

# *Effect of Particle Shape on Bed* ساختار بستر مواد فله ای و خصوصیات جریان خروجی از مخازن و سیلوها با استفاده از شبیه سازی عددی به روش المان های مجزا (DEM)

محمد حسین عباسپور فرد<sup>۱</sup>

## چکیده

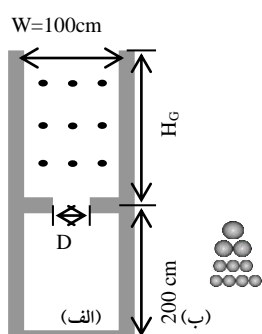
در این مطالعه با استفاده از شبیه سازی عددی بکمک یک مدل با المان های مجزا (DEM) اثر شکل دانه های متشکله توده بر روی ساختار بستر مواد و رفتار مواد در حین خروج از سیلو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از مدل نشان داد که ساختار بستر دانه های میله ای، به دلیل جهت های کاملاً تصادفی که در میان توده می گیرند، با خلل و فرج بمراتب بیشتری نسبت به مواد کروی همراه خواهد بود. بررسی رفتار اینگونه مواد در حین خروج نیز نشان داد که بدلیل قفل شدگی اینگونه دانه ها در هم، ایجاد و شکست متناوب پلهای لحظه ای در توده سبب جریان خروجی غیر یکنواخت و کند تری نسبت به توده های مواد کروی شکل می گردد. این نتایج نشان می دهند که نتایج بدست آمده از مطالعات انجام شده بر روی رفتار مواد دانه ای بکمک مدلهایی با المان های کروی نمی تواند قابل تعمیم به رفتار مواد حقیقی که دانه های آنها عموماً غیر کروی هستند باشد.

## ۱ مقدمه

شکل و اندازه دانه ها دو عامل جدا ناپذیر و مرتبط با هم هستند که در حیطه مکانیک مواد دانه ای و توصیف رفتار آنها نقش عمده ای ایفا می نمایند. مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهند که رفتار توده ای مواد غیر کروی، کاملاً متمایز از رفتار مواد کروی است، بگونه ای که مواد فله ای متشکل از دانه های غیر کروی به دلیل شکل دانه ها و خلل و فرج بوجود آمده کاملاً از رفتار انفرادی دانه ها متفاوت می باشد، *Foutz et al.* (1993). علاوه بر مطالعات از مایشگاهی، مطالعات عددی زیادی نیز بر روی رفتار مواد در سیلوه انجام پذیرفته است (e.g. *Rong et al.*, 1995). در میان روشهای عددی، شبیه سازی به روش المانهای مجزا<sup>۱</sup> (*DEM*) به عنوان یک ابزار موثر در اینگونه مطالعات شناخته شده است. با این وجود بیشتر این مدلها دارای المانهای کروی بوده اند. در این تحقیق به منظور بررسی اثرات شکل دانه ها بر روی ساختار مواد در سیلو های در حال انباشت و رفتار آنها در حین تخلیه از سیلو، از یک مدل *DEM* که قادر است سیلویی حاوی المان های غیر کروی نیز تولید نماید، استفاده شده است.

## ۲ روش تحقیق

به منظور انجام شبیه سازی از یک سیلوی مدل از نوع کف مسطح با عرض  $100\text{ cm}$  استفاده گردید. المان های سه بعدی به گونه ای در مدل ایجاد شدند، که نهایتاً به صورت یک لایه عمودی بر روی همدیگر مستقر گردیدند (سیلویی شبه سه بعدی). جهت بررسی اثرات شکل دانه ها چهار بار شبیه سازی با چهار شکل المان مختلف ولی حجم ثابت انجام پذیرفت، به گونه ای که چهار المان (دانه) کروی و میله ای شکل با نسبتهای طول به قطر<sup>۲</sup> ( $A.R$ ) مختلف از یک الی چهار ایجاد گردید (شکل ۱).



شکل ۱: (الف) شکل سیلو در مدل،  $H_G$  ارتفاع سیلو در بالا که برای مواد با شکلهای مختلف متفاوت می باشد. ● محل تقریبی دانه های انتخاب شده و نشان گذاری شده در سیلوی مدل. (ب): المان های (دانه ها) بکار رفته در مدل

حجم دانه ها در تمام بسترها یکسان بوده، لذا چنانچه دانه ای متشکل از یک کره منفرد ( $A.R=1$ ) و با شعاع واحد به عنوان دانه ی مبنا باحجم معین در نظر گرفته شود، هر دانه ای با  $n$  کره متشکله ( $A.R=n$ ) می بایست شعاع کرات متشکله ان برابر  $R_n = \left(\frac{1}{n}\right)^{\frac{1}{3}}$  باشد تا حجم دانه بوجود آمده برابر حجم دانه مبنا باشد. پس از ایجاد دانه ها در مدل با اعمال شتاب ثقل بر آنها اقدام به شبیه سازی انباشت توده مواد در سیلو گردید. این

<sup>1</sup> Discrete Element Method

<sup>2</sup> Aspect ratio

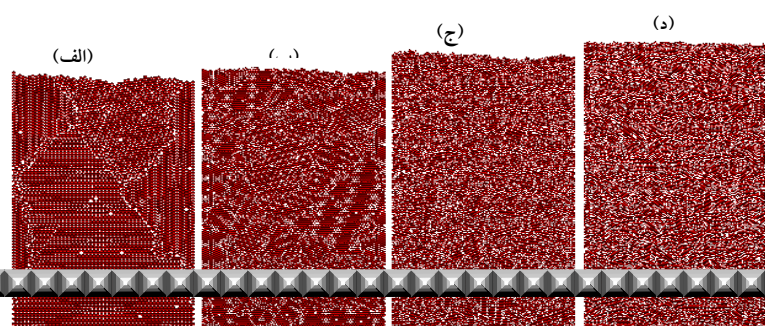
مرحله که عمل تحکیم<sup>۱</sup> نامیده می شود تا آنجا ادامه پیدا کرد که دانه ها به طور نسبی به حالت سکون درآیند. علاوه بر این به منظور بررسی اثر شکل دانه ها بر روی ساختار مواد<sup>۲</sup> در مرحله انباشت مستقل از اثر اصطکاک در مرحله تحکیم، ضریب اصطکاک بین دانه ها و بین دانه ها و دیواره ها، صفر منظور گردید. این موضوع همچنین باعث تسریع شبیه سازی مرحله تحکیم نیز می گردد. در انتهای مرحله تحکیم ضریب اصطکاک و دیگر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد مطابق جدول ۱ در مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱: پارامترها و خواص فیزیکی و مکانیکی بکار رفته در سیلوی مدل

عنوان	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	۳/۵	$GPa$
ضریب پواسیون مواد	۰.۳	-----
شعاع کره مبنای متشکله دانه ها	۱/۰	$cm$
ضریب میرایی مواد ( <i>Damping coefficient</i> )	۰/۵	-----
ضریب اصطکاک بین دانه ها	۰/۲	-----
ضریب اصطکاک بین دانه ها و دیواره سیلوی	۰/۵	-----
چگالی حقیقی دانه ها	۲/۶۵	$g/cm^3$
گام زمانی محاسبات در مدل ( <i>Time step</i> )	۰/۰۱	$ms$
تعداد دانه ها در سیلوی مدل	۵۰۰۰	-----
تعداد کرات متشکله دانه ها	۵۰۰۰	-----، ۱۰۰۰۰
	۱۵۰۰۰، ۲۰۰۰۰	

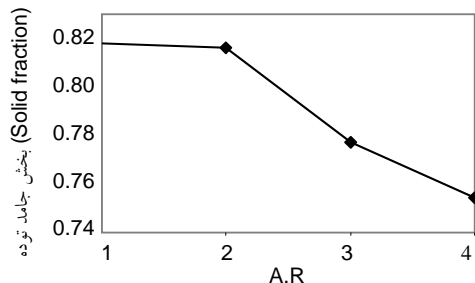
### ۳- نتایج و بحث

اثر شکل دانه ها بر روی ساختار مواد انباشته شده بر اساس فاکتورهایی شامل ارتفاع انباشت، توزیع بخش جامد مواد در داخل توده و شاخص تعداد نقاط تماس بین دانه ها مورد بررسی قرار گرفت. ارتفاع انباشت در انتهای مرحله تراکم برای بسترهایی با دانه هایی با نسبتهای مختلف طول به عرض در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، با افزایش  $A.R$  دانه ها، خلل و فرج بین آنها افزایش یافته که این امر باعث افزایش ارتفاع انباشت در اینگونه مواد می گردد. در طی مرحله تحکیم دانه های مطّول با جهت گیریهای مختلفی که می توانند بگیرند، قادرند خلل و فرجهایی با شکل و اندازه مختلف بوجود آورند. شکل ۳ متوسط بخش جامد (عکس میزان خلل و فرج) را برای بسترهای مختلف نشان می دهد. کاهش ایجاد شده در بخش جامد بستر مواد با دانه های مطّول (میله ای با  $A.R=4$ ) در مقایسه با بستر مواد کروی در مجموع حدود ۸٪ می باشد که بیشترین این کاهش بین بستر با  $A.R=4$  و با  $A.R=2$  ایجاد گردیده است. این امر بیان کننده این واقعیت است که اگر چه ممکن است مواد شبه کروی رفتاری نزدیک به رفتار مواد کروی داشته باشند، ولی رفتار مواد با دانه های میلّه ای شکل کاملاً متمایز از



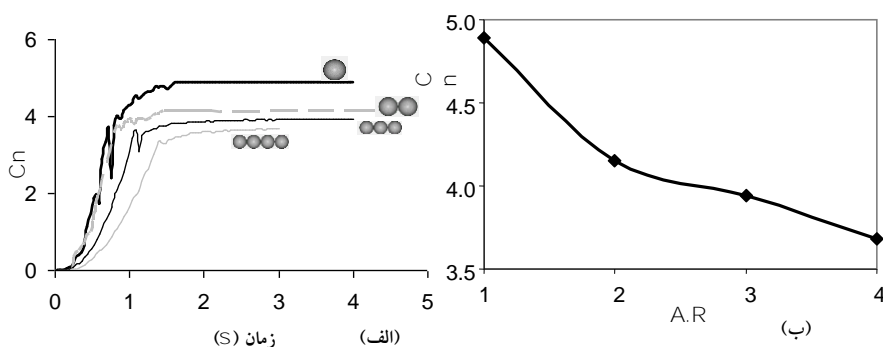
<sup>1</sup> Consolidation  
<sup>2</sup> Bed structure

رفتار مواد کروی شکل خواهد بود. لذا نتایج بدست آمده از آن دسته از مدل‌های عددی که شکل المان‌های بکار رفته در آنها دایره و یا کره فرض می‌گردد، نمی‌تواند بسادگی قابل‌تعمیم به رفتار مواد غیر کروی باشد.



شکل ۳: رابطه بین نسبت طول به عرض ( $A.R$ ) با بخش جامد توده مواد.

شاخص تماس بین دانه‌ها<sup>۱</sup> ( $C_n$ ) عبارتست از متوسط تعداد نقاط تماس به ازاء هر دانه در داخل توده مواد. این شاخص نیز با میزان پوکی توده مواد همبستگی دارد. شکل ۴ الف روند تغییرات این شاخص را برای بسترهای مختلف در طی مرحله تحکیم نشان می‌دهد. هنگامی که این شاخص برای یک توده تقریباً ثابت گردید بیان‌کننده پایان مرحله تحکیم می‌باشد. همانطور که در شکل ۴ (الف) مشخص است، علی‌رغم متفاوت بودن ارتفاع توده در بسترهای مختلف و متفاوت بودن روند تغییرات  $C_n$  در طی مرحله تحکیم، تمام توده‌ها پس از تقریباً ۱/۵ ثانیه به حالت پایداری رسیدند. شکل ۴ (ب) شاخص تماس بین دانه‌ها را در انتهای مرحله تحکیم برای بسترهای مختلف مواد نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، تفاوت فاحشی بین این شاخص در توده مواد کره‌ای و مواد میله‌ای وجود دارد. با تغییر شکل دانه‌ها از حالت کروی ( $A.R=1$ ) به سمت دانه‌های میله‌ای، این شاخص بتدریج کاهش یافته، نشان از پوکی‌تر بودن بستر مواد میله‌ای دارد. با این وجود بیشترین تفاوت بین این شاخص در بستر مواد کروی و مواد با دانه‌های با  $A.R=2$  (۱/۱۵٪) مشاهده گردید.

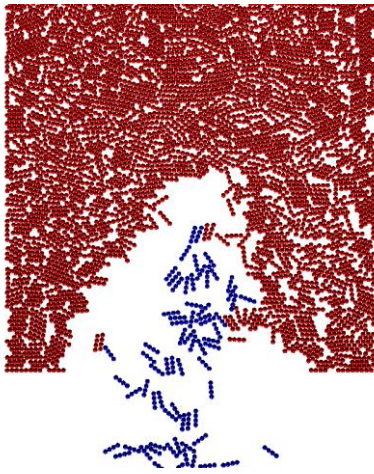


شکل ۴: (الف) تغییرات شاخص تماس بین دانه‌ها با  $A.R$  مختلف در حین تحکیم توده‌ها. (ب) شاخص تماس بین دانه‌ها در انتهای مرحله تحکیم برای توده‌های مختلف.

<sup>1</sup> Co-ordination number

رفتار دینامیکی مواد خروجی از سیلو تحت تاثیر ویژگیهای مختلف مواد موجود در آن می باشد. درک تقابل ایجاد شده بین دانه ها در حین خروج می تواند به بهبود طراحی سیلو ها و مخازن کمک نماید. اینگونه اطلاعات را بندرت می توان از طریق مطالعات فیزیکی و آزمایشگاهی بدست آورد. *Cleary, 1999* از طریق شبیه سازی عددی با استفاده از یک مدل دو بعدی نشان داد که ضمن اینکه رفتار مواد دانه ای میله ای از مواد کرووی کاملاً متفاوت بود، شدت جریان مواد خروجی نیز در این مواد تا ۳۰٪ نیز کمتر از مواد کرووی بود.

ثبت تغییرات بخش جامد توده در داخل سیلو در حین تخلیه مواد در مطالعه حاضر نشان داد که توده مواد کرووی (در مقایسه با مواد میله ای) در حین تخلیه ساختاری همگن تر و با بخش جامد بالاتری همراه بود. این امر بیان کننده این نکته است که دانه های کرووی حرکتی آزاد تر و روان تر در سیلو داشته، که این



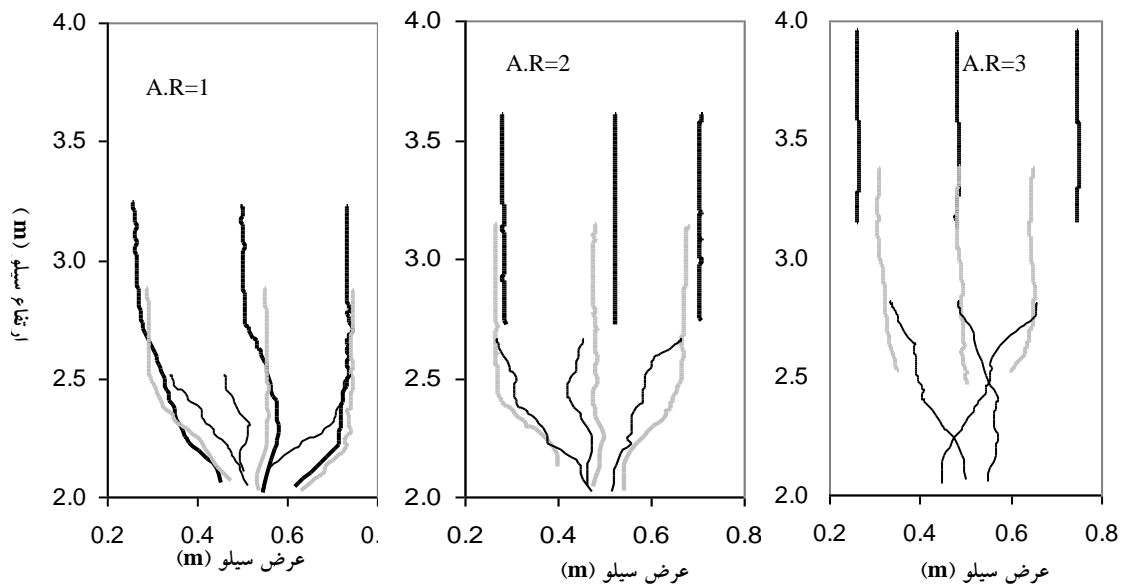
شکل ۵: نمونه ای از تشکیل پل در حین تخلیه مواد در توده ای از مواد میله ای با  $A.R=4$

مسئله سبب می شود تا اینگونه مواد با یکنواختی بیشتری از سیلو تخلیه گردند. با مشاهده تصاویر تهیه شده از داخل سیلو در مدل شبیه سازی شده ملاحظه گردید که در توده مواد میله ای با باز شدن دریچه خروجی و حرکت مواد به سمت پایین دانه ها در همدیگر قفل شده و متناوباً سبب تشکیل پل هایی<sup>۱</sup> به صورت لحظه ای می گردند. ایجاد پل در سیلو سبب می شود تراکم مواد در پایین سیلو کمتر از بالای آن گردیده، در نتیجه جریان خروجی از سیلو آهسته تر می گردد. شکسته شدن و تشکیل لحظه ای و متناوب پل در اینگونه توده ها باعث جریان خروجی نوسانی و غیر یکنواخت می گردد (شکل ۵).

بمنظور بررسی رفتار توده ها در حین تخلیه در مقیاس دانه

ای، با توجه به شکل ۱ تعداد ۹ دانه در محل هایی نسبتاً یکسان برای تمام توده ها انتخاب و نحوه حرکت آنها در طی فرآیند تخلیه سیلو ثبت و مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ مسیر حرکت دانه های انتخاب شده را در بسترهای مختلف نشان می دهد. برای تمام توده ها حرکت همگرایی و قیفی شکل دانه ها که *Kafui and Thornton, 1997* نیز در مطالعات خود مشاهده نمودند به خوبی در قسمتهای پایین سیلو قابل مشاهده است.

<sup>1</sup> Arch

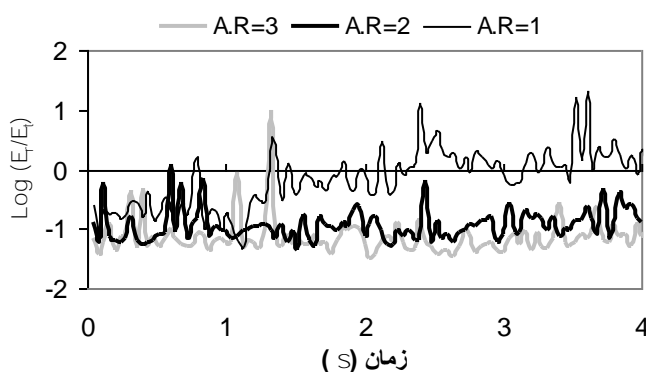


شکل ۶: نحوه حرکت دانه ها در حین تخلیه مواد از سیلو برای توده های مختلف.

به طوریکه در این قسمتها دانه ها در حالیکه حرکتی رو به پایین دارند، حرکتی جانبی به سمت دریاچه خروجی نیز می گیرند. در حالیکه در بخشهای بالایی سیلو در تمام توده ها حرکت دانه ها تقریباً مستقیم انجام شده و جریانی توده ای را نشان می دهند. با توجه دقیق تر به شکل ۶ مشاهده می گردد که ارتفاع ناحیه انتقالی ( ناحیه ای که دانه ها از حرکت توده ای به حرکت قیفی تغییر وضعیت می دهند) در توده متشکل از دانه های میله ای بیشتر از مواد کروی می باشد ولی هسته مرکزی جریان (آنچنانکه توسط Zhang and Ooi, 1998 تعریف شده است) در مواد میله ای باریکتر از مواد کروی می باشد. علاوه بر این مسیر حرکت دانه ها در منطقه حرکت قیفی نشان می دهد که دانه های کروی مسیری را که طی می کنند تقریباً یکنواخت بوده و با کمترین تغییر جهت ناگهانی هوراه است، در حالیکه مسیر حرکت دانه های میله ای غیر یکنواخت و با تغییر جهت های ناگهانی و متعدد همراه می باشد. این پدیده نشان می دهد که این دانه ها در حین حرکت مرتباً در همدیگر قفل گردیده و نمی توانند مثل اجزایی مستقل به راحتی در داخل توده طی مسیر نمایند. این نحوه حرکت بسیار نزدیک به تخلیه مواد واقعی غیر کروی از سیلو های کف مسطح می باشد.

رفتار دینامیکی بستر در مقیاس دانه ای می تواند از بعد انرژی هر دانه نیز مورد توجه قرار گیرد. چنانچه نسبت انرژی در یک دانه به صورت  $\frac{E_r}{E_t}$  تعریف گردد، بطوریکه  $E_r$  و  $E_t$  به ترتیب عبارت از انرژی مربوط به

حرکت چرخشی و حرکت خطی دانه باشد، چنانچه دانه ای در داخل یک توده نسبت انرژی آن طبق تعریف

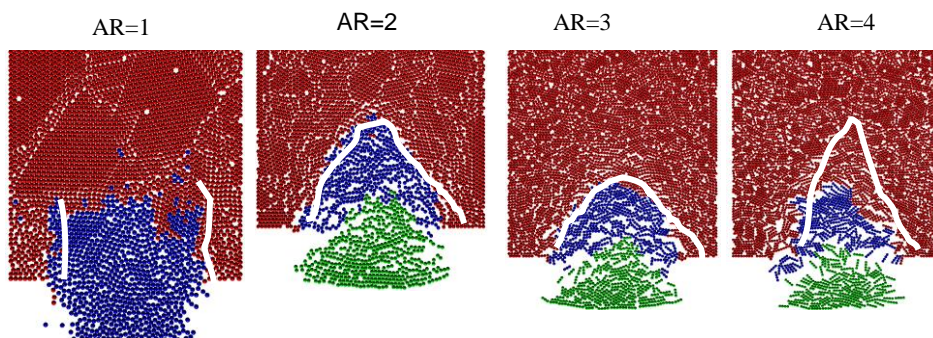


شکل ۷: متوسط نسبت انرژی دورانی به انرژی خطی دانه ها در حین

فوق زیاد باشد نشان دهنده اینست که این دانه ضمن حرکت دارای چرخش نسبتاً زیادی بوده که این از توده ای از مواد حکایت می کند که دانه های آن از هم مستقل بوده و به راحتی می توانند ضمن



حرکت بر روی هم بغلتند. شکل ۷ متوسط نسبت انرژی دانه ها را در سه توده کروی و غیر کروی که از نتایج مدل استخراج گردیده اند نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود انرژی دورانی دانه های کروی به مراتب بیشتر از دانه های غیر کروی بوده است. بررسی دقیق تر حرکت دانه ها در سه بخش وسط و دو طرف چپ و راست سیلونشان داد که بیشترین چرخش مربوط به دانه هایی است که در دو طرف دریچه خروجی قرار داشته اند. این نتایج مجدداً تاکید می کنند که توده های متشکل از دانه های کروی ضمن حرکت به سمت دریچه خروجی با غلتش روی همدیگر سبب جریانی روان و یکنواخت گردیده در حالیکه توده های غیر کروی به علت بهم قفل شدگی، چرخش نداشته در نتیجه مقاومت برشی بیشتری از خود بروز داده و باعث می شوند جریان خروجی آهسته تر و غیر یکنواخت باشد. شکل ۸ وضعیت باند برشی را در توده های غیر کروی و کروی به خوبی نشان می دهد. با توجه به اینکه بر آورد دقیق شدت جریان خروجی و نیرو های وارد بر دیواره های سیلو به طور مستقیم و غیر مستقیم متاثر از ساختار توده قبل از باز شدن دریچه خروجی و همچنین رفتار دینامیکی دانه ها در حین خروج می باشد و با توجه به نتایج بدست آمده از این تحقیق که به خوبی نشان داد در هر دو مورد، تفاوت عمده ای بین توده های کروی و غیر کروی وجود دارد، لذا هرگونه مطالعه ای بر روی سیلو ها به کمک مدل‌هایی با المان های کروی نمی تواند قابل تعمیم به مواد غیر کروی باشد. در نتیجه، لازم است در شبیه سازی اینگونه مواد، دانه هایی ایجاد گردد که به شکل واقعی دانه ها نسبتاً نزدیک باشند.



شکل ۸: شکل گیری باند برشی Shear Band در توده های مختلف در حین خروج از سیلو. خطوط سفید رنگ محل تقریبی باند های برشی را نشان می دهند

لیست مراجع:

1. Cleary, P.W. *The Effect of Particle Shape on Hopper Discharge*. in *Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. 1999. CSIRO, Melbourne, Australia.
2. Foutz, T.L. and S.A. Thompson, *Compariso of Loading Response of Packed Grain and Individual Kernel*. *Trans. of ASAE*, 1993. 36(2): p. 569-576.
3. Kafui, K.D. and C. Thorton. *Some Observation On Granular Flow in Hopper and Silos*. in *3rd International Congress on Micromechanics of Granular Media*. 1997. Durham, North Carolina, USA May.18-22.
4. Rong, G., S.C. Negi, and J.C. Jofriet, *Simulation of the Flow Behaviour of Bulk Solids in Bins, Part 1 :Model Development and Validation*. *Journal of Agricultural Engineering Research.*, 1995. 62: p. 244-256.

*Zhang, K.F. and J.Y. Ooi, A Kinematic Model for Solids Flow in Flat-Bottomed Silos. 5. Geotechnique, 1998. 48: p. 545-553.*