مطالعه اثرات شکل دانه ها بر روی ساختار بستر مواد فله ای و خصوصیات جریان خروجی از مخازن و سیلوها با استفاده از شبیه سازی عددی به روش المانهای مجزا (DEM)

Effect of Particle Shape on Bed Structure and Flow Characteristics of Particles Discharged from a Hopper

استاد یار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه فردوسي مشهد

E-mail: Hossein_abbaspour@yahoo.co.uk

Abaspour@ferdowsi.um.ac.ir

TEL: 05118795612-17

FAX: 0511-8787430

آدرس:

مشهد، فلكه پارك ملت، دانشكده كشاورزي دانشگاه فردوسي، صندوق پستي ۱۱۶۳- ۹۱۷۷۵

۱ مقدمه

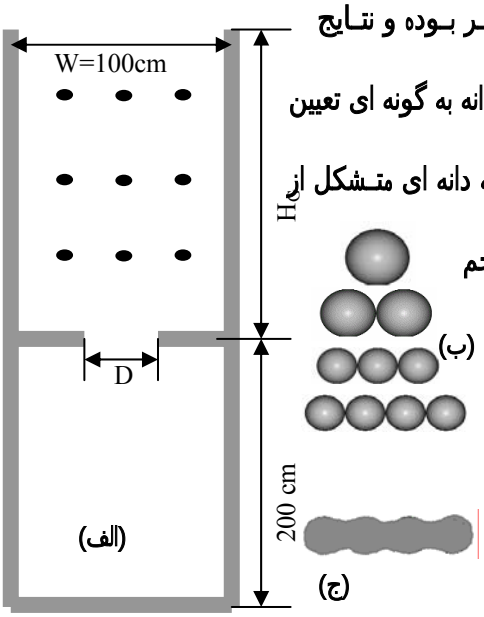
رفتار مواد دانه ای[1] اعم از مواد صنعتی و کشاورزی در طي فرايند هاي مختلف از مواردی است که همواره مورد توجه محققین بوده است. نتایج بدست آمده از اینگونه مطالعات نشان می دهند که شکل و اندازه دانه ها دو عامل جدا ناپذیر و مرتبط با هم هستند که در حیطه مکانیک اینگونه مواد و توصیف رفتار انها نقش عمده ای ایفا می نمایند. با این وجود اهمیت این دو عامل در مواردی وضعيتي مضاعف پیدا می کند. برای مثال در بخش فناوری پودرها (مثلاً ارد) دانه ها عموماً در حد میلی متر و نسبتاً همشکل هستند در حالیکه در مورد مواد کشاورزی تنوع زیادی هم در شکل و هم در اندازه دانه ها مشاهده می گردد. بطوریکه از اندازه های میلی متری در بذور سبریجات تا اندازه های چند ده سانتی متر در اکثر میوجات را شامل می گردند در حالیکه از نظر شکل نیز بسیار متنوع هستند. مطالعات انجام شده بر روی مواد غیر کروی نشان می دهد که نه تنها رفتار اینگونه مواد کاملاً متمایز از رفتار مواد کروی است بلکه رفتار مکانیکی مواد فله ای متشکل ازدانه های غیر کروی به دلیل شکل دانه ها و خلل و فرج بوجود امده کاملاً از رفتار انفرادی دانه ها متفاوت می باشد(Foutz et al. 1993). مضافا اینکه رفتار انفرادی دانه های غیر کروی در بارگذاریها در جهات مختلف نیز متفاوت می باشد (Moysay and Lambert, 1987). مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی جریان مواد دانه ای در سیلو ها نیز نشان می دهد که یکی از عوامل مهم در رفتار اینگونه مواد در سیلوها شکل دانه ها و یا اجزاء تشکیل دهنده مواد فله ای می باشد (Behringer and Baxter, 1994; Nedderman, 1985). با این وجود به دلیل عدم امکان مشاهده مواد در داخل سیلوها، نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه بسیار محدود می باشد. علاوه بر مطالعات از مایشگاهی، مطالعات عددی زیادی نیز بر روی رفتار مواد در سیلوها انجام پذیرفته است (Langston et al., 1997; Negi et al., 1997; Rong et al., 1995a, b). در میان روشهای عددی، شبیه سازی به روش المانهای مجزا[2] (DEM) به عنوان یک ابزار موثر در اینگونه مطالعات شناخته شده است. با این وجود به دلیل اینکه اکثر این مطالعات از طریق مدلهايي با المانهای دایره ای شکل (کروی در مدلهای سه بعدی) انجام گرفته است، نتایج این مطالعات به سادگی به رفتار مواد واقعی با دانه های غیر کروی (مثل اکثر میوه جات و غلات) قابل تعمیم نمی باشد. در این تحقیق به منظور بررسی اثرات شکل دانه ها بر روی ساختار مواد در سیلو های در حال انباشت و رفتار انها در حین تخلیه از سیلو از یک مدل DEM که قادر است سیلویی حاوی المانهای

[1] Particulate materials
[2] Discrete Element Method

غیر کروی نیز تولید نماید، استفاده شده است. این مدل بر مبنای روش کرات ترکیبي[1] استوار بوده (Abbaspour-fard, 2001) به گونه ای که هر المان غیر کروی در مدل از ترکیب با همپوشانی یا بدون همپوشانی دو یا چند کره ایجاد می گردد.

۲ روش تحقیق

به منظور انجام شبیه سازی از یک سیلوي مدل از نوع کف مسطح[2] با عرض ۱۰۰ cm (۵۰ برابر قطر کره بکار رفته برای تشکیل المانها در مدل) ایجاد گردید. المانهای سه بعدی به گونه ای در مدل ایجاد شدند که نهایتاً به صورت یک لایه عمودی بر روی همدیگر مستقرگردیدند (سیلویی شبه سه بعدی). سیلو از دو قسمت مجزای بالایی و پایینی تشکیل گردیده بطوریکه المانها ابتدا در قسمت بالا پس از تولید به صورت فله[3] انباشت گردیده و سپس با حذف دریچه، اجازه تخلیه مواد به قسمت پایین داده شود. شکل۱الف وضعیت و ابعاد سیلوی مدل را نشان می دهد. جهت بررسی اثرات شکل دانه ها چهار بار شبیه سازی با چهار شکل المان مختلف ولی حجم ثابت انجام پذیرفت (هر المان متشکل از یک الی چهار کره با ارایش خطی) به گونه ایکه چهار المان (دانه) میله ای شکل با نسبتهای طول به قطر[4] (A.R) مختلف از یک الی چهار ایجاد گردید (شکل۱ب). برای اینکه حجم مواد در سیلو برای تمام چهار نوع دانه برابر بوده و نتایج بدست امده قابل مقایسه باشند، می بایست اندازه کرات تشکیل دهنده هر دانه به گونه ای تعیین گردد که حجم هر چهار نوع دانه با A.R متفاوت، برابر باشند. لذا چنانچه دانه ای متشکل از یک کره منفرد (A.R=1) و با شعاع واحد به عنوان دانه ی مبنا باحجم



شکل ۱ : (الف) شکل سیلو در مدل، H_G ارتفاع سیلو در بالا که براي مواد با شکلهاي مختلف متفاوت مي باشد.• محل تقريبي دانه هاي انتخاب شده ونشان گذاري شده در سيلوي مدل. (ب) : المانهای (دانه ها) بکار رفته در مدل. تمام المانها دارای حجم یکسان بوده ولی نسبت طول به قطر در انها متفاوت بطوریکه برابر یک در بالاترین المان (کره) و چهار در پایین ترین المان . (ج) شکل واقعي يك دانه ميله اي با توجه به محدوده تماس بين دانه ها.

معین در نظر گرفته شود، هر دانه ای با n کره متشکله (A.R=n) می بایست شعاع کرات متشکله ان برابر:

[1] Multi- Sphere Method
[2] Flat Bottom
[3] Bulk
[4] Aspect ratio

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

باشد تا حجم دانه بوجود امده برابر حجم دانه مبنا باشد.

به منظور ایجاد توده ای کاملاً طبیعی در سیلو، در مرحله تولید دانه های غیر کروی، به هر دانه یک جهت تصادفی اختصاص یافت و سپس با اعمال شتاب ثقل بر انها اقدام به شبیه سازی انباشت توده مواد در سیلو گردید. این مرحله که عمل تحکیم[1] نامیده می شود تا انجا 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[2] 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 (Damping coefficient)	۰/۵	------
ضریب اصطکاک بین دانه ها	۰/۲	------
ضریب اصطکاک بین دانه هاودیواره سیلوی	۰/۵	------
چگالی حقیقی دانه ها	۲/۶۵	g/cm^3
گام زمانی محاسبات در مدل(Time step)	۰/۰۱	ms
تعداد دانه ها در سیلوی مدل	۵۰۰۰	------
تعداد کرات متشکله دانه ها	۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰،۲۰۰۰۰	------

۳- نتایج و بحث

۳-۱[3] ساختار بستر مواد فله

[1] Consolidation
[2] Bed structure
[3] Packing structure

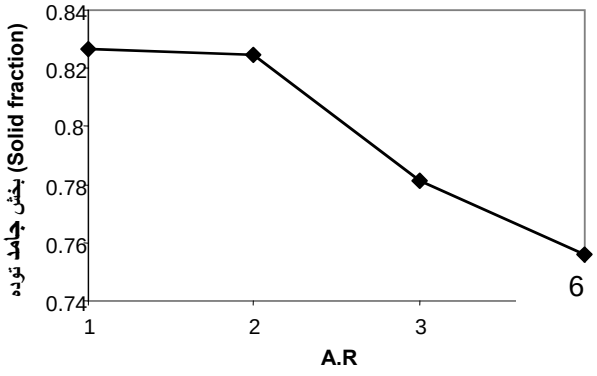
اثر شكل دانه ها بر روي ساختار مواد انباشته شده در انتهاي مرحله تحكيم، بر اساس فاكتورهايي شامل ارتفاع انباشت، توزيع بخش جامد مواد[1] در داخل توده، شاخص تعداد نقاط تماس بين دانه ها[2] و نيروي وارد بر كف سيلو كه از نتايج بدست آمده از شبيه سازي توسط مدل بدست آمد مورد بررسي قرار گرفت. ارتفاع انباشت در انتهاي مرحله تراكم براي بسترهايي از مواد با دانه هايي با نسبتهاي مختلف طول به عرض در شكل ۲ نشان داده شده است. همانطور كه در شكل مشخص است با افزايش A.R دانه هاي متشكله بستر، ارتفاع اوليه انباشت مواد افزايش مي يابد، اين امر نشان مي دهد كه با افزايش A.R دانه ها، خلل و فرج بين انها افزايش يافته كه اين امر باعث افزايش ارتفاع انباشت در اينگونه مواد مي گردد. در طي مرحله تحكيم نحوه حركت دانه هاي مطّول كاملاً متفاوت از دانه هاي كروي بوده بگونه ايكه دانه هاي مطّول با جهت گيريهاي مختلفي كه مي توانند بگيرند، قادرند خلل و فرجهايي با شكل و اندازه مختلف بوجود اورند. چون جهت گيري دانه ها تصادفي انتخاب ميگردد شكل و اندازه خلل و فرج ايجاد شده در بستر نيز تصادفي ايجاد خواهد شد. اين امر سبب مي گردد تا بستر اينگونه مواد متخلخل تر گرديده، چگالي ظاهري بستر كاهش يافته كه منجر به افزايش ارتفاع انباشت در انها مي گردد. در حاليكه در بستر مواد كروي چون اينگونه دانه ها ميتوانند به راحتي بر روي هم بغلتند قادرند فضاهاي بيشتري را در بين خود پر نموده، در هم قفل شدن دانه ها[3] كاهش يافته، در نتيجه بستري متراكم تر نسبت به دانه هاي غير كروي بوجود مي ايد. شكل۲ همچنين به خوبي نشان مي دهند كه بستر مواد كروي از طريق يك سري نواحي باريك با تخلخل بالا به صورت بلوكهايي از همديگر جدا مي گردند. اين نتايج با يافته هاي Dobry and Ng (1992) همخواني دارد كه بيان ميدارند توده هاي متشكل از دانه هاي يكنواخت كروي باعث ايجاد بلوك هايي مجزا از هم مي گردد كه در اثر پل بندي[4] بين ذرات بوجود مي ايند. با افزايش A.R دانه ها در بستر اندازه اين بلوك ها كاهش يافته و تعداد بلوكها با اشكال كاملاً تصادفي افزايش مي يابد كه نشان از بهم قفل شدگي بيشتر دانه هاي غير كروي مي دهد. اينگونه رفتار متفاوت در مواد كروي و غير كروي باعث بوجود آمدن بسترهايي با تخلخل مختلف مي گردد. شكل۳ متوسط بخش جامد (عكس ميزان خلل و فرج) را براي بسترهاي مختلف نشان مي دهد.اين فاكتور بيان كننده عكس ميزان پوكي توده مي باشد (توده هاي با بخش جامد بزرگتر متراكم تر مي باشند) كاهش ايجاد شده در بخش جامد بستر مواد با دانه هاي مطّول (ميله اي با A.R= ۴) در مقايسه با بستر مواد كروي در مجموع حدود ۸% مي باشد كه بيشترين اين كاهش بين بستر با A.R= ۴ و با A.R= ۲ ايجاد گرديده

[1] Material Solid Fraction
[2] co-ordination number
[3] Interlocking
[4] Bridging

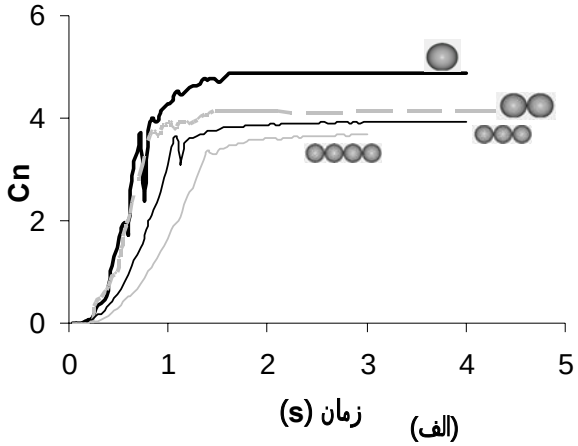
است. این امر بیان کننده این واقعیت است که اگر چه ممکن است مواد شبه کروي رفتاري نزدیك به رفتار مواد کروي داشته باشند ولي رفتار مواد با دانه هاي میله اي شکل کاملاً متمایز از رفتار مواد کروي شکل خواهد بود. لذا نتایج بدست امده از آن دسته از مدلهاي عددي که شکل المانهاي بکار رفته در انها دایره و یا کره فرض مي گردد نمي تواند بسادگي قابل تعمیم بـه رفتار مواد غیر کروي باشد. لذا کاربرد اینگونه مدلها در پیش بیني رفتار مواد غیر کروي نتایجي غیر واقع ارائه خواهند داد.

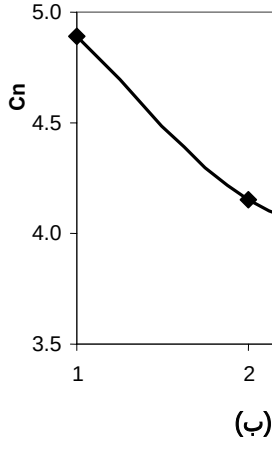
۳-۲ شاخص تماس بین دانه ها (C_n)[1]

.شاخص تماس بین دانه ها عبارتست از متوسط تعداد نقاط تماس به ازاء هر دانه در داخل توده مواد. این شاخص نیز با میزان پوکي[1] توده مواد همبستگي داشته و میتواند بعنوان فاکتوري جهت مقایسه ساختار بستر مواد مختلف مورد مقایسه قرار گیرد (Ng, 1996) . شکل۴ الف روند تغییرات این شاخص را که توسط مدل DEM برآورد شده است براي بسترهاي مختلـف مواد در مرحله تحکیم نشان مي دهد. . مرحله تحکیم از مرحله تولید دانه ها درحالتي جـدا از هـم و بـدون تمـاس بـا هـم (C_n=0) شروع و با اعماع شتاب ثقل بـر انهـا بـه کـف سـیلو ریخته شده که به تدریج سبب بالا رفـتن ایـن شـاخص در طـي مرحله تحکیم مي گردد. هنگامي که این شاخص براي یك توده تقریباً ثابت گردید بیان کننده پایان مرحله تحکیم مي باشد.



ـ۳: رابطه بین نسبت طول به عرض (A.R) کـه نمایـ
میله اي شکل بودن دانه است با بخش جامد توده مواد.





ین دانه ها با A.R مختلف در حین تحکیم توده ها. (ب) شاخص تماس بین دانه ها در انتهـاي

همانطور که در شکل۴ مشخص است علي رغم متفاوت بودن ارتفاع توده در بسترهاي مختلف و متفاوت بودن روند تغییرات C_n در طي مرحله تحکیم، تمام توده ها پس از تقریباً ۱/۵ ثانیه به حالت پایداري رسیدند. شکل۴ (ب) شاخص تماس بـین

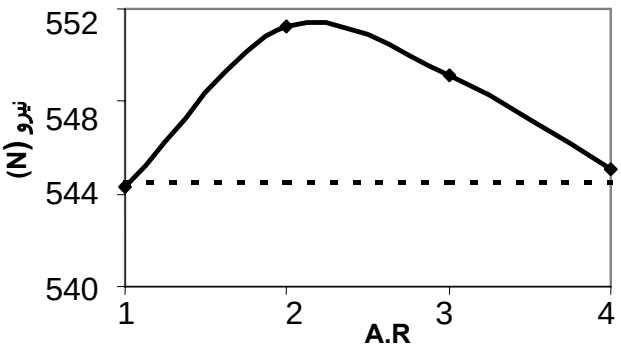
[1] Co-ordination Number

دانه ها را در انتهاي مرحله تحكيم براي بسترهاي مختلف مواد نشان مي دهد. همانطور كه مشاهده مي گردد، تفاوت فاحشي بين اين شاخص در توده مواد كره اي و مواد ميله اي مشاهده گرديد. با تغيير شكل دانه ها از حالت كروي (A.R=1) به سمت دانه هاي ميله اي، اين شاخص بتدريج كاهش يافته نشان از پوكي تر بودن بستر مواد ميله اي دارد. با اين وجود بيشترين تفاوت بين اين شاخص در بستر مواد كروي و مواد با دانه هاي با A.R= ۲ (۱۵/۱ %) مشاهده گرديد.

۳-۳ نيروي اعمال شده بر كف سيلو

همانطور كه قبلاً اشاره شد به منظورحذف اثر اصطكاك بر روي ساختار بستر مواد در مرحله تحكيم، شبيه سازي تحكيم در حالت بي اصطكاكي انجام گرفت. به عبارت ديگر ضريب اصطكاك بين دانه ها و بين دانه ها و ديواره ها در مرحله تحكيم در مدل صفر منظور گرديد. علاوه بر اين علي رغم اينكه شكل دانه ها در بسترها مختلف بود ولي وزن هر دانه (حجم) در تمام بسترها يكسان منظور گرديد. بدين لحاظ هرگونه اختلاف در نيروي اعمال شده از طرف دانه ها به كف سيلو تنها مي تواند مرتبط با ساختار بسترها باشد. در مورد تمام بسترها جمع كل نيروهاي وارد ازطرف دانه ها به كف در انتهاي مرحله تحكيم در مدل ثبت و استخراج گرديد. شكل۵ مقدار اين نيرو را براي هريك از بسترها نشان مي دهد.

با توجه به خواص فيزيكي در نظر گرفته شده براي دانه ها در مدل وزن كل دانه ها درهر توده ۵۴۴/۵N بوده است . همانطور كه در شكل نشان داده شده است در تمام توده ها نيروي وارد ازطرف توده به كف سيلو بسيار نزديك به وزن توده بوده است به طوريكه در مورد مواد كروي و مواد ميله اي (A.R= ۴) اين تفاوت قابل اغماض مي باشد (تقريباً ۰/۲%). بيشترين اختلاف مربوط به بستري با دانه هاي با ۲ =A.R بوده است كه اختلافي معادل ۱/۲۵ % داشته است.



شكل۵ : نيروي كل اعمال شده از طرف توده به كف سيلو براي دانه هاي با A.R مختلف. خط چين بيانگر وزن واقعي توده مي باشد.

در حاليكه در يك محيط بدون اصطكاك در تمام بستراين تفاوت بايستي ناچيز باشد. به منظور بررسي علت امر، ثبت تعداد كل نقاط تماس بين دانه ها (نقاط تماس بين كرات متشكله هر دانه با كف) نشان داد كه بيشترين تعداد نقاط تماس مربوط به

[1] Dilation

بستر با A.R= ۲ بوده است. لذا اين مسئله به پديده ميرايي[1] در نقاط تماس مرتبط دانسته شد. چون در مدلهاي DEM نيروي ميرايي در هر نقطه تماس و بر اساس سرعت نسبي نقاط تماس به طور مجزا محاسبه ميگردد لذا هر چه نقاط تماس بيشتر باشد نيروي ميرايي بيشتري منظور گرديده و لذا تفاوت يا خطاي بيشتري ايجاد خواهد شد. به منظور اثبات اين امرمجموع نيروي ميرايي محاسبه شده براي كل نقاط تماس بين دانه ها و كف سيلو در انتهاي مرحله تحكيم نيز در مدل محاسبه و ثبت گرديد. نتيجه اين محاسبات نشان داد كه كل نيروي ميرايي براي دانه هاي كروي ۰/۴% نيروي وزن دانه ها بوده در حاليكه براي بستري با دانه هاي با A.R= ۲ اين نيرو برابر ۱/۰۵ % بود. لذا مي توان نتيجه گرفت كه اختلاف ايجاد شده در محاسبه نيروي وارد بر كف سيلو و وزن دانه ها صرفاً ناشي از خطاي ايجاد شده در محاسبه ميزان نيروي ميرايي در دانه هاي متشكل از چند كره مي باشد. به منظور كاهش و يا حذف اين گونه خطا ها توصيه مي گردد در مواردیكه يك دانه (متشكل از چند كره[2]) با دانه اي ديگر و يا سطحي از چند نقطه در تماس است نيروي ميرايي فقط براي يك نقطه محاسبه گردد.

۴ اثر شكل دانه بر روي جريان خروجي مواد از سيلو

رفتار ديناميكي مواد خروجي از سيلو تحت تاثيرويژگيهاي مختلف موادموجود در ان مي باشد. درك تقابل ايجاد شده بين دانه ها در حين خروج مي تواند به بهبود طراحي سيلو ها و مخازن كمك نمايد. اينگونه اطلاعات را بندرت مي توان از طريق مطالعات فيزيكي و ازمايشگاهي بدست آورد. اگر چه مطالعاتي از طريق شبيه سازي عددي با مدلهاي DEM انجام گرفته است با اين وجود بيشتر اين مطالعات با استفاده از مدلهايي انجام شده است كه المانهاي كروي (دايره اي) داشته اند (Langston, et al., 1995; Thorton and Kafui, 1997; Kano, et al., 1998).

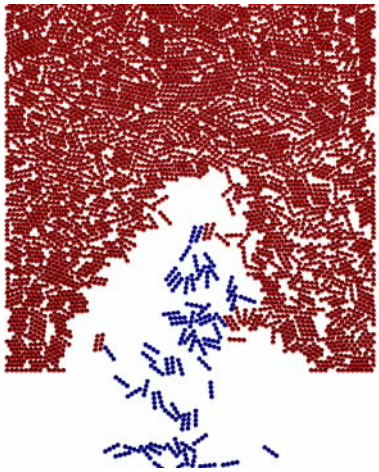
Cleary, 1999 از طريق شبيه سازي عددي باستفاده از يك مدل دو بعدي مطالعاتي در زمينه تاثير شكل دانه ها بر روي رفتار ديناميكي مواد هنگام خروج از سيلو انجام داد. در اين مدل از المانهاي دايره اي، بيضوي و مربعي شكل استفاده گرديد. المانهاي غير دايره اي بكمك توابع درجه دو[3] ايجاد گرديد. نتايج اين شبيه سازي نشان داد كه ضمن اينكه رفتار مواد دانه اي ميله اي[4] از مواد كروي كاملاً متفاوت بود، شدت جريان مواد خروجي نيز در اين مواد تا ۳۰ % نيز كمتر از مواد كروي بود.

[1] Damping
[2] Multi-sphere Particle
[3] Quadric Function
[4] Elongated Particles

در تحقيق حاضر مطعالعه بيشتري بر روي اثر شكل دانه بر رفتار ديناميكي مواد هنگام خروج از سيلو از طريق شبيه سازي توده هاي تحكيم يافته كه در بخش۲ مورد بحث قرار گرفت صورت پذيرفت. در اين مطالعه فاكتورهايي مثل رديابي حركت دانه ها[1] در حين خروج از سيلو، جهت حركت دانه ها در سيلو، انرژي جنبشي دانه ها، چرخش دانه ها و سرعت عمودي و افقي دانه ها در سيلو مورد ثبت و بررسي قرار گرفت.

۴-۱ توسعه و تغيير بخش جامد توده در طي خروج مواد از سيلو

ثبت تغييرات بخش جامد توده درداخل سيلو در حين تخليه مواد نشان داد كه توده مواد كروي (در مقايسه با مواد ميله اي) در حين تخليه ساختاري همگن تر و با بخش جامد بالاتري همراه بود. اين امر بيان كننده اين نكته است كه دانه هاي كروي حركتي ازاد تر و روان تر در سيلو داشته كه اين مسئله سبب مي شود تا اينگونه مواد با يكنواختي بيشتري از سيلو تخليه گردند. در حاليكه درمواد ميله اي با داشتن بخش جامد غير يكنواخت و نا همگن هم در بخشهاي مختلف سيلو و هم نسبت به زمان در طي تخليه، نشان از يك جريان خروجي غير يكنواخت دارند. با مشاهده تصاوير تهيه شده از داخل سيلو در مدل شبيه سازي شده ملاحظه گرديد كه در توده مواد ميله اي با باز شدن دريچه خروجي و حركت مواد به سمت پايين دانه ها در همديگر قفل شده و متناوباً سبب تشكيل پلهايي[2] به صورت لحظه اي مي گردند. ايجاد پل در بخشهاي بالايي سيلو سبب مي شود تراكم مواد در پايين سيلو كمتر از بالاي ان گرديده در نتيجه جريان خروجي از سيلو آهسته تر مي گردد. شكسته شدن و تشكيل لحظه اي و متناوب پل در اينگونه توده باعث جريان خروجي نوساني و غير يكنواخت مي گردد. شكل۴ نمونه اي از تشكيل يك پل لحظه اي را در بستر مواد ميله اي نشان ميدهد.



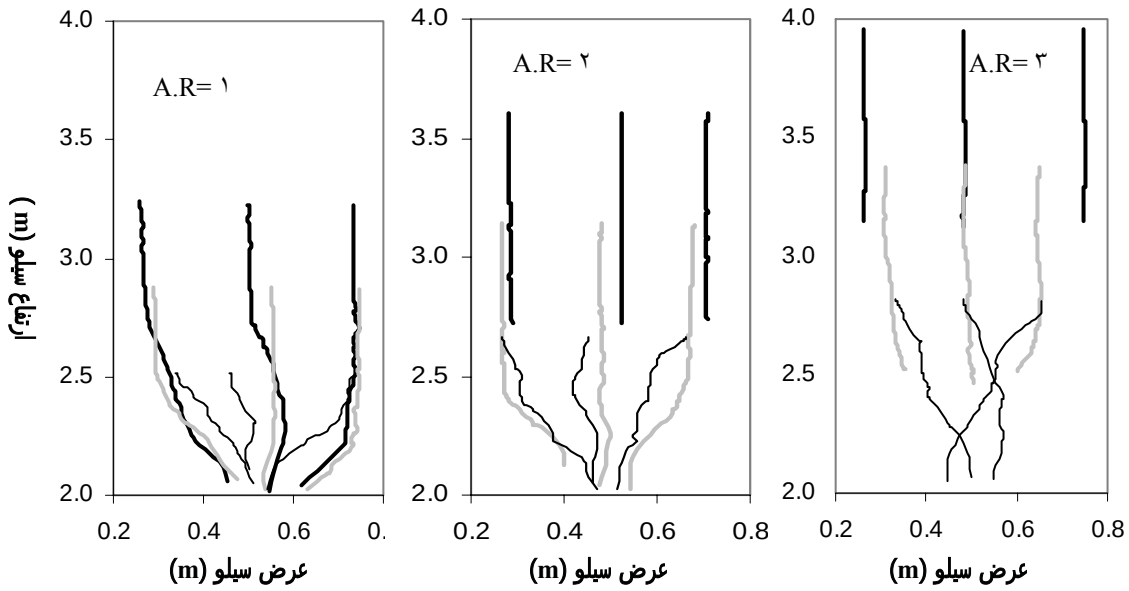
شكل۴ : نمونه اي از تشكيل پل در حين تخليه مواد در توده اي از مواد ميله اي با A.R=۴

۴-۲ بررسي نحوه حركت دانه ها در حين خروج

[1] Particle Track
[2] Arch

بحث ارائه شده در بخش ۱-۴ بیشتر به رفتار مواد در مقیاس کلي توده[1] مربوط مي گردد. در این بخش رفتار دینامیکي مـواد در مقیاس دانه اي[2] با دنبال کردن و ثبت حرکات تعدادي دانه انتخاب شده در داخل هر توده مورد بررسي قـرار مـي گیـرد. بدین منظور در داخل هر توده و با توجه به شکل۱ تعداد ۹ دانه در محل هایي نسبتاً یکسان براي تمـام تـوده هـا انتخـاب و سرعت، دوران و جابجایي انها در طي فرایند تخلیه سیلو ثبت و مورد بررسي قرار گرفت.

شکل۷ مسیر حرکت دانه هاي انتخاب شده را در بسترهاي مختلف نشان مي دهد. براي تمام توده ها حرکـت همگرایـي[3] و قیفي[4] شکل دانه ها که **Kafui and Thornton, 1997** نیز در مطالعات خود مشاهده نمودنـد بـه خـوبي در قـسمتهاي پایین سیلو قابل مشاهده است. به طوریکه در این قسمتها دانه ها در عین حالیکه حرکتي رو به پایین دارند حرکتي جانبي بـه سمت دریچه خروجي نیز مي گیرند. در حالیکه در بخشهاي بالایي سیلو[5] در تمام توده ها حرکت دانه ها تقریبا مستقیم انجام شده و جریاني توده اي[6] را نشان مي دهند.



شکل۷ : نحوه حرکت دانه ها در حین تخلیه مواد از سیلو براي توده هاي مختلف.

با توجه دقیق تر به شکل۷ مشاهده مي گردد که ارتفاع ناحیه انتقالي[7] (ناحیه اي که دانه ها از حرکت تـوده اي بـه حرکـت قیفي تغییر وضعیت مي دهند) در توده متشکل از دانه هاي میله اي بیشتر از مواد کروي مي باشد ولي هسته مرکزي جریـان[1]

[1] Bulk Scale
[2] Particle Scale
[3] Convergent
[4] Funnel
[5] Plug flow region
[6] Mass Flow
[7] Transition zone

(انچنانکه توسط Zhang and Ooi, 1998 تعريف شده است) در مواد ميله اي باريکتر از مواد کروي مي باشد. علاوه بر اين مسير حرکت دانه ها در منطقه حرکت قيفي نشان مي دهد که دانه هاي کروي مسيري را تقريباً يکنواخت و بـا کمتـرين تغيير جهت ناگهاني طي مي کنند در حاليکه مسير حرکت دانه هاي ميله اي غير يکنواخت و با تغيير جهت هـاي ناگهـاني و متعدد همراه مي باشد. اين پديده نشان مي دهد که اين دانه ها در حين حرکت مرتباً در همديگر قفل گرديده و نمـي تواننـد مثل اجزايي مستقل به راحتي در داخل توده طي مسير نمايند. اين نحوه حرکت بسيار نزديك به تخليه مواد واقعي غير کروي از سيلو هاي کف مسطح مي باشد.

۴-۳ نسبت انرژي دانه ها

رفتار ديناميکي بستر در مقياس دانه اي مي تواند از بعد انرژي هر دانه نيز مورد توجه قرار گيرد. چنانچه نسبت انرژي در يك دانه به صورت زير تعريف گردد:

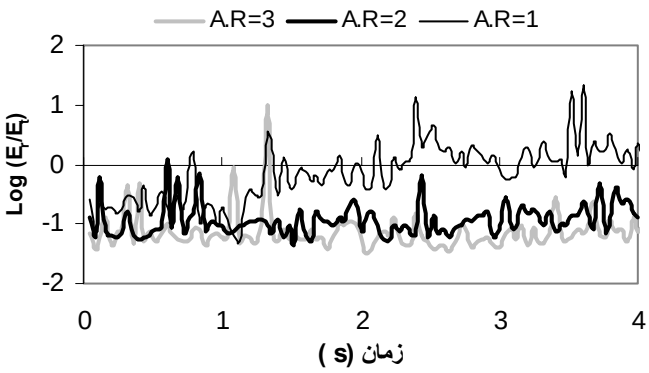
$$\text{نسبت انرژي} = \frac{E_r}{E_t} \qquad (۲)$$

بطوريکه E_r و E_t به ترتيب عبارتند از انرژي مربوط به حرکت چرخشي و حرکت خطي دانه که برابرند با:

$$E_t = ۰/۵\, mv^2 \quad \text{و} \quad E_r = ۰/۵\, I\omega^2 \qquad (۳)$$

در اين معادلات m ، I ، ω و v به ترتيب عبارتند از جرم، ممان اينرسي، سرعت دوراني و سرعت خطي دانه. چنانچه دانه اي در داخل يك توده نسبت انرژي ان طبق تعريف فوق زياد باشد نشان دهنده اينست که اين دانه ضمن حرکت داراي چرخش نسبتاً زيادي بوده که اين حکايت از توده اي از مواد را مي کند که دانه هاي ان از هم مستقل بوده و به راحتي مي توانند ضمن حرکت بر روي هم بغلتند، به عبارت ديگر ساختار بستر با تراکم کمتري همراه است و حرکت دانه ها راحت تـر و ازاد تـر انجام گرديده و نشان دهنده مقاوت بزشي کمتري در ساختار توده مي باشد.

شکل۸ متوسط نسبت انرژي دانه ها را در سه توده کروي و غير کروي که از نتايج مدل استخراج گرديده اند را در طول تخليه مواد از سـيلو نـشان مـي دهـد. همـانطور کـه ملاحظه مي شود اگر چه تقريباً در تمام توده ها انرژي دوراني دانه ها کمتر از انرژي خطي انهـا



شکل۹ : متوسط نسبت انرژي دوراني به انرژي خطي دانه ها در حين تخليه مواد براي توده هاي مختلف

بوده است ($\mathbf{Log\ E_r / E_t < ۱/۰}$) انرژي دوراني دانه هاي كروي به مراتب بيشتر از دانه هاي غير كروي بوده است. بررسي دقيق تر حركت دانه ها در سه بخش وسط و دو طرف چپ و راست سيلونشان داد كه بيشترين چرخش مربوط به دانه هايي است كه در دو طرف دريچه خروجي قرار داشته اند. **Rong et al., 1995** نيز در مطالعات خود به كمك مدلي با المانهاي دايره اي، چرخش زياد دانه ها را علي الخصوص نزديك دريچه خروجي گزارش كرده است. اين نتايج مجدداً تاكيد مي كنند كه توده هاي متشكل از دانه هاي كروي ضمن حركت به سمت دريچه خروجي با غلتش روي همديگر سبب جرياني روان و يكنواخت گرديده در حاليكه در توده هاي غير كروي به علت بهم قفل شدگي چرخش نداشته در نتيجه مقاومت برشي بيشتري از خود بروز داده و باعث مي شوند جريان خروجي آهسته تر و غير يكنواخت باشد. شكل۷ وجود و عدم وجود باند برشي[1] را در توده هاي غير كروي و كروي به خوبي نشان مي دهد.

با توجه به اينكه بر آورد دقيق شدت جريان خروجي و نيرو هاي وارد بر ديواره هاي سيلو به طور مستقيم و غير مستقيم متاثر از ساختار توده قبل از باز شدن دريچه خروجي و همچنين رفتار ديناميكي دانه ها در حين خروج ميباشد و با توجه به نتايج بدست امده از اين تحقيق كه به خوبي نشان داد در هر دو مورد تفاوت عمده اي بين توده هاي كروي و غير كروي وجود دارد لذا هرگونه مطالعه اي بر روي سيلو ها به كمك مدلهايي با المانهاي كروي نمي تواند قابل تعميم به مواد غير كروي باشد. لذا لازم است در شبيه سازي اينگونه مواد، دانه هايي ايجاد گردد كه به شكل واقعي دانه ها نسبتاً نزديك باشد.

ليست مراجع:

1. Abbaspour-Fard, M.H., *Discrete Element Modelling of the Dynamic Behaviour of Non-Spherical Particulate Materials*, . 2001, University of Newcastle Upon Tyne: Newcastle Upon Tyne.
2. Behringer, R.P. and G.W. Baxter, *Pattern Formation and Complexity in Granular Flow.*, in *Granular Matter; An Interdisciplinary Approach*, A. Mehta, Editor. 1994, Springer-Verlag: New York. p. 85-119.
3. 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, Melbourn, Australia.
4. Dobry, R. and T.T. Ng, *Discrete modelling of Stress -Strain Behavlour of Granular*

[1] Shear Band

materials at Small and Large Strain. Engineering Computations, 1992. **9**: p. 129-143.

5. 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.

6. 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.

7. Kano, J., *et al.*, *Simulation of Mass Flow Rate of Particles Discharged From Hopper by Particle Element Method.* Journal of Chemical Engineering of Japan, 1998. **31**(6): p. 936-940.

8. Langston, P.A., U. Tuzun, and D.M. Heyes, *Discrete Element Simulation of Granular Flow in 2D and 3D Hoppers: Dependence of Discharge Rate and Wall Stress on Particle Interactions.* Chemical Engineering Science, 1995. **50**(6): p. 967-987.

9. Moysay, E.B. and E.W. Lambert. *Flow Rates of Grains and Oilseeds Through Orifices.* in *Particulate and Multiphase Processes*. 1987. Miami, USA: Hemisphere Publi. Corp.

10. Nedderman, R.M., *The Flow of Granular Materials Through Orifices.* I.CHEM.E. Symposium Series No. 91, POWTECH 85 Particle Technology, 1985: p. 281-294.

11. Ng, T.T., *Small- Strain Response of Random Array of Spheres Using Discrete Element Method.* Journal of Engineering Mechanics, 1996: p. 239-244.

12. Rong, G., S.C. Negi, and J.C. Jofriet, *Simulation of the Flow Behavlour of Bulk Solids in Bins,Part 1 :Model Development and Validation.* Journal of Agricultural Engineering Research., 1995a. **62**: p. 244-256.

13. Rong, G., S.C. Negi, and J.C. Jofriet, *Simulation of the Flow Behaviour of Bulk Solids In Bins, Part 2 : Shear Bands, Flow, Corrective Inserts and Velocity Profile.* Journal of Agricultural Engineering Research., 1995b. **62**: p. 257-269.

14. Thornton, C. and K.D. Kafui. *Numrical Simulations of Granular Flow in Hoppers and Silos.* in *The 2nd Israel Conference For Conveying and Handling of Particulate Solids.* 1997. Jerusalem, Israel May. 26-28.

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