها به کمک مدل‌هایی با المان‌های کروی نمی‌تواند قابل تعمیم به مواد غیرکروی باشد. بنابراین لازم است در شبیه‌سازی این گونه مواد، دانه‌هایی ایجاد شوند که به شکل واقعی دانه‌ها نسبتاً نزدیک باشند. علاوه بر این با توجه به این که بیشتر محصولات کشاورزی از دانه‌های غیرکروی تشکیل شده‌اند، لازم است به منظور بهینه کردن طراحی سیلوها برای این گونه مواد مطالعات بیشتری در خصوص نحوه تخلیه مواد و نیروهای وارد بر جداره‌های متناسب با شکل دانه‌ها صورت گیرد.

منابع

1. Abbaspour-Fard, M.H. 2004. Theoretical Validation of a Multi-sphere, Discrete Element Model Suitable for Biomaterials Handling Simulation. *Biosystems Engineering*. 88(2):153-161.
2. Abbaspour-Fard, M.H. 2001. Discrete Element Modelling of the Dynamic Behaviour of Non-Spherical Particulate Materials, University of Newcastle Upon Tyne: Newcastle Upon Tyne. 158p.
3. Behringer, R.P., and Baxter, G.W. 1994. Pattern Formation and Complexity in Granular Flow., in *Granular Matter; An Interdisciplinary Approach*, A. Mehta, Editor. Springer-Verlag, New York, Pp: 85-119.
4. Cleary, P.W. 1999. The Effect of Particle Shape on Hopper Discharge. in *Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. CSIRO, Melbourne, Australia, Pp: 111-122.
5. Cundall, P.A., and Strack, O.D.L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*. 29:47-65.
6. Dobry, R., and Ng, T.T. 1992. Discrete modelling of Stress-Strain Behaviour of Granular materials at Small and Large Strain. *Engineering Computations*. 9: 129-143.
7. Foutz, T.L., and Thompson, S.A. 1993. Comparison of Loading Response of Packed Grain and Individual Kernel. *Trans. of ASAE*. 36(2): 569-576.
8. Kafui, K.D., and Thornton, C. 1997. Some Observation on Granular Flow in Hopper and Silos. P18-22. in *3rd International Congress on Micromechanics of Granular Media*. Durham, North Carolina, USA, May.
9. Kano, J. 1998. Simulation of Mass Flow Rate of Particles Discharged From Hopper by Particle Element Method. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 31(6): 936-940.
10. Langston, P.A., Tuzun, U., and Heyes, D.M. 1995. Discrete Element Simulation of Granular Flow in 2D and 3D Hoppers: Dependence of Discharge Rate and Wall Stress on Particle Interactions. *Chemical Engineering Science*, 50(6): 967-987.
11. Moysay, E.B., and Lambert, E.W. 1987. Flow Rates of Grains and Oilseeds Through Orifices. in *Particulate and Multiphase Processes*. Miami, USA: Hemisphere Publi. Corp, 391p.
12. Nedderman, R.M. 1985. The Flow of Granular Materials through Orifices. I.CHEM.E. Symposium Series No. 91, POWTECH 85 Particle Technology, Pp: 281-294.
13. Ng, T.T. 1996. Small-Strain Response of Random Array of Spheres Using Discrete Element Method. *Journal of Engineering Mechanics*, 43: 239-244.
14. Rong, G., Negi, S.C., and Jofriet, J.C. 1995a. Simulation of the Flow Behaviour of Bulk Solids in Bins, Part 1: Model Development and Validation. *Journal of Agric. Eng. Research*, 62:244-256.
15. Rong, G., Negi, S.C., and Jofriet, J.C. 1995b. Simulation of the Flow Behaviour of Bulk Solids In Bins, Part 2: Shear Bands, Flow, Corrective Inserts and Velocity Profile. *Journal of Agric. Eng. Research*, 62: 257-269.
16. Thornton, C., and Kafui, K.D. 1997. Numerical Simulations of Granular Flow in Hoppers and Silos. Pp: 26-28. In *The 2nd Israel Conference For Conveying and Handling of Particulate Solids*. Jerusalem, Israel May.
17. Zhang, K.F., and Ooi, J.Y. 1998. A Kinematics Model for Solids Flow in Flat-Bottomed Silos. *Geotechnique*, 48: 545-553.

Effect of Particle Shape on Bed Structure and Flow Characteristics of Materials Discharged from a Hopper Using a DE Model

***M.H. Abbaspour Fard¹, B. Emadi² and M. Khojastehpour³**

¹Assistant Prof., Dept., of Agricultural Machinery, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, ²Assistant Prof., Dept., of Agricultural Machinery, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, ³Assistant Prof., Dept., of Agricultural Machinery, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Abstract

Particle discharge from a flat bottom hopper has been performed employing a Discrete Element Model with Multi-sphere particles. A flat bottom hopper of 100cm width has been prepared using 3-dimensional particles in a vertical layer. Particulate assemblies comprising 5000 particles of equal volume but different aspect ratios ranging from 1 to 4 have been created using some non-overlapping spheres in order to investigate the effect of particle shape on bed structure and flow characteristics of particles. The particles all generated and deposited in an upper section with almost the same height and flow started by removing the orifice. The results showed a distribution of solid fraction within each bed, with the closest distribution to the normal distribution for the beds of elongated particles. The localised densely packed areas have been separated by voids caused by bridging of particles in the beds. Simulation results on silo discharge showed that the behaviour of beds of spherical particles was quite different from that of non-spherical particles. Spherical particles moved individually during flow and rolled over each other, resulting in a lower resistance to shear with a fluid-like flow, whereas elongated particles exhibited a stronger shear due to interlocking between particles, resulting in a flow, like a breaking continuum. This unique behaviour of spherical particles caused a higher flow rate than non-spherical particles. The formation of arching has been also simulated by the DE model. A qualitative correlation between the frequency of arching and aspect ratio has been recognised. More arching occurred as the aspect ratio of particles increased. Due to this behaviour of non spherical particles their observed flow rate was less than that of spherical particles. It can therefore be concluded that the results obtained from the DEM models with spherical particles cannot be generalised to real material comprising non-spherical particles.

Keywords: Discrete Element; Simulation; Particle shape; Silo

*- Corresponding Author; Email: Hossein_abbaspour@yahoo.co.uk