شبیه سازی رفتار دینامیکی مواد دانه ای با استفاده از نرم افزار PFC[1] (۲۲۱)

صادق افضلی نیا[2]

چکیده

PFC نرم افزاری است که رفتار مکانیکی مواد دانه ای را به روش المانهای مجزا (DEM) شبیه سازی و تجزیه و تحلیل می کند. در این مدل المانها به صورت ذرات کروی (هر چند المانهای غیر کروی نیز با ترکیب المانهای کروی قابل حصول هستند) با اندازه های مختلف و سطوح نگهدارنده مواد به صورت دیواره ایجاد می وند. اطلاعات ورودی این مدل، خواص فیزیکی و مکانیکی مواد دانه ای و سطوح نگهدارنده و اطلاعات خروجی آن شامل سرعت و موقعیت ذرات، تنش بین ذرات، نیروها و گشتاورهای وارده بر دیواره ها، انواع انرژی های تولید شده در مدل و برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی مجهول مواد دانه ای می باشند. محاسبات در مدل PFC بر اساس قانون دوم تن و قانون نیرو-جابجائی صورت می گیرد. حرکت هر ذره که حاصل نیروهای تماسی و داخلی ذرات می باشد، با استفاده از قانون دوم نیوتن برآورد می شود. نیروهای تماسی که حاصل حرکت نسبی ذرات در نقاط تماس می باشند از طریق قانون نیرو-جابجائی محاسبه می شوند. از جمله مهمترین کاربردهای PFC در کشاورزی اندازه گیری زاویه پایداری و تخلخل مواد دانه ای، برآورد خواص مکانیکی مواد دانه ای با شبیه سازی آزمایش سه محوری، تخمین نیروهای وارد بر تیغه ی در حال کار در خاک با شبیه سازی حرکت تیغه در خاک و شبیه سازی جریان کود و بذر در کودپ ها و بذر پاش ها می باشند که در این مقاله به برخی ازآنها پرداخته می شود.

کلید واژه: شبیه سازی، المانهای مجزا، ذرات کروی وPFC

1-Particle Flow Code

۲- استاد یار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فرس، شیراز،
پست الکترونیک: sja925@mail.usask.ca

مقدمه

تحلیل رفتار دینامیکی مواد دانه ای اطلاعات لازم جهت طراحی و اصلاح و بهینه سازی تجهیزاتی که با اینگونه مواد سرو کار دارند را فراهم می سازد. تحلیل این رفتار با استفاده از مدلهای فیزیکی و آزمایشگاهی بسیار پر هزینه و زمان بر می باشد و حتی بعضی از خصوصیات این مواد ممکن است از طریق مدلهای فیزیکی قابل حصول نباشند. امروزه به لطف پیشرفت تکنولوژی و ظهور کامپیوترهای پر سرعت، مدلهای تئوری و عددی گسترش زیادی یافته اند که تحلیل رفتار دینامیکی وخصوصیات فیزیکی مواد را ساده تر کرده اند. مدلهای تئوری و عددی این قابلیت را دارند که با صرف زمان و هزینه کم، بیشترین اطلاعات را در مورد رفتار دینامیکی مواد دانه ای در اختیار قرار دهند. ضمن اینکه قادرند رفتار تک تک دانه ها را به صورت انفرادی مورد مطالعه قـ ار داده و با تغییر اطلاعات ورودی که اکثرا خواص فیزیکی مواد هستند، اثراین تغییرات را به صورت آنی در رفتار دینامیکی مجموعه و تک تک دانه ها نشان دهند. مدلهای عددی تحلیل رفتار دینامیکی مواد دانه ای معمولا بر اساس روش المانهای مجزا (DEM) طراحی می شوند.

مدل عددی بر اساس المانهای مجزا اولین بار توسط کاندال و استرک[1] (۱۹۷۹) در سال ۱۹۷۹ میلادی معرفی شد[۳]. در روش المانهای مجزا اثر متقابل ذرات (همکنش) به عنوان یک فرایند دینامیکی در نظر گرفته می شود که بعد از موازنه نیروهای داخلی به تعادل استاتیکی می رسد. نیروهای تماسی بین ذرات و جابجائیهای صورت گرفته در یک مجموعه ذرات تحت تنش، با رصد کردن حرکت تک تک ذرات قابل تعیین است. حرکات در چنین مجموعه ای نتیجه انتشار تلاطم حاصل از حرکت ذرات، حرکت دیواره ها و یا نیروهای داخلی می باشند. این یک فرایند دینامیکی است که در آن سرعت انتشار آشفتگی بستگی مستقیم به خواص فیزیکی ذرات تشکیل دهنده آن مجموعه دارد. جهت ایجاد ذرات در محیط المانهای مجزا، داشتن اطلاعات کامل در مورد شکل و پراکندگی اندازه ذرات بسیار مهم است. در روش المانهای مجزا ذرات کروی این مزیت را دارند که محاسبات مربوط به آنها بسیار ساده است. فاویر و همکاران[2] (۱۹۹۹) گزارش نمودند که نمایش شکل ذرات جزء مدلهای فیزیکی مهمی است که دقت شبیه سازی در روش المانهای مجزا را تحت تاثیر قرار می دهد[۴]. بنابراین تلاشهای زیادی صورت گرفته است تا شکلهای مختلف ذرات را در مدل المانهای مجزا مورد بررسی قرار دهند. موضوع کلیدی در DEM این است که سعی شود شکل ذرات نهایت شباهت را به ذرات واقعی داشته باشند. تینگ و همکاران[3] (۱۹۹۵) المانهای بیضوی با نسبت شکل بزرگ تر از یک را جهت نمایش ذرات مورد استفاده قرار دادند[۱۰].

نینگ و همکاران[4] (۱۹۹۷) شکستگی توده های لاکتوز در اثر ضربه را با استفاده از تعداد زیادی کره بررسی نمودند. پیوندهای بین کرات با استفاده از مدلهای مختلف سختی تماسی نرمال و رفتار مماسی اعمال گردید[۹]. جن ن و همکاران[5] (۱۹۹۹) یک سیستم دانه ای را با استفاده از خوشه های دو بعدی مدل کردند که شامل سه دایره هم قطری بود که در داخل یک مثلث قرار داشتند. آنها به این نتیجه رسیدند که در تست برش به دلیل محدود شدن دوران ذرات در خوشه های دو بعدی ، مقاومت برشی مجموعه افزایش می یاب [۵] . نی و همکاران[6] (۲۰۰۰) مجموعه ذرات خوشه ای با قطر ذرات مختلف را جهت شبیه سازی آزمایش برش مستقیم مورد استفاده قرار دادند[۸]. لندری و همکاران[7] (۲۰۰۲) خواص کودهای حیوانی جامد و نیمه جامد را با ایجاد ذرات خوشه ای و غیر خوشه ای در محیط PFC در کانتینرهای با اشکال مختلف مورد مطالعه قرار دادند[۶]. مانی و همکاران[8] (۲۰۰۳) تلاش نمودند فرایند تراکم پودر بقایای ذرت را با استفاده از نرم افزار PFC شبیه سازی کنند. جهت واسنجی مدل، نتایج این مدل عددی را با نتایج آزمایشات واقعی مقایسه نمودند که نتایج اولیه همخوانی خوبی بین نتایج مدل عددی و نتایج آزمایشات واقعی نشان نداد[۷]. افضلی نیا و همکاران (۲۰۰۳) فرایند تراکم علوفه در بیلرهای مکعبی بزرگ را با استفاده از نرم افزار PFC شبیه سازی نموده و نیروهای وارد بر پیستون بیلر را بر آورد کردند. نتایج نشان داد که خطای برآورد نیروها در حد قابل

1 Strack& Cundall
2 et al. Favier
3 et al. Ting
4 Ning et al.
5 Jensen et al.
6 Ni et al.
7 Landry et al
8 et al Mani

قبولی است [۱]. در این مقاله ضمن معرفی نرم افزار PFC ، ویژگیها ، اصول و معادلات ریاضی آن تشریح شده و نمونه هـائی از کاربرد این نرم افزار در مدل نمودن رفتار دینامیکی مواد دانه ای کشاورزی ارائه می گردد.

معرفی مدل

PFC نرم افزاری است که رفتار دینامیکی مواد دانه ای را به روش المانهای مجزا (DEM) شبیه سازی و تجزیه و تحلیل می کند و نتایج را به صورت داده و نمودار در اختیار کاربر قرار می دهد. هدف اصلی و اولیه طراحـی ایـن نـرم افـزار، حـل مسائل مربوط به معادن بوده است اما در کشاورزی نیز کاربرد گسترده ای یافته است. در ایـن نـرم افـزار المانهـا بـه صـورت ذرات کروی با اندازه های مختلف و سطوح نگهدارنده مواد به صورت دیواره ایجـاد مـی شـوند. محاسـبات در مـدل PFC بـر اسـاس فرضیات زیر استوار است:

۱- ذرات مانند اجسام صلب عمل می کنند.
۲- تماس بین ذرات در سطح بسیار کوچک صورت می گیرد.
۳- ذرات صلب در نقاط تماس می توانند همپوشانی داشته باشند.
۴- میزان همپوشانی بسیار کوچک بوده و متناسب با میزان نیروی تماسی است که از قانون نیرو-جابجائی تبعیت می کند.
۵- ذرات در نقاط تماس می توانند با هم پیوند برقرار کنند.
۶- تمام ذرات کروی هستند، هر چند میتوان با ترکیب ذرات کروی شکلهای دلخواه ساخت.

محاسبات در مدل PFC بر اساس قانون دوم نیوتن و قانون نیرو-جابجائی صورت می گیرد. حرکت هر ذره که حاصـل نیروهای تماسی و داخلی ذرات می باشد، با استفاده از قانون دوم نیوتن برآورد می شود. نیروهای تماسی که حاصل حرکـت نـسبی ذرات در نقاط تماس می باشند از طریق قانون نیرو-جابجائی محاسبه می شوند. بنابراین چرخه محاسبات یک الگوریتم گام زمـ نی است که از اعمال مکرر قانون دوم نیوتن به ذرات و قانون نیرو-جابجائی به نقاط اس و به روز کردن پیوسته موقعیت دیـواره هـا شکل می گیرد. در اثنای شبیه سازی ، تماسهای موجود بین دو ذره و یا بین یک ذره و دیواره به طور اتوماتیک شکل می گ رند و شکسته می شوند. در ابتدا مجموعه ای از تماسها ی مربوط به ذرات و موقعیت دیواره های از پیش تعیین شده به روز می شـوند و سپس قانون نیرو-جابجائی به هر س اعمال می شود تا نیروهای تماسی بین دو پدیده (بین دو ذره یا بین ذره و دیواره) در نقاط تماس و مدل ساختاری تماس را به روز کند. آنگاه قانون دوم نیوتن (قانون حرکت) به هر ذره اعمال می شود تا سرعت و موقعیـت ذره را بر اساس نیروی برآیند و گشتاور حاصل از نیروهای تماسی و داخلی اعمال شده بـه ذره محاسـبه و بـه روز کنـد. همچنـین سرعت دیواره ها بر اساس سرعت اعمال شده به آنها مشخص می گردد [۲].

محاسبات ریاضی

قانون نیرو-جابجائی در نقطه تماس $X_i^{(c)}$ که روی صفحه تماس قرار دارد عمل می کند. ایـن صـفحه تمـاس بـه وسیله بردار نرمال واحد n_i تعریف می شود. نحوه تماس بین دو ذره (کره) در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین تماس بین ذره و دیواره در شکل (۲) آورده شده است. موقعیت نقطه تماس $X_i^{(c)}$ به وسیله فرمول های زیر تعریف می شود:

$$x_i^{(C)} = x_i^{[A]} + \left(R^{[A]} - \frac{1}{2}U^n \right) n_i \quad \text{(بین دو ذره)} \qquad (۱)$$

$$x_i^{(C)} = x_i^{[B]} + \left(R^{[B]} - \frac{1}{2}U^n \right) n_i \quad \text{(بین ذره و دیواره)} \qquad (۲)$$

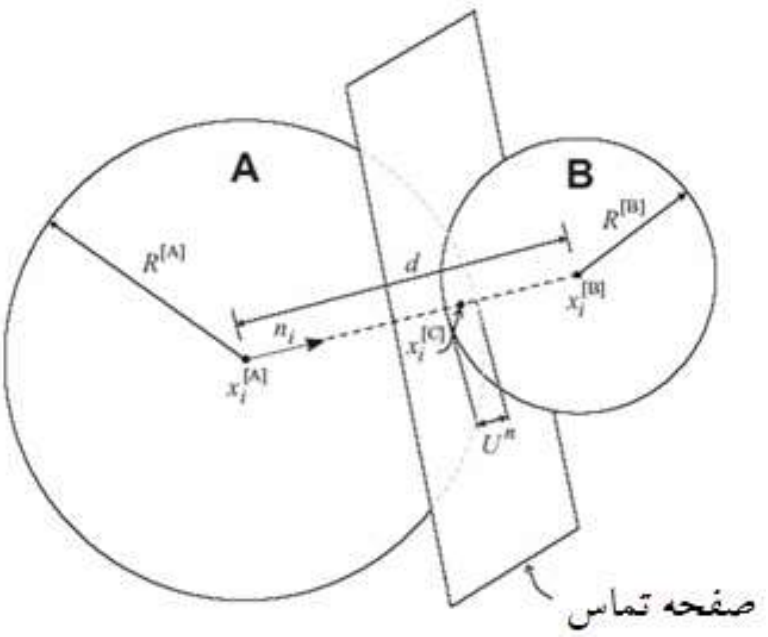
$$n_i = \frac{x_i^{[B]} - x_i^{[A]}}{d} \qquad (۳)$$

$$d = \sqrt{\left(x_i^{[B]} - x_i^{[A]}\right)^2} \qquad (۴)$$

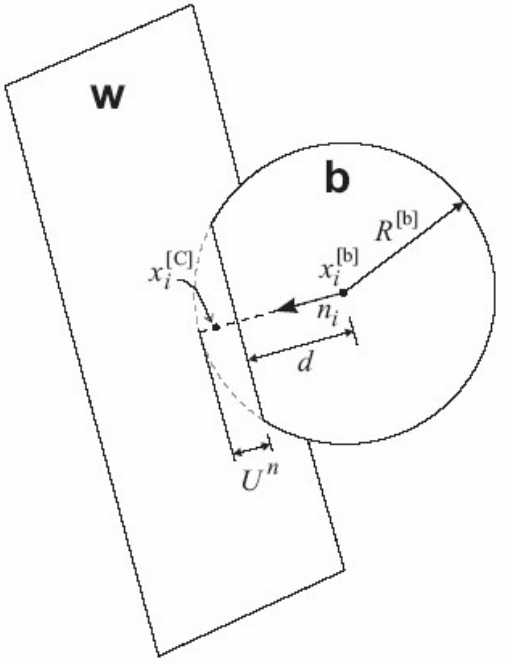
$$U_n = R^{[A]} + R^{[B]} - d \quad \text{(بین دو ذره)} \qquad (۵)$$

$$U_n = R^{[B]} - d \quad \text{(بین ذره و دیواره)} \qquad (۶)$$

در این فرمول ها n_i بردار نرمال واحد، $x_i^{[A]}$ و $x_i^{[B]}$ بردار موقعیت مراکز ذرات ، d فاصله بین مراکز دو ذره، U_n میزان همپوشانی بین دو ذره یا بین ذره و دیواره و R شعاع ذره می باشند.



شکل ۱ - نحوه تماس دو ذره (کره) B وA در مدل PFC



شکل۲- نحوه تماس ذره (کره) b و دیواره w در مدل PFC

بردار نیروهای تماسی F_i نسبت به صفحه تماس به دو مولفه نرمال و برشی تجزیه می شود:

$$F_i = F_i^n + F_i^s \qquad (۷)$$

که در آن F_i^n نیروی تماسی نرمال و F_i^s نیروی تماسی برشی است. بردار نیروی تماسی نرمال (F_i^n) از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$F_i^n = K^n U^n n_i \qquad (۸)$$

که در این فرمول K^n سختی نرمال در نقطه تماس است. نیروی تماسی برشی بر اساس یک الگوی تجمعی یا افزایشی محاسبه می شود. زمانی که تماس شکل گرفت، مجموع نیروهای تماسی برشی صفر در نظر گرفته می شود. هر افزایش جابجائی برشی نسبی بعدی باعث افزایش در نیروی برشی الاستیک می شود که به مقدار نیروی اولیه اضافه می شود. بنابراین بردار نیروی برشی جدید با اضافه کردن میزان افزایش بردار نیرو در هر گام زمانی به مقدار بردار نیروی موجود در ابتدای گام زمانی به دست می آید. حرکت هر ذره با استفاده از برآیند بردار نیرو و گشتاور اعمال شده بر آن محاسبه شده و به صورت دو پدیده حرکت انتقالی یک نقطه در روی ذره و حرکت دورانی ذره بیان می شود. معادله حرکت انتقالی به صورت برداری زیر نوشته می شود:

$$F_i = m(\ddot{x} - g_i) \qquad (۹)$$

در این فرمول F_i برآیند نیروهای خارجی اعمال شده به ذره ، m جرم کل ذره و g_i بردار شتاب نیروهای داخلی است. معادله حرکت دورانی به فرم برداری زیر نوشته می شود:

$$M_i = \dot{H}_i \qquad (۱۰)$$

در این معادله M_i برآیند گشتاورهای اعمال شده بر ذره و H_i اندازه حرکت زاویه ای ذره می باشد. برای یک ذره کروی به شعاع Rکه جرم آن به طور یکنواخت در سراسر حجم آن پراکنده شده است، مرکز جرم بر مرکز هندسی کره منطبق می شود. بنابراین:

$$M_i = I\dot{\omega}_i = \left(\frac{2}{3}mR^2\right)\dot{\omega}_i \qquad (۱۱)$$

معادلات (۹) و (۱۱) با استفاده از روش اختلاف محدود مرکزی با گام زمانی Δt با هم ترکیب می شوند. کمیتهای M_i ، F_i ، $\dot{x}_i$ ، $\dot{\omega}_i$ و x_i درگامهای زمانی اولیه $t \pm n\Delta t$ محاسبه می شوند در حالی که کمیتهای $\dot{x}_i$ و ω_i در گامهای زمـ نی میانه $t \pm n\frac{\Delta t}{2}$ محاسبه می گردند. شتابهای مورد نیاز معادلات (۹) و (۱۱) به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\ddot{x}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t}\left(\dot{x}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} - \dot{x}_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})}\right) \qquad (۱۲)$$

$$\dot{\omega}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t}\left(\omega_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} - \omega_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})}\right) \qquad (۱۳)$$

و سرعتها در زمانهای $t \pm \frac{\Delta t}{2}$ از فرمولهای زیر به دست می آیند:

$$\dot{x}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{x}_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \left(\frac{F_i^{(t)}}{m} + g_i\right)\Delta t \qquad (۱۴)$$

$$\omega_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \omega_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \left(\frac{M_i^{(t)}}{I}\right)\Delta t \qquad (۱۵)$$

در نهایت موقعیت جدید مرکز ذره با استفاده از معادلات فوق تعیین و به صورت زیربیان می گردد:

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} \Delta t \qquad (۱۶)$$

بنابراین در چرخه محاسباتی PFC با داشتن کمیتهای $\dot{x}_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})}$، $x_i^{(t)}$، $\omega_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})}$، $M_i^{(t)}$، $F_i^{(t)}$ و اعمال معادلات ۱۴ و ۱۵، $\omega_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})}$ و $\dot{x}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})}$ به دست می آیند و سپس با استفاده از معادله ۱۶ ، $x_i^{(t+\Delta t)}$ تعیین می گردد. همچنین مقادیر $F_i^{(t+\Delta t)}$ و $M_i^{(t+\Delta t)}$ که باید در چرخه بعد مورد استفاده قرار گیرند، با استفاده از قانون نیرو–جابجائی تعیین می گردند.

نحوه شبیه سازی ، پردازش داده ها ونتایج مدل

نرم افزار PFC این قابلیت را دارد که براساس نوع آزمایش و تجزیه و تحلیل مورد نیاز ظرف یا سطوح نگهدارنده ذرات را طراحی نموده و ذرات تولید شده را در ظرف طراحی شده قرار داده تا در زمان مناسب فرایند تراکم ذرات صورت گیرد. مراحل طراحی مدل در نرم افزار PFC به شرح زیر می باشد:

۱- طراحی سطوح نگهدارنده ذرات: این سطوح به صورت دیواره های مرزی مدل طراحی می شوند تا ذرات ایجاد شده در درون آنها قرار گیرند. در زمان معرفی ابعاد دیواره ها، باید سطح داخلی آنها (سطحی که با ذرات در تماس خواهد بود) نیز برای سیستم تعریف شوند. جهت اعمال نیرو به مجموعه ذرات از همین دیواره ها استفاده می شود.

۲- ایجاد ذرات: بعد از ایجاد سطوح نگهدارنده ، ذرات کروی که نقش مواد دانه ای را بازی می کنند با دامنه شعاع مشخص ایجاد می شوند. دامنه شعاع انتخاب شده برای ذرات همان دامنه شعاع واقعی مواد شبیه سازی شده است که در طبیعت وجود دارد. البته به دلیل اینکه ذرات ابتدا به صورت بی وزن (بدون اعمال شتاب جاذبه) ایجاد می شوند، شعاع ذرات به صورت کسری از شعاع واقعی تعریف شده تا ذرات به راحتی در ظرف طراحی شده گنجانده شوند و سپس با اعمال ضریب مناسب شعاع ذرات به شعاع واقعی افزایش می یابند.

۳- اعمال شرایط اولیه و مرزی: از دیواره های ایجاد شده می توان برای اعمال شرایط مرزی استفاده کرد. مثلا با اعمال سرعتی معین (ثابت یا متغیر) به یکی از دیواره ها و یا کنترل سرعت دیواره با استفاده از یک سیستم خود کار شرایط مرزی اعمال می شود. همچنین با ایجاد صفحه ای از ذرات متصل به هم و اعمال سرعت ثابت به آن یا ثابت نگهداشتن آن می توان شرایط مرزی را برای سیستم تعریف کرد. شرایط اولیه را معمولا با تغییر در تخلخل اولیه سیستم به طوری که ایجاد میزان معینی تنش در سیستم کند اعمال می کنند.

۴- انتخاب مدل تماسی و خواص مواد: ذرات به واسطه نیروهائی که در نقاط تماس گسترش می یابند، بر همدیگر و دیواره ها اثر می گذارند . نوع رفتار فیزیکی که در نقطه تماس شکل می گیرد بوسیله مدل تماسی تعیین می گردد. هر مدل تماسی ممکن است حد اکثر شامل سه قسمت مدل سختی تماس، مدل لغزش و مدل پیوندی باشد. مدل سختی تماسی یک رابطه ارتجاعی بین نیروی تماسی و جابجائی نسبی مربوطه فراهم می کند. سختی تماسی شامل سختی تماسی برشی و سختی تماسی نرمال می باشد که نیروی تماسی برشی و نرمال را به جابجائی نسبی مربوطه شان مرتبط می سازد. در PFC دو نوع مدل سختی تماسی در نظر گرفته می شود که شامل مدل خطی و مدل ساده شده هرتز–میندلین می باشد(۲). در مدل خطی رابطه یرو و تغییر مکان نسبی رابطه ای خطی است که شیب این خط سختی تماس می باشدکه خود تابعی از سختی های ذاتی دو پدیده در حال تماس است. در حالی که رابطه نیرو و تغییر مکان نسبی در مدل هرتز–میندلین غیره خطی می باشد که ضریب تناسب نیز سختی تماسی متغیری است که خود تابعی از شکل و خواص دو پدیده در حال تماس و نیروی نرمال می باشد. مدل هرتز–میندلین برای شرایطی که بین ذرات مجموعه هیچگونه پیوندی وجود ندارد و با کرنشهای کوچک سرو کار داریم و منحصرا در شرایط تنشهای فشاری، مدل بسیار مناسبی است. در مواردی غیر از موارد ذکر شده مدل خطی توصیه می شود. مدلهای سختی و لغزشی رفتار فیزیکی تماسهای بین ذره و دیواره و همچنین تماس بدون پیوند بین ذرات را تشریح می کنند در حالی که ممکن است دو نوع پیوند در نقاط تماس بین دو ذره شکل بگیرد که شامل پیوند تماسی و پیوند موازی است. پیوندهای تماسی اثر چسبندگی را که در سطح بسیار کوچک نقطه تماس عمل می کند شبیه سازی می کند. پیوندهای موازی اثر مواد اضافی

(ملات مانند) را که بعد از تماس ذرات شکل می گیرند مدل می کند. خواص مواد نیز از جمله پارامترهای مهم و اثر گذار بر نتایج شبیه سازی است. مهمترین این خواص شامل ضریب اصطکاک بین ذرات، اصطکاک بین ذرات و دیواره ها ، سختی ذرات و دیواره ها ، ضریب ارتجاعی و پیوندهای بین ذرات می باشند.

۵- اعمال نیرو و حل مسئله: موضوع اعمال نیرو ارتباط تنگاتنگی با موضوعات شرایط مرزی و حدی دارد به طوری که تفکیک آنها بسیار مشکل است. در PFC دو نوع سیستم اعمال نیرو وجود دارد که شامل روش اعمال نیروی فعال و غیر فعال می باشد. در روش غیر فعال معمولا با ایجاد تغییر در خود مدل (مثل تغییر در تخلخل ذرات و یا اعمال شتاب جاذبه) نیروئی داخلی به سیستم وارد می شود. در روش اعمال نیروی فعال معمولا از سرعت یا نیروی خارجی استفاده می شود. معمول ترین فرم اعمال نیرو در این روش، دادن سرعتی معین به یکی از دیواره ها است. حل مدل PFC با صدور دستور اجرا برای چرخه محاسبات شروع می شود و با مشاهده رفتار سیستم بعد از اجراء محاسبات کامل می شود. هر کدام از چرخه های محاسباتی به اندازه یک گام زمانی طول می کشد و تعداد چرخه ها باید طوری انتخاب شوند تا در پایان محاسبات برآیند نیروهای نامتعادل کننده به صفر یا به حد قابل قبولی برسد. حل مدل شامل حل استاتیکی و حل دینامیکی می باشد که تفاوت آنها در این است که در حل استاتیکی ضریب میرائی خارجی اعمال نمی شود در حالیکه در حل دینامیکی ضریب میرائی که متناسب با نوع مواد مدل شده و رفتار فیزیکی آنها است به مدل اضافه می شود. البته باید توجه داشت که در حل دینامیکی نیز باید ابتدا مدل به صورت استاتیکی حل شود تا سیستم به تعادل داخلی برسد. مهمترین قابلیت PFC این است که هر کدام از پارامترها را در هر زمانی که لازم باشد می توان در مدل تغییر داد و نتایج تغییر ایجاد شده را مشاهده نمود. مثلا می توان ذره ای را حذف یا به سیستم اضافه کرد یا دیواره ای را ایجاد یا حذف نمود.

۶- استخراج نتایج و تفسیر نها: اولین نتیجه ای که از مدل استخراج می شود، تعیین وضعیت مدل است که مشخص می کند مدل به تعادل رسیده است یا خیر. PFC میتواند همزمان با اجراء چرخه محاسبات ماکزیمم و میانگین نیروهای نامتعادل کننده را ترسیم نماید. بسته به نوع و هدف مدل و مواد مدل شده نتایج مورد انتظار از مدل متفاوت خواهد بود اما معمولا پارامترهائی مانند سرعت و موقعیت ذرات، تنش در بین ذرات، نیروها و گشتاورهای عمل کننده روی دیواره ها و انواع انرژی های تولید شده در مدل از جمله اطلاعاتی هستند که می توان از مدل استخراج نمود. معمولا در این مدل نتایج خروجی به صورت نمودار می باشند که این نتایج را می توان با نتایج حاصل از آزمایشات واقعی مقایسه نمود و در مورد صحت و سقم نتایج قضاوت نمود. حتی برخی از خواص فیزیکی مواد را که امکان اندازه گیری آنها در آزمایشگاه وجود ندارد می توان با استفاده از این مدل تعیین نمود. برای این کار معمولا مقدار پارامتر مورد نظر را در مدل طوری تغییر می دهند تا نتایج مدل به نتایج واقعی نزدیک شوند. در این صورت مقدار پارامتر مورد نظر را به عنوان مقدار واقعی آن در نظر می گیرند.

نمونه هائی از کاربرد مدل

از جمله مهمترین کاربردهای PFC در کشاورزی اندازه گیری زاویه اصطکاک داخلی و تخلخل مواد دانه ای، شبیه سازی فرایند تراکم مواد کشاورزی ، برآورد خواص مکانیکی مواد دانه ای با شبیه سازی آزمایش سه محوری، تخمین نیروهای وارد بر تیغه در حال کار در خاک با شبیه سازی حرکت تیغه در خاک و شبیه سازی جریان کود و بذر در کودپاشها و بذر پاشها می باشند که در این مقاله به برخی از آنها پرداخته می شود.

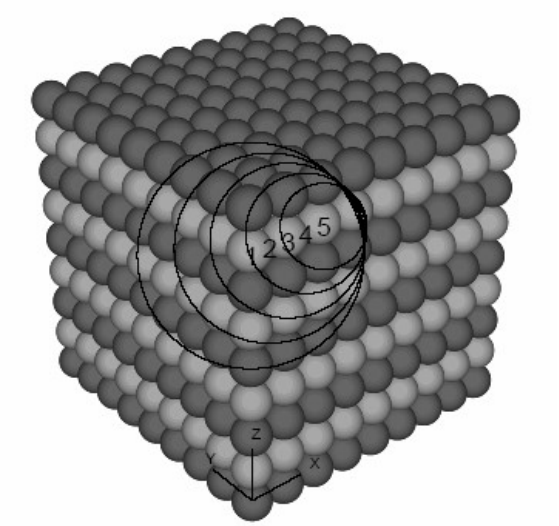
تخلخل مواد دانه ای

تخلخل مواد دانه ای از جمله مواردی است که با استفاده از نرم افزار PFC قابل تعیین است. شکل۳ شبیه سازی یک مجموعه مکعبی تشکیل شده از دانه های کروی است که توسط PFC انجام شده است. در این شکل هر ذره (کره) با شش کره

همجوار خود در تماس است. تخلخل در یک مجموعه مکعبی با ذرات کروی از رابطه زیر محاسبه می گردد کـه مـستقل از انـدازه ذرات است:

$$n = 1 - \frac{V_s}{V_t} = 1 - \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{(2R)^3} = 1 - \frac{\pi}{6} \approx 0.4764 \qquad (۱۷)$$

شکل ۳ متشکل از ۷۲۹ کره (هر کدام از طول و عرض و ارتفاع مکعب حاوی ۹ کره است) با شعاع مـساوی اسـت کـه مکعبـی بـا مقطع مربع که ارتفاع آن نیز با اضلاع مقطع مساوی است، تشکیل داده است. بـرای تعیـین بعـضی از پارامترهـا در PFC، یـک حجم اندازه گیری تعریف می شود که پارامتر مذکور به جای محاسبه در کل مجموعه در حجم تعریف شده تعیین می گردد. هرچـه این حجم بزرگتر باشد، دقت اندازه گیری نیز بیشتر است. در این مثال تخلخل مجموعه با استفاده از پنج حجم اندازه گیری مختلف که پنج کره با قطرهای مختلف هستند برآورد شده وبا تخلخل واقعی (به دست آمده از معادله ۱۷) مقایسه شده اند. جدول ۱ نتـایج تعیین میزان تخلخل در دو مکعب (یکی با طول و عرض و ارتفاع حاوی ۹ کره و دیگری با طول و عرض و ارتفاع حاوی ۱۸ کره) و با استفاده از پنج حجم اندازه گیری مختلف (حجم شماره ۱ بزرگترین و شماره ۵ کوچکترین حجم می باشد) را نـشان مـی دهـد. نتایج ارائه شده در این جدول نشان می دهند که هر چه حجم کل سیستم و اندازه حجم اندازه گیری بزرگ تر باشد، دقت محاسـبه تخلخل در این نرم افزار بیشتر است.



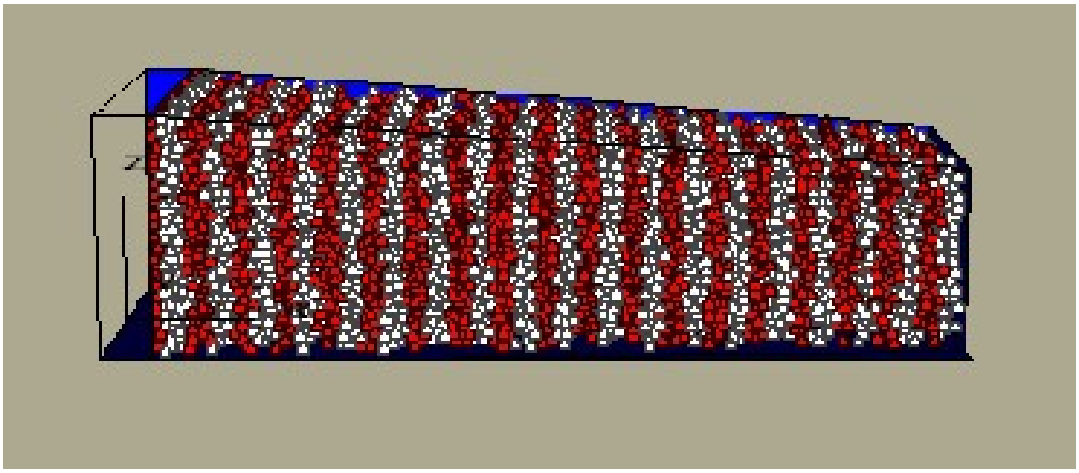
شکل ۳- شبیه سازی توده مکعبی متشکل از ذرات کروی با استفاده ازنرم افزار PFC

جدول ۱- برآورد میزان تخلخل دو توده مکعبی متشکل از ذرات کروی با استفاده از پنج حجم اندازه گیری مختلف

خطای نـسبی در مکعب بزرگ (٪)	خطـای نـسبی در مکعب کوچک (٪)	تخلخـل محاسـبه شـده در PFC برای مکعب بزرگ	تخلخـل محاسـبه شـده در PFC برای مکعب کوچک	حجم اندازه گیری	تخلخـل واقعی
۰/۰۸	۱/۰۵	۰/۴۷۶۸	۰/۴۸۱۴	۱	۰/۴۷۶۴
۰/۳۶	−۱/۹۱	۰/۴۷۸۱	۰/۴۶۷۳	۲	۰/۴۷۶۴
۰/۳۴	۰/۶۹	۰/۴۷۸۰	۰/۴۷۹۷	۳	۰/۴۷۶۴
−۰/۱۷	−۲/۳۳	۰/۴۷۵۶	۰/۴۶۵۳	۴	۰/۴۷۶۴
−۱/۲۸	۱/۴۷	۰/۴۷۰۳	۰/۴۸۳۴	۵	۰/۴۷۶۴

مدل کردن فرایند بسته بندی در بیلر

شبیه سازی فرایند متراکم سازی علوفه در بیلرها و دستگاههای تهیه کنسانتره مورد دیگری است که با استفاده از نرم افزار PFC قابل انجام است. شکل ۴ مدل شبیه سازی شده محفظه تراکم و بسته علوفه (یونجه) موجود در یک بیلر مکعبی بزرگ را با استفاده از این نرم افزار نشان می دهد. محفظه تراکم و پیستون بیلر مکعبی بزرگ به صورت دیواره با ابعاد و خواص واقعی آنها شبیه سازی گردیده است و یونجه بسته بندی شده به صورت ذرات به هم چسبیده کروی ایجاد گردیده اند. همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی یونجه در آزمایشگاه اندازه گیری شده و مقادیر آنها به مدل داده شده است. سپس با اعمال سرعت به پیستون، عمل تراکم یونجه صورت گرفته و نیروهای وارد بر دیواره های محفظه تراکم و پیستون بیلر در جهات مختلف به عنوان نتایج مدل ارائه گردیده است. جدول ۲ نتایج نیروهای وارد بر پیستون که از دو روش آزمایش مزرعه ای و مدل عددی (با استفاده از نرم افزار PFC) و برای چهار تراکم مختلف یونجه (چهار جرم حجمی مختلف) تعیین گردیده است را نشان می دهد. در این جدول نیروهای تعیین شده از دو روش با هم مقایسه شده و خطای نسبی مدل عددی محاسبه شده است. نتایج این جدول نشان می دهد که خطای برآورد از طریق این مدل در حد قابل قبولی است.



شکل ۴- شبیه سازی محفظه تراکم و بسته علوفه (یونجه) موجود در یک بیلر مکعبی بزرگ با استفاده ازنرم افزار PFC

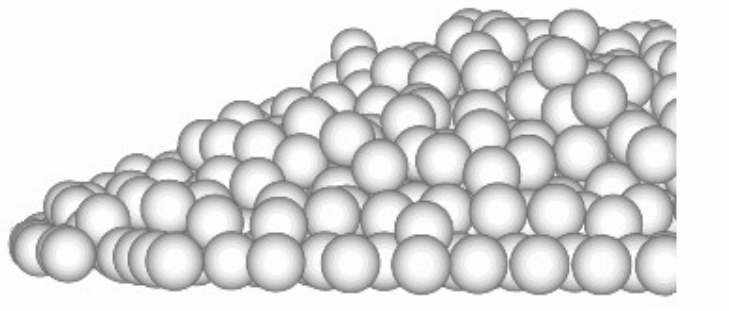
جدول ۲- نتایج تخمین نیروی وارد بر پیستون بیلر مکعبی بزرگ با استفاده از نرم افزار PFC و مقایسه آن با نیروهای واقعی پیستون در بسته بندی یونجه

خطا (%)	نیروی برآورد شده توسط PFC (kN)	نیروی واقعی (kN)	جرم حجمی بسته بر اساس درصدی از ماکزیمم جرم حجمی قابل حصول در بیلر (%)
۴/۹	۵۱۶/۶	۴۹۲/۴	۱۰۰
۲/۸	۳۸۴/۱	۳۹۵/۰	۸۰
۲/۸	۳۲۴/۲	۳۱۵/۵	۶۰
۱۲/۱	۲۴۲/۶	۲۱۶/۴	۴۰

اندازه گیری زاویه پایداری مواد دانه ای

برای اندازه گیری زاویه پایداری مواد دانه ای ، ابتدا سه دیواره در محیط PFC به گونه ای طراحی می شوند که با هم یک سه گوش (دارای دو دیواره عمود بر هم قائم و یک دیواره به عنوان کف) را تشکیل دهند. سپس مواد دانه ای با شعاع و خواص فیزیکی واقعی ایجاد شده و در داخل سه گوش قرار می گیرند. با اعمال شتاب جاذبه، دانه ها در اثر وزن خود از طرفی که دیواره وجود ندارد پایین می لغزند و بسته به میزان اصطکاک بین دانه ها تحت زاویه ای نسبت به افق استقرار می یابند (شکل ۵). سپس زاویه پایداری از روی شکل و با استفاده از نقاله اندازه گیری می شود. شکل ۵ شبیه سازی مواد دانه ای با شعاع ۳۵

سانتیمتر، جرم حجمی ۱۰۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب و ضریب اصطکاک داخلی ۰/۵۷۷ را جهت اندازه گیری زاویه پایداری نشان می دهد. زاویه پایداری این ذرات با توجه به اندازه و خواص در نظر گرفته شده برای آنها، ۲۶ درجه اندازه گیری شده است.



شکل ۵- شبیه سازی مواد انه ای با استفاده ازنرم افزار PFC جهت اندازه گیری زاویه پ داری

نتیجه گیری

نرم افزار PFC قادر است با استفاده از روش المانهای مجزا رفتار دینامیکی مواد دانه ای را شبیه سازی کند. مواد دانه ای به صورت ذرات کروی و سطوح نگهدارنده به صورت دیواره با ابعاد و خواص واقعی شبیه سازی می شوند. اطلاعات ورودی این مدل، خواص فیزیکی و مکانیکی مواد دانه ای و سطوح نگهدارنده و اطلاعات خروجی آن شامل سرعت و موقعیت ذرات، تنش بین ذرات، نیروها و گشتاورهای وارده بر دیواره ها ، انواع انرژی های تولید شده در مدل و برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی مجهول مواد دانه ای می باشند. در این مدل هر چقدر شکل مواد دانه ای به کره نزدیک تر باشد و پارامترهای ورودی مدل (خواص فیزیکی و مکانیکی مواد) واقعی تر باشند، نتایج مدل نیز دقیق تر خواهند بود.

مراجع مورد استفاده

1. Afzalinia, S., M. Roberge, & B. Lamarche. 2003. Modeling and validation of the baling process in the compression chamber of a large square baler. CSAE Paper No. 03-206. Montreal, Quebec: CSAE/SCGR.
2. Anonymous. 1999. *PFC^{3D} User's Manual*, Version 2.1., Minneapolis, USA: Itasca Consulting Groups Inc.
3. Cundall, P. A & O. D. L. Strack. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique,* Vol. 29 (1): 47 – 65.
4. Favier, J. F., M. H. Abbaspour-Fard, M. Kremmer & A. O. Raji. 1999. Shape representation of axi-symmetrical, non-spherical particles in discrete element simulation using multi-element model particles. *Engineering Computations*, Vol. 16(4): 467-480.
5. Jensen, R. P., P. J. Bosscher, M. E. Plesha & T. B. Edil. 1999. DEM simulation of granular media-structure interface: effects of surface roughness and particle shape. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 23(6): 531-547.
6. Landry, H., M. Roberge & C. Laguë. 2002. Discrete element method applied to the study of solid and semi-solid manure properties and machine-product interaction for handling and land application equipment. ASAE Paper No. 02-1098. St. Joseph, MI: ASAE.

7. Mani, S. L. G. Tabil Jr., M. Roberge & S. Sokhansanj. 2003. Modeling of densification of biomass grinds using discrete element method by PFC3D. ASAE Paper No. 03-207. St. Joseph, MI: ASAE.
8. Ni, Q., W. Powrie, X. Zhang & R. Harkness. 2000. Effect of particles properties on soil behavior: 3D numerical modeling of shearbox tests. *Geotechnicals Special Publication*, Vol. 96: 58-70.
9. Ning, Z., R. Boerefijn, M. Ghadiri & C. Thornton. 1997. Distinct Element Simulation of Impact Breakage of Lactose Agglomerates. *Advanced Powder Technology*, Vol. 8(1): 15-37.
10. Ting, J., Meachum, L. R. & Rowll, J. D. 1995. Effect of particle shape on the strength and deformation mechanism of ellipse shape granular assemblies. *Engineering Computations*, Vol. 12, 99-108.

Modeling of Dynamic Behavior of Granular Materials Using PFC Software

Sadegh Afzalinia

Abstract

Particle flow code software models the dynamic behavior of granular materials using discrete element method. In this software, granular materials are generated as spheres (clusters by combining spherical particles) and boundaries are created as walls. Input data in this model are physical and mechanical properties of granular materials and boundaries (walls). Parameters including velocity and position of particles, stresses between particles, forces and moments applied on the walls, energy produced in the model, and some unknown properties of granular materials could be outputs of this model. Calculation cycle in PFC is based on Newton's second law and the law of force-displacement. Particle movement which comes from internal and contact forces of particles is estimated using Newton's second law. Contact forces resulting from relative movement of particles at the contact points are calculated using the law of force-displacement. Of the most common applications of this software in agricultural engineering are determination of repose angle and porosity of granular materials, estimation of the mechanical properties of granular materials by simulating tri-axial test, estimation of soil reaction forces on the tillage tools, and modeling of manure, fertilizer, and seed flow in the hoper of fertilizing and seeding machines. Some of these applications are covered in this study.

Keywords: modeling, discrete elements, spherical particles, PFC