Archive of SID

شبیه سازی عددی رفتار دینامیکی مواد دانه ای کشاورزی در محیط های گسسته با ارائه مدلی با المانهای مجزا[1]

محمد حسین عباسپور فرد[2]

۱- چکیده:

یکی از عوامل مهم در دقت شبیه سازی مدل‌های DEM، انطباق شکل المان‌های به‌کار رفته در مدل کامپیوتری با شکل ذرات یا اجسام در سیستم حقیقی است. مطالعات انجام شده به کمک مدل‌های DEM در زمینهٔ سیستم‌های حاوی مواد دانه ای، تاکنون مدل‌هایی بوده اند که المان‌های به‌کار رفته در آنها کروی یا بیضی مانند بوده است. از آنجا که شکل اکثر میوه ها و سبزی‌ها غیر کروی و نامنظم‌اند مدل‌های حاوی این‌گونه المان‌ها نمی تواند بیان کنندهٔ رفتار دقیق آنها باشد. مقالهٔ حاضر مدلی را ارائه می‌کند که المان‌های آن می‌تواند کروی یا غیر کروی باشد. در این مدل، شکل هر المان با ترکیبی از گویها (کرات در سیستم‌های سه بعدی و دوایر در دو بعدی) با اندازه های مختلف، با هم پوشانی دلخواه بین آنها تعیین می‌شود به طوری که شکل نهایی آنها بسیار نزدیک به شکل واقعی میوه یا محصول مورد نظر باشد. نتایج ارزیابی تئوری مدل نشان دهندهٔ تنها ۰/۰۷ درصد خطاست که این امر دلالت بر صحت فرموله شدن مدل و الگوریتم‌های موجود در آن است. همچنین، نتایج ارزیابی تجربی مدل برای بررسی دقت پیش بینی رفتار یک سیستم فیزیکی مشابه نشان می‌دهد که مدل توانسته است با دقت ۸۲ درصد رفتار سیستم را پیش بینی کند. این میزان خطا می‌تواند به میزان دقت در اندازه گیری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مورد نیاز سیستم ربط داده شود. به منظور نشان دادن توانایی مدل در شبیه سازی انتقال و فراوری محصولات کشاورزی، نمونه‌هایی از کاربرد مدل در این زمینه ارائه شده است. نتایج این شبیه سازی ها به صورت نمودارهای تغییرات نیروهای عمودی وارد بر جسم (که باعث لهیدگی آنها هستند) و نیروهای مماسی (که منشاء خراشیدگی هستند) ارائه شده است. علاوه بر این، تصاویر ارائه شده در این مقاله که برگرفته شده از انیمیشن-های حاصل از نتایج مدل هستند توانایی مدل را در شبیه سازی فرایندهای مختلف محصولات کشاورزی بیان می‌کنند.

۲- واژه های کلیدی:

۱- برگرفته از

۲- عضو هیئت علمی گروه ماشینهای کشاورزی (PHD)، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی ۱۱۶۳-۹۱۷۷۵ مشهد، Email:Hossein_abbaspour@yahoo.co.uk، تلفن: ۱۷-۸۷۹۵۶۱۲ ۰۵۱۱، فاکس: ۷۸۷۴۳۰ ۰۵۱۱.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- پیشگفتار:

محصولات دانه ای[1] کشاورزی از ابتدای مرحلهٔ کاشت تا رسیدن به دست مصرف کننده، به طور مداوم در حال نقل و انتقال و فرآوری در مراحل مختلف هستند. بسته به نوع محصول، اکثر این عملیات ممکن است بالقوه به محصول صدمه وارد کنند. این صدمات شامل لهیدگی در میوه های نرم و شکستگی در مواد بیولوژیک سخت تر است. تحقیقات نشان می دهد که تلفات حاصل از این گونه صدمات در سطح جهانی بالغ بر ۳۰ درصد است (Peleg, 1986).

برای بهبود تجهیزات حمل و نقل و فرآوری به منظور کاهش صدمات، اطلاعات جامعی در مورد خصوصیات فیزیکی و رفتار دینامیکی این‌گونه مواد مورد نیاز خواهد بود. اگرچه تعیین بسیاری از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد صرفاً از طریق تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی امکان پذیر است، رفتار دینامیکی آنها را می‌توان تواماً و با استفاده از مدلهای تئوری یا عددی نیز مطالعه کرد به طوری که اطلاعات به دست آمده از این مدل ها می تواند به مراتب دقیق تر از نتایج تحقیقات تجربی باشد. با این همه، جهت پیش‌بینی رفتار مواد، این مدل‌ها به اطلاعات اولیه در مورد خصوصیات مواد نیاز دارند که خود نیز از نتایج مطالعات تجربی حاصل می-شود.

اکثر محصولات کشاورزی به صورت تودهٔ فله منتقل و فرآوری می‌شوند، با وجود این، رفتار آنها باید هم به صورت منفرد[2] و هم به صورت توده[3] مطالعه شود، زیرا رفتار مکانیکی این گونه مواد در این دو حالت به طور قابل توجهی متفاوت است (Foutz and Thompson, 1993) به خصوص اگر دانه ها از نظر شکل و اندازه در داخل سیستم متفاوت باشند. از طرفی به منظور صرفه جویی در وقت و کاهش هزینه‌ها، اکثر مطالعات تجربی در زمینه جا به جایی و انتقال غلات به خصوص در سیلوها، به کمک مدلهایی کوچک‌تر از سیلوهای حقیقی و در حالت های بسیار ساده و خاص انجام گرفته است. اطلاعات حاصل از این گونه مدل‌های کوچک فیزیکی باید از طریق برون یابی به مدل‌های حقیقی تعمیم یابد که این امر اغلب سبب تفسیر به غلط نتایج می‌شود. (Ooi *et al*., 1998). محاسبه و تخمین نیروهای برخورد بین دانه ها در مواد توده همیشه از مسائل مورد علاقهٔ محققان بوده و هست. مطالعات تجربی انجام شده در خصوص برآورد صدمات در میوه‌های نرم به هنگام برخورد با همدیگر یا با سطوح داخلی ماشین های فرآوری منجر به ساخت و توسعهٔ دستگاه کره ثبات[4] شد. این دستگاه را گروه‌های تحقیقاتی مختلف از جمله (Chen and Yazdani, 1991) و (Brown *et al*., 1990) تکمیل کردند و به کار بردند. این وسیلهٔ کروی با قرارگیری در داخل مواد در حال حرکت، با اندازه گیری شتاب لحظه ای وارد برخودش، می-تواند رفتار دینامیکی را بر حسب سرعت جسم و برآیند نیروهای وارد بر آن ارائه کند. با اینکه این وسیله اطلاعات مفیدی در هنگام انتقال و فرآوری میوه‌ها فراهم می‌کند، محدودیت‌هایی نیز دارد. این وسیله، نیروهای برخورد (ضربه) را از طریق برآیند شتاب‌های وارد بر خود محاسبه و ثبت می کند لذا

۱- منظور از دانه همان (Particle) است که در این تحقیق منظور اجزای گسسته در سیستمی منفصل هستند که ممکن است هر چیزی مثل میوه، دانهٔ غلات، و غیره باشد.

2- Particle scale 3- Bulk scale 4- Instrumented Sphere

www.SID.ir

Archive of SID

در شرایطی که چندین ضربهٔ متقابل به طور همزمان برآن وارد آید بین اندازهٔ نیروهای برخوردی و برآیند نیروهای ثبت شده توسط دستگاه، تفاوت فاحشی به وجود خواهد آمد. علاوه بر این، به دلیل اختلاف جرم و چگالی این جسم با میوه های حقیقی و غیر کروی بودن میوه ها خطاهای دیگری نیز در نتایج به دست آمده از این دستگاه بروز می کند. زیرا شکل دانه ها یکی از فاکتورهای مؤثر در رفتار مواد دانه‌ای است (Ting *et al*, 1995).

گسترش سریع کامپیوتر سبب شد تا با استفاده از آن شبیه سازی عددی در کنار روش‌های تجربی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. در مقایسه با روش‌های تجربی و آزمایشگاهی، این روش بسیار قابل انعطاف است به طوری که با تغییرات جزئی در پارامترهای مؤثر بر مدل می توان نتایج متفاوتی به دست آورد در حالی‌که در مدل آزمایشگاهی اجرای این کار نیازمند صرف وقت و هزینه زیاد خواهد بود. علاوه بر این، در مدل عددی اطلاعات متعدد و زیادی مثل سرعت، شتاب، موقعیت، و نیروهای برخوردی در هر المان را می توان از داخل سیستم در هر زمان دلخواه استخراج کرد در حالی که در مدل های تجربی این کار اگر ناممکن نباشد بسیار مشکل خواهد بود. بنابراین، جهت مطالعهٔ رفتار دینامیکی مواد مدل های عددی می‌توانند مکمل مناسبی برای روش‌های تجربی باشند.

۲) استفاده ازمدل های عددی در مطالعهٔ رفتار مواد دانه ای

مطالعات انجام شده به کمک مدل‌های عددی روی مواد دانه ای (میوه ها و غلات) بر اساس دو اصل متفاوت پایه گذاری، برنامه سازی، و تدوین می شوند:

- مدل‌های مبتنی بر مکانیک محیط های پیوسته[1]
- مدل‌های مبتنی بر مکانیک محیط های گسسته[2]

روش المان‌های محدود[3] (FEM) و روش المان-های مرزی[4] (BEM) دو روش معمول و شناخته شدهٔ مبتنی بر مکانیک محیط های پیوسته هستند. این روش‌ها برای مطالعهٔ مواد دانه ای (محیط های گسسته) نیز به کار می روند. ولی فقط موقعی می-توانند برای این محیط ها مفید باشند که اندازهٔ اجزای تشکیل دهندهٔ سیستم (دانه ها) از ابعاد کلی سیستم به مراتب کوچک تر باشد (مثل دانه های گندم در سیلو یا ذرات خاک در نمونهٔ خاک). چنانچه این ویژگی در سیستم شبیه سازی شده وجود نداشته باشد، یعنی ابعاد دانه ها نسبت به ابعاد سیستم نسبتاً بزرگ باشد (مثلاً شبیه سازی جعبه با تعدادی محدود میوه)، فرض پیوستگی محیط در سیستم دور از واقعیت است و نتایج به دست آمده از مدل شبیه سازی شده خطای زیادی دارد و قابل تعمیم به مدل فیزیکی مشابه نخواهد بود (Rong *et al.*, 1995).

در مدل‌های مبتنی بر محیط های گسسته، رفتار کلی هر سیستم با شبیه سازی رفتار تک تک اجزای تشکیل دهندهٔ آن شبیه سازی می‌شود. با افزایش روز افزون سرعت کامپیوترها این امکان فراهم شده است تا محاسبهٔ موقعیت، شتاب، و سرعت تک تک اجزای سیستم منفصل که متشکل از تعداد نسبتاً

1-Continuum Mechanics 2- Discrete Mechanics 3- Finite Element Methods
4- Boundary Element Methods

www.SID.ir

Archive of SID

زیادی المان (دانه) است، امکان پذیر باشد. لذا این مدل ها که طبیعت گسسته سیستم‌های حاوی اجزای منفصل را مد نظر قرار می‌دهند و رفتار سیستم را از روی رفتار تک تک اجزای آن شبیه‌سازی می کنند، تحت عنوان مدل‌های با المان‌های مجزا[1] (DEM) شناخته می‌شوند. در این مدل‌ها، جهت شبیه سازی رفتار هر سیستم مراحل زیر طی می شود:

- تولید و ایجاد دانه‌ها (المان‌ها) و دیواره های سیستم،
- تعیین زوج المان‌های در تماس با هم یا با دیواره-ها در هر گام زمانی[2]،
- محاسبهٔ نیروهای تماسی بین دانه ها یا بین دانه ها و دیواره ها،
- به دست آوردن شتاب، سرعت، و موقعیت دانه‌ها در اثر برآیند نیروهای وارد بر هر دانه در انتهای هر گام زمانی،
- تکرار سه مرحلهٔ دوم، سوم، و چهارم به دلخواه کاربر در سیکل بسته تا رفتار سیستم طی یک فرایند شبیه سازی شود.

۳) معرفی مدل MSM [3]

در این مقاله مدلی ارائه می‌شود که می‌تواند المان‌هایی تولید نماید که نسبت به دیگر مدل‌های ارائه شده (مثل مدل‌های دایره‌ای و بیضوی که تاکنون در زمینهٔ شبیه سازی مواد دانه‌ای کشاورزی ارائه شده‌اند)، از نظر شکل بسیار نزدیک‌تر به دانه های محصولات کشاورزی باشند. المان‌های به کار رفته در اکثر مدل‌های ارائه شده در این زمینه کروی (دایره در مدل های دو بعدی) بوده اند. محاسبات مکانیکی مربوط به نیروهای تماسی بین این‌گونه شکل‌ها بسیار ساده است. لذا این مدل‌ها این مزیت را دارند که سرعت اجرای آنها نسبت به مدل‌های دارای المان‌های غیر کروی (مثلاً بیضوی یا چند وجهی) به مراتب بیشتر است. با وجود این، چون شکل واقعی بسیاری از محصولات دانه‌ای کشاورزی و صنعتی کروی نیست، نتایج به دست آمده از این مدل‌ها نمی‌تواند به سادگی به یک مدل واقعی تعمیم داده شود. شبیه سازی‌های انجام شده توسط (Ng and Dobry, 1994) نشان داد که چنانچه از المان‌های کروی در مدل استفاده شود، نتایج شبیه سازی حکایت از چرخش بیش از حد دانه ها دارد و مقاومت برشی مواد را به مراتب کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می کند. از طرف دیگر، در مدل-های با المان‌های بیضی شکل و چند وجهی، محاسبات مربوط به نیروهای تماسی بین المان‌ها به مراتب پیچیده‌تر است مضافاً اینکه المان‌های چند وجهی بیشتر مناسب شبیه سازی سیستم‌های حاوی صخره و سنگ هستند.

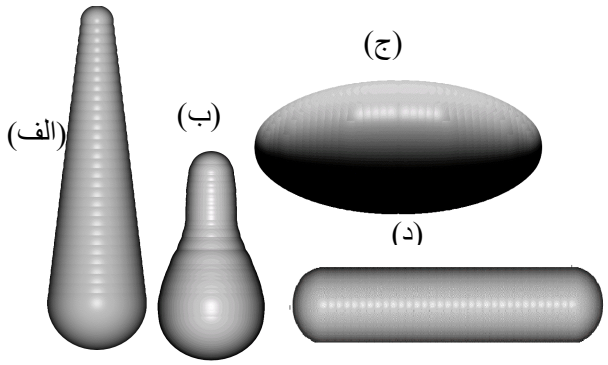
مدل ارائه شده در این مقاله در عین اینکه به مقدار زیادی سادگی محاسبات در آن لحاظ شده این توانایی را نیز دارد که بتواند المان‌هایی با شکل دلخواه و نزدیک به شکل دانه ها در یک مدل واقعی مورد مطالعه ایجاد کند. این مدل، که روش کرات ترکیب (MSM) نامگذاری شده است، می‌تواند المان‌ها یا اجسام را به صورت سه بعدی به گونه ای تولید کند که هر جسم متشکل ازیک یا چند کره با هم پوشانی یا بدون هم پوشانی و با اندازه های مختلف متصل به هم ساخته شده باشد. از آنجا که اکثر میوه ها، سبزی‌ها، و دانه ها غیر کروی و با

1- Discrete Element Models
2- Time step
3- Multi-Sphere Method

www.SID.ir

Archive of SID

سطوح خارجی محدب هستند، دانه های ایجاد شده به این روش ممکن است به گونه‌ای با ترکیب متفاوتی از کرات مختلف ساخته شوند تا به شکل میوه و دانه‌های واقعی نزدیک تر باشند. از آنجا که اجزای بنیادی هر المان در این مدل کره است بنابراین تماس بین المان‌ها در مدل را می‌توان بر اساس محاسبات تماس بین دو کره انجام داد که سبب می‌شود الگوریتم مربوط تقریباً همان سادگی مدل‌هایی را داشته باشد که شکل المان‌های آن صرفاً کروی یا دایره ای است با این مزیت که شکل کلی المان‌ها در این مدل هر چیز دلخواهی نزدیک به شکل واقعی دانه‌ها خواهد بود. شکل شمارهٔ ۱ نمونه‌هایی از المان‌های ایجاد شده در این مدل را نشان می دهد.



شکل شماره ۱- نمونه هایی از شکل های سه بعدی ایجاد شده در مدل MSM شامل اجسامی: الف) مخروطی متشکل از ۳۰ کره، ب) شکل دلخواه متشکل از ۲۸ کره، ج) بیضی شکل شامل ۳۰ کره، و د) کپسولی شامل ۲۰ کره.

- محاسبات مکانیک تماس بین ذرات در مدل

در این مدل هر ذره (دانه) از تعدادی کره تشکیل می‌شود، اما این کرات اجسامی مستقل از هم در داخل مدل نیستند. هر یک از این کرات بخشی از پیکرهٔ یک دانه را تشکیل می‌دهد به طوری که وقتی بخش ها در کنار هم قرار می گیرند شکل کلی آن دانه در داخل مدل به دست می‌آید. تماس هر دانه با دانه ای دیگر از طریق بخش نمایان کرات تشکیل دهنده هر دانه است، با این پیش فرض که آن قسمت از هر کره که داخل کرهٔ دیگر فرو رفته و نمایان نیست قادر به تماس با کره ای دیگر نخواهد بود. بنابر این دانه ها در داخل مدل از طریق کرات تشکیل دهندهٔ خود با همدیگر در تماس خواهد بود. لذا نیروهای تماسی بین دانه ها از طریق محاسبهٔ نیروی تماسی بین دو کره از دو دانه در حال تماس انجام می گیرد. در هر دانه، نیروهای تماسی تمام کرات تشکیل دهندهٔ آن با کرات تشکیل دهندهٔ دانه های مجاور محاسبه می‌شود و سپس این نیرو های تماسی به مرکز ثقل آن دانه منتقل می شوند. قابل ذکر است که اصولاً تماس بین کرات تشکیل دهندهٔ هر دانه به صورت نیروهای داخلی است در محاسبهٔ برآیند نیروهای خارجی وارد بر دانه (مثل نیروهای حاصل از برخورد دانه ها با هم یا با دیواره ها) مد نظر نیست لذا این گونه نیروها در مدل محاسبه نمی‌شوند.

در هر نقطهٔ تماس بین دو کره از دو دانهٔ در حال

www.SID.ir

Archive of SID

تماس، نیروی تماسی بر حسب دو مؤلفه عمود و مماس برسطح تماس در آن نقطه محاسبه می‌شود به طوری‌که برآیند این دو نیرو، کل نیروی تماسی وارد بر دانه در این نقطه خواهد بود، لذا:

$$\mathbf{f_c} = \mathbf{f_n} + \mathbf{f_t} \qquad (۱)$$

در این رابطه، f_n،f_c و f_t به ترتیب نیروی تماسی کل در نقطهٔ مورد نظر، مؤلفهٔ عمود بر سطح، و مؤلفهٔ مماس بر سطح تماس هستند. مؤلفهٔ مماسی نیروهای تماسی گشتاوری را حول مرکز کره مربوطه ایجاد می‌کنند که برآیند آنها برابر است با:

$$\mathbf{M_{t_{ps}}} = \sum_{c=1}^{C} \left(\mathbf{r_{psc}} \times \mathbf{f_{t_{psc}}} \right) \qquad (۲)$$

که در آن، $\mathbf{f_{t_{psc}}}$ مؤلفهٔ مماسی نیروهای تماسی در نقطه ای مثل c ، C تعداد کل نقاط تماس برای هر کره، و r_{psc} شعاع کره مورد نظر است. بر همین اساس، برآیند نیروی کل تماسی وارد بر هر کره برابر است با:

$$\mathbf{f_{ps}} = \sum_{c=1}^{C} \mathbf{f_{psc}} \qquad (۳)$$

نقطهٔ اثر این نیروها، در سطح خارجی کره است لذا در فرایندی محاسباتی به مرکز آن دایره منتقل می شوند. نیرو های منتقل شده به مرکز هر کره نیز گشتاوری حول مرکز ثقل دانهٔ مربوط به خود ایجاد می کنند (آنهایی که خط اثر آنها از مرکز دانه نمی گذرد) که این مقدار به گشتاور محاسبه شده در اثر نیروهای مماسی (معادلهٔ شماره ۲) اضافه می‌شود و کل گشتاور اعمال شده بر هر دانه به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\mathbf{M_p} = \sum_{s=1}^{S} \left[\left(\mathbf{d_{ps}} \times \mathbf{f_{ps}} \right) + \mathbf{M_{t_{ps}}} \right] \qquad (٤)$$

در این معادله، S تعداد کرات تشکیل دهندهٔ هر دانه و $\mathbf{d_{ps}}$ فاصلهٔ بین مرکز ثقل دانه و مرکز هر کره تشکیل دهندهٔ آن است. بر همین اساس برآیند کل نیروهای تماسی وارد بر هر دانه از طریق جمع برداری نیرو های وارد بر تمام کرات تشکیل دهندهٔ هر دانه محاسبه می‌شود. با محاسبهٔ برآیند نیروها و گشتاورهای وارد بر هر دانه با به کار بردن قانون دوم نیوتن، شتاب خطی (با توجه به شتاب ثقل یعنی g) و شتاب دورانی هر دانه در هر گام زمانی به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\alpha_{\mathbf{p}} = \frac{\mathbf{M_p}}{I_p} \quad \text{و} \quad \mathbf{a_p} = \frac{\mathbf{f_p}}{m_p} + \mathbf{g} \qquad (۵)$$

در این دو رابطه، m_p ، I_p ، a_p و α_p به ترتیب جرم، ممان اینرسی، شتاب خطی، و شتاب دورانی دانه هستند.

- ایجاد سیستم شبیه سازی شده در مدل:

قبل از اجرای برنامهٔ شبیه سازی که برنامه‌ای به زبان فرترن ۹۰ است، باید کلیهٔ مشخصات سیستم از قبیل ابعاد اصلی سیستم در فضایی سه بعدی، تعداد کل دانه‌ها، تعداد کل دیواره‌ها و سطوح، تعداد کرات تشکیل دهنده و شعاع آنها در هر دانه، و موقعیت آنها نسبت به‌هم در داخل دانه مشخص شود. این

www.SID.ir

Archive of SID

گونه اطلاعات از طریق یک فایل ورودی و با استفاده از یک سری دستورهای قابل تشخیص توسط برنامهٔ اصلی وارد می‌شود.

خلق یا ایجاد دانه در مدل از طریق یک زیرروال و بر اساس داده های ارائه شده در فایل ورودی انجام می گیرد. در این زیرروال، امکان خلق دانه‌های کروی و غیر کروی، هر دو، وجود دارد. ابتدا دانه ها در فضای سه بعدی عاری از شتاب ثقل زمین و بدون تماس با هم به صورت غیر متراکم و به ترتیب خلق می شوند. با دادن اطلاعات یک دانه به مدل، اطلاعاتی مانند تعداد کرات در برگیرنده آن، اندازهٔ هر کره، و فاصلهٔ نسبی کرات از هم در داخل دانه، مدل می‌تواند شکل کلی دانه را مشخص کند. در مورد دانه‌های غیرکروی جهت محور طولی هر دانه توسط یک الگوریتم به صورت اتفاقی تعیین می‌شود تا نمونهٔ خلق شده حتی المقدور شبیه نمونه‌ای واقعی باشد. علاوه بر این، فاصلهٔ دانه ها از هم در این مرحله به گونه‌ای تعیین می‌شود که محور طولی هر دانه در هر جهتی که انتخاب شود با دانه‌های مجاور خود برخورد نکند. به منظور ایجاد یک سیستم حاوی مواد فله‌ای که شبیه یک سیستم واقعی باشد مجموعهٔ دانه‌های خلق شدهٔ غیرمتراکم باید روی هم انباشته شوند و تحکیم یابند. مرحله ایجاد تحکیم دانه ها در مدل با اِعمال شتاب ثقل بر سیستم انجام می گیرد. شتاب ثقل می تواند همان شتاب ثقل زمین یا هر مقدار دلخواه باشد ولی مقدار آن روی زمان تحکیم و پایداری سیستم عددی تاثیر دارد. پایان زمان تحکیم بر اساس شاخص تعداد نقاط تماس بین دانه‌ها در سیستم تعیین می‌شود، به طوری که هر وقت این شاخص نسبت به زمان ثابت باقی ماند نشان دهنده تحکیم و ثبات دانه ها در سیستم است. انتقال و جا به جایی مواد در سیستم عددی با اِعمال شتاب در یک جهت خاص به دانه-ها و یا با اعمال سرعتی معین بر سطوح نگهدارنده مواد (نقاله) تا هر زمان دلخواه که کار بر مشخص می‌کند کنترل می‌شود. برای اطلاعات بیشتر در مورد مشخصات برنامه، فلوچارت گردش کار و الگوریتم‌های به‌کار رفته در مدل، به (Abbaspour-Fard 2001) مراجعه شود.

- **پردازش داده و نتایج شبیه سازی**

از این مدل عددی نتایج مختلف و متنوعی را کاربر می‌تواند در هر مرحله از شبیه سازی و در هر زمان دلخواه استخراج کند. در واقع این ویژگی از محاسن منحصر به فرد مدل‌های عددی است زیرا بسیاری از این نتایج را نمی توان از یک مدل فیزیکی مشابه استخراج کرد. بسته به هدفی که از شبیه سازی انتظار می رود، نتایج اخذ شده از مدل می‌تواند متفاوت باشد. برای مثال، می‌توان به مواردی همچون سرعت و موقعیت هر دانه که مورد نظر باشد (و یا تمام دانه ها) و تغییرات نیروی تماسی و جهت آن بین دو دانه ویا بین دانه ها و دیواره ها اشاره کرد. این نتایج می‌تواند با نرم افزار آماری مناسب و یا گرافیکی به نمایش درآید و پردازش شود. در مورد شبیه سازی سیستم های سه بعدی، دیدن حرکات دانه ها در فرایند شبیه سازی به صورت عکس و تصاویر متحرک یا انیمیشن اهمیت خاصی دارد. این مدل توانایی آن را دارد تا اطلاعات را به صورت فایل‌های متنی[1] قابل خواندن اتوماتیک با برنامه‌هایی مثل اتوکد و پاوری[2] ارائه کند. این فایل ها پس از اینکه با توالی مناسب زمانی

www.SID.ir

Archive of SID

تبدیل به فایل های گرافیکی شدند به نرم افزارهای انیمیشن ساز مثل جیف انیمیتور[3] منتقل و به فایل‌هایی با تصاویر متحرک و با فورمت GIF و یا AVI تبدیل می شوند. بررسی های نشان می‌دهد که فایل های متنی ایجاد شده در مدل، با سرعت بسیار کوتاهی در حد ثانیه (حتی برای تصاویری که حاوی چند ده هزار دانه بودند) به یک نرم افزار پاوری به فایل‌های گرافیکی تبدیل می‌شود در حالی‌که نرم افزار اتوکد در این گونه مواقع به دلیل نیاز به حافظهٔ موقت بسیار بالا قادر به این کار نیست یا مدت زمان اجرای آن برای تصاویر حاوی تعداد محدودی دانه، متجاوز از یک ساعت خواهد بود (Abbaspour-Fard, 2001).

- ارزیابی مدل

میزان دقت روش‌هایی مثل مدل های DEM در پیش بینی رفتار دینامیکی مواد واقعی بستگی به دو عامل مهم دارد: اول درجهٔ صحت معادلات مکانیک تماس‌بین دانه‌ها در مقیاس دانه‌ای[4] و دوم سینماتیک دانه‌ها در مقیاس کل سیستم[5]. بررسی میزان اثر عامل دوم در دقت نتایج حاصل از مدل، از طریق مقایسهٔ نتایج به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مدل فیزیکی کاملاً مشابه باید انجام گیرد. درحالی که اثر عامل اول را می‌توان به صورت نظری- تحلیلی[6] بررسی کرد. بنابراین به منظور ارزیابی مدل عددی از نقطه نظر صحت منطقی الگوریتم‌ها در محاسبهٔ نیروهای تماسی و موقعیت لحظه‌ای دانه‌ها شبیه‌سازی‌های متعددی انجام گرفت. در این شبیه سازی‌ها، مواردی مقایسه شدند مثل: محاسبهٔ وزن دانه در مدل از طریق محاسبه نیروی تماس دانه با سطح تماس، محاسبهٔ نیروی تماسی و تغییرات آن در هنگام برخورد دانه در اثر سقوط آزاد روی سطح، سرعت حرکت و موقعیت دانه در هنگام لغزش روی سطح شیبدار با ضرائب اصطکاک معین، و چرخش دانه در اثر اعمال خارج از مرکز یک نیروی خارجی بر دانه. در تمام این موارد نتایج به دست آمده از مدل با مقادیر تئوری آن مقایسه شد. برای مثال، نیروی تماس بین ذره و سطح با نیروی وزن آن، و لغزش دانه روی سطح با مقدار تئوری آن از طریق مکانیک لغزش مواد مورد مقایسه قرار گرفت. در تمام موارد فوق تاثیر دو عامل گام زمانی و ضریب میرایی[7] روی میزان دقت نتایج حاصل ازمدل بررسی شد. نتیجهٔ این بررسی‌ها نشان می‌دهد که به طور متوسط میزان خطای مدل بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ درصد برای شبیه سازی حرکت مواد روی سطوح مختلف و ۰/۰۷ درصد در شبیه سازی برخورد دانه در سقوط آزاد روی یک سطح بوده است (Abbaspour-Fard, 2004).

ارزیابی‌های نظری فوق شواهد لازم را در مورد صحت الگوریتم‌ها در مدل ارائه می‌کنند اما این موارد نمی‌توانند ثابت کنند که میزان دقت این مدل در پیش بینی رفتار دینامیکی موادی با خصوصیات فیزیکی مشخص چه مقدار است. بدین منظور، آزمایش‌هایی در جهت ارزیابی کارایی مدل در پیش بینی رفتار سیستمی حاوی مواد واقعی در دو مقیاس دانه‌ای و مقیاس توده ای کل سیستم انجام گرفت.

1- Script file
2- PovRay
3- GIF Animator
4- Micro-scale
5- Macro-scale
6- Analytical
7- Damping coefficient

www.SID.ir

Archive of SID

درارزیابی مقیاس‌دانه‌ای، سیستمی با تعدادی محدود (۱۰ عدد) دانهٔ غیر کروی به صورت فیزیکی ساخته شد و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مورد نیاز مدل (مثل ضریب اصطکاک و ضریب میرایی) برای دانه‌ها اندازه‌گیری و مدول الاستیسیته و ضریب پواسون با توجه به جنس دانه‌ها از سایت اینترنتی خواص مواد[1] استخراج شد. با مکانیزمی متحرک، دانه‌ها به صورت کنترل شده در داخل سیستم حرکت داده شد و دوربین فیلم برداری حرکت آنها را ضبط کرد. در مرحلهٔ بعد به کمک نرم افزار تصاویر برداشت شده با دوربین تبدیل به تصاویر دیجیتالی[2] و هر فریم (تصویر) به یک فایل گرافیکی تبدیل شد. با استفاده از این فایل‌ها مختصات Z,Y,X و میزان دوران هر دانه به فواصل زمانی ۰/۲۵ ثانیه تعیین شد. سیستمی شبیه سیستم فوق به صورت عددی در مدل نیز ایجاد و مختصات هر دانه و دوران آن نیز از مدل استخراج و با مقادیر به دست آمده از مدل فیزیکی مقایسه شد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج نشان داد که بیشترین همخوانی بین نتایج مدل فیزیکی برابر ۹۲ درصد، کمترین آن ۷۷ درصد و متوسط آن ۸۲ درصد است.

به‌منظور ارزیابی مدل در مقیاس توده ای مجدداً دو مدل فیزیکی و عددی مشابه، با تعدادی دانهٔ غیر کروی (۲۰۰ عدد) ایجاد و مواردی مثل ساختار بستر دانه[3] در مدل، شدت جریان خروج دانه از سیستم، شکل خروج مواد از دهانهٔ خروجی، و پروفیل سرعت دانه ها در سیستم مقایسه شدند. در کلیهٔ موارد، همخوانی مناسبی بین نتایج به دست آمده از مدل عددی و مدل فیزیکی مشاهده شد(Abbaspour-Fard, 2001).

٤) کاربرد مدل در فراوری محصولات کشاورزی

هدف از این بخش نشان دادن توانایی‌های مدل Multi-Sphere یا MSM در شبیه سازی انتقال و فراوری مواد کشاورزی و صنعتی در وضعیت‌های مختلف است. بدین منظور مثال هایی از کاربرد این مدل در سیستم‌هایی ارائه می‌شود که حاوی دانه های غیر کروی و یا کروی هستند. در هر مثال دانه هایی غیر کروی با شکل‌های دلخواه و با تقارن محوری در یک فضا یا سیستمی با شکل هندسی دلخواه به صورت عددی ایجاد شد. این سیستم‌ها شبیه سیستم‌هایی هستند که در فراوری و انتقال محصولات کشاورزی از آنها استفاده می‌شود.

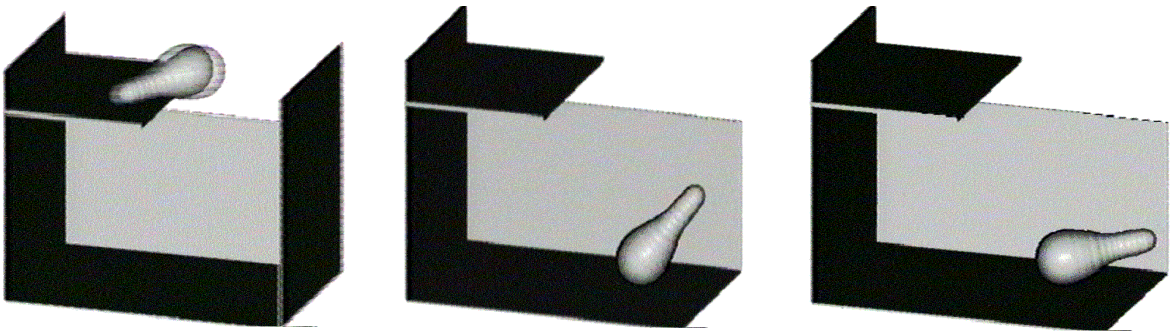
- شبیه سازی سقوط میوه

سقوط میوه و سبزی از مسائلی است که می-توان گفت اگر نه در تمام مراحل فراوری بلکه در اکثریت قریب به اتفاق آنها رخ می‌دهد. مطالعهٔ رفتار حرکتی جسم در حین سقوط و میزان نیروی وارد بر آن می‌تواند اطلاعات مفیدی در جهت جلوگیری از له شدن آنها فراهم کند. در این مثال، یک جسم غیر کروی با پروفیل طولی نامنظم دلخواه (شبیه بسیاری از میوه ها مثل گلابی، بادمجان و ...) مطابق شکل شمارهٔ ۲ ایجاد شد.

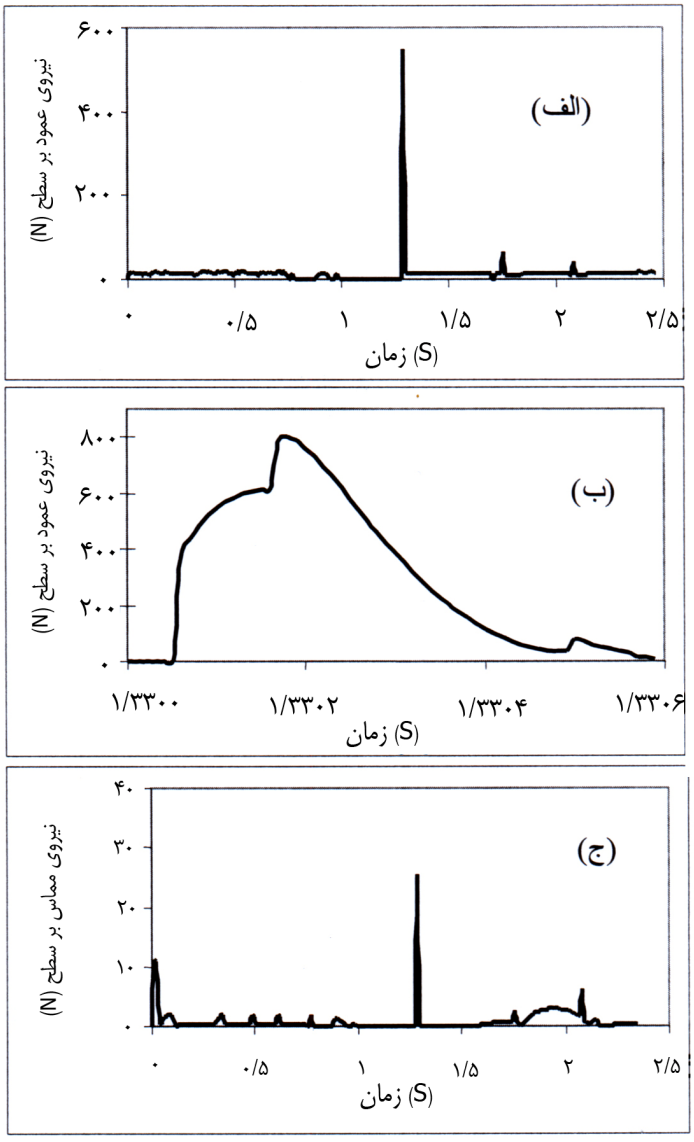
1- http://www.measurementsgroup.com/
2- Frame grabber
3- Bed structure

www.SID.ir

Archive of SID



شکل شمارهٔ ۲- سه تصویر متوالی بر گرفته شده از انیمیشن تهیه شده از سقوط یک جسم بر اساس نتایج مدل MSM .



شکل شمارهٔ ۳- نیروی عمودی و مماسی وارد بر جسم در فرایند سقوط روی سطح، تهیه شده بر اساس نتایج مدل MSM

www.SID.ir

Archive of SID

این جسم از طریق اتصال، ادغام، و هم پوشانی ۱۵ کره با اندازه های مختلف به گونه ای در کنار هم چیده شده اند تا شکل مورد دلخواه ایجاد شود.

فضای محصور کننده سیستم متشکل از دیواره-های نگهدارندهٔ عمودی و دونقالهٔ افقی است. نقالهٔ بالایی به سمت چپ و نقالهٔ کف به سمت راست حرکت می‌کند. همان طور که در سه تصویر متوالی از حرکت جسم مشاهده می‌شود مدل عددی به خوبی توانسته است چرخش جسم را در حین سقوط در یک سیستم سه بعدی شبیه سازی کند. هنگام سقوط مواد ویسکوالاستیک حداکثر نیروی عمودی در لحظه اولین برخورد در جسم ایجاد خواهد شد و سپس با توجه به خصوصیات ویسکوالاستیک جسم (ضریب میرایی) و میزان ارتجایی بودن آن، چندین مرتبه بالا پایین می‌شود و سپس به حالت تعادل می‌رسد. شکل شمارهٔ ۳ نمونه‌ای از اطلاعاتی را نشان می‌دهد که مدل می-تواند ارائه کند. شکل شمارهٔ ۳ الف تغییرات نیروی عمودی وارد بر جسم را قبل، در حین، و پس از سقوط نشان می‌دهد. این اطلاعات به فاصلهٔ زمانی ۰/۲۵ ثانیه (هر ۵۰ گام زمانی) اخذ شده است

به منظور بررسی دقیق‌تر نیروی ضربهٔ وارد بر جسم در اولین برخورد، اطلاعات مربوط به این نیرو به صورت دقیق‌تر و به صورت برداشت اطلاعات به فاصلهٔ یک گام زمانی (10^{-5} ثانیه) در شکل شمارهٔ ۳ ب نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود این نمودار اطلاعات بسیار دقیقی از نحوهٔ تغییرات نیروی ضربهٔ وارد بر جسم را نشان می‌دهد. مقایسهٔ شکل شمارهٔ ۳ الف با ۳ ب نشان می‌دهد که حداکثر نیروی ضربه در این دو شکل از نظر مقدار متفاوت است؛ در شکل الف اطلاعات به فاصلهٔ ۵۰ گام زمانی برداشت شده است لذا بخشی از اطلاعات به دلیل گسسته بودن برداشت از دست رفته است و همان‌طور که گفته شد در این حالت مقادیر دقیق مربوط به شکل ب خواهد بود. شکل الف می‌تواند برای تعیین محل و زمان بزرگترین برخورد مورد توجه قرار گیرد.

شکل شمارهٔ ۳ ج نیروهای مماسی (مالشی) وارد برجسم از طرف نقاله‌ها را نشان می‌دهد. این نیروها باعث خراشیده شدن جسم به خصوص به هنگامی است که بیشترین ضربه به جسم وارد می‌شود زیرا حداکثر نیروی مماسی (اصطکاک) تابعی از نیروی عمودی است. با مقایسهٔ شکل ۳ الف با ۳ ج مشاهده می‌شود که بیشترین نیروی عمودی درست در جایی است که نیروی مماسی نیز حداکثر بوده است. این نمونه شبیه سازی نشان می دهد که این مدل در زمینهٔ مطالعهٔ نیروی ضربه و له شدن میوه هایی که حتی شکل غیر کروی دارند، کاربرد جالب توجهی می‌تواند داشته باشد .

- شبیه سازی حرکت مواد:

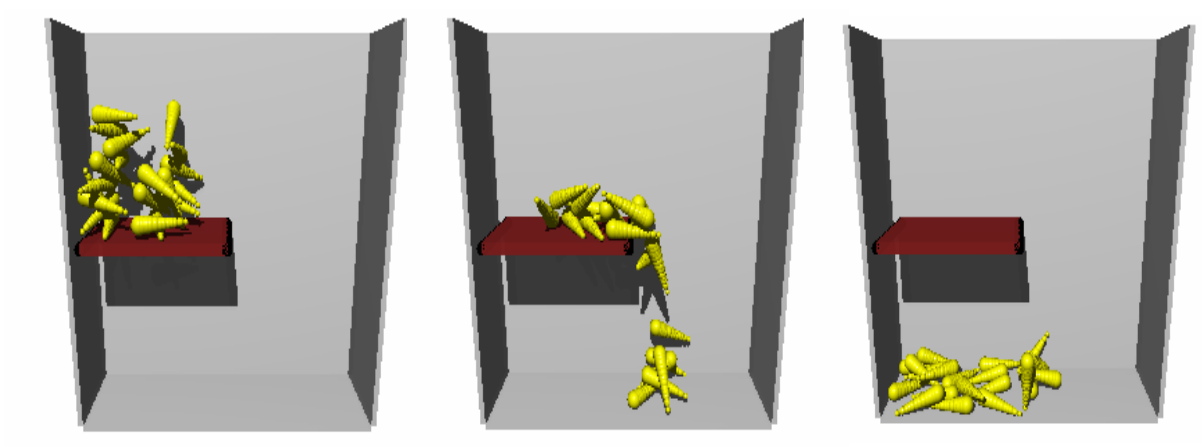
انتقال مواد با نقاله‌های تسمه‌ای یکی از روش‌های متداول در انتقال مواد دانه ای در کشاورزی است. در این مثال، رفتار مواد هنگام سقوط روی نقالهٔ در حال حرکت بررسی می‌شود. در این حالت شکل در نظر گرفته شده برای اجسام در داخل سیستم مخروطی است. این گونه شکل‌ها می‌تواند برای شبیه سازی حرکت محصولاتی مثل چغندرقند یا هویج استفاده شوند. هدف اصلی از ارائه این مثال نشان دادن قابلیت این مدل در شبیه‌سازی سیستم‌های

www.SID.ir

Archive of SID

کاملاً سه بعدی با تعداد زیادی جسم است. سیستم متشکل از یک نقاله در بالا با حرکت یکنواخت ۰/۰۱ متر بر ثانیه به سمت راست و نقاله ای در کف با حرکت به سمت چپ و ۲۰ جسم مخروطی شکل است. هر جسم متشکل است از ۱۳ کره با قطرهایی مشخص به طوری که نهایتاً شکلی مخروطی برای آنها ایجاد شود. اجسام ابتدا در بالای نقاله بالایی ایجاد و سپس روی نقاله ریخته شده‌اند (شکل شمارهٔ ٤).

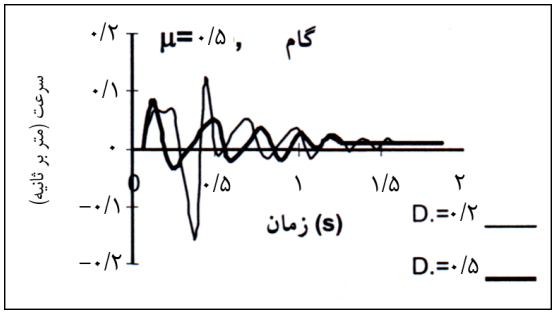
هرگونه اطلاعاتی در زمینهٔ سرعت حرکت تک تک اجسام و نیروهای وارد بر آنها از طرف دیگر اجسام یا سطوح مختلف (شبیه آنچه در مثال قبل مشاهده شد) به سهولت امکان پذیر است. برای مثال، شکل شمارهٔ ۵ رفتار یکی از اجسام را هنگام سقوط روی نقالهٔ در حال حرکت نشان می دهد. در این شکل نشان داده شده است که چگونه تغییر ضریب میرایی بر نحوهٔ حرکت جسم اثر خواهد داشت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب میرایی بین جسم و سطح، حرکت جست و خیزی جسم کاهش می‌یابد و روی نقاله سریع تر به حالت پایدار خود می‌رسد. این موضوع اهمیت پوشش نرم روی سطوح را برای میوه های با بافت نرمتر به خوبی بیان می‌کند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است نهایتاً سرعت نسبی بین جسم و نقاله از بین می‌رود و با سرعتی برابر سرعت نقاله (۰/۰۱ متر بر ثانیه) حرکت خواهد کرد.



شکل شمارهٔ ٤- سه تصویر متوالی از شبیه سازی حرکت مواد با نقاله.
حرکت نقالهٔ بالایی به سمت راست و نقاله کف به سمت چپ در نظر گرفته شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل شمارهٔ ۵- پیش بینی رفتار جسم هنگام سقوط روی نقالهٔ در حال حرکت بر حسب تغییرات سرعت حرکت افقی جسم برای دو ضریب میرایی (D) مختلف.

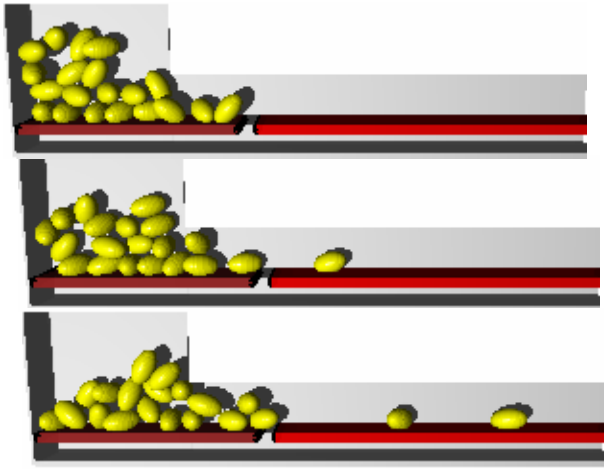
- شبیه‌سازی برای تک‌سازی[1] میوه‌ها و سبزی‌ها

واژهٔ تک سازی برای فرایندی به کار می‌رود که طی آن میوه‌ها (یا هر محصول دانه‌ای دیگر) از حالت فله ای نامنظم به صورت اجزای ناپیوسته و منظم به صف در می‌آیند (McRae, 1985). این کار یکی از عملیات معمول قبل از فرایند هایی مثل بازرسی و بسته بندی محصول است. در این مثال، ۲۰ عدد جسم بیضوی (مناسب شبیه سازی محصولات جالیزی) به صورت توده ای درهم (فله) ایجاد شد. هر جسم با ادغام ۱۵ کره با اندازهٔ مختلف به گونه‌ای در کنار هم قرار گرفتند تا سطح خارجی آنها محاط بر یک بیضی دلخواه شود. بدین منظور الگوریتمی تهیه شد که کاربر را قادر می‌سازد تا با مشخص کردن اقطار کوچک و بزرگ بیضی دلخواه و تعداد کرات تشکیل دهندهٔ جسم، قطر هر کره و مرکز آن را در داخل جسم به گونه‌ای مشخص کند که سطح خارجی جسم تشکیل دهنده بربیضی موردنظر محاط باشد. مکانیزم تک سازی در این مثال متشکل از دو نقالهٔ افقی با حرکتی هم جهت ولی با مقادیر مختلف است به‌طوری‌که سرعت نقالهٔ اولی کمتر از سرعت نقالهٔ دوم باشد. مواد ابتداً روی نقالهٔ اولیه کم سرعت به‌صورت درهم ریخته می‌شوند و با این نقاله به طرف نقالهٔ ثانویهٔ پر سرعت هدایت می‌شوند که در مجاورت آن قرارگرفته است. هرجسمی که زودتر با نقاله ثانویه برخورد کند سرعت آن بیشتر می‌شود و به صورت عضوی مجزا از دیگر مواد جدا می‌شود.

1- Singulation

www.SID.ir

Archive of SID



شکل شمارهٔ ٦- سه تصویر متوالی از شبیه سازی مدل MSM در تک سازی محصولات کشاورزی

عواملی مثل سرعت مطلق و نسبی نقاله ها، ضریب اصطکاک بین محصول و نقالهٔ اولیه و ثانویه، و حجم مواد جا به جا شده از عواملی هستند که بر کیفیت جداسازی و مقدار نیروی سایش (خراشیدگی میوه ها) تاثیر می گذارند. در یک مدل عددی، تکرار فرایند شبیه سازی جهت بررسی اثرهای عوامل فوق تنها با تغییر مقادیر آنها در مدل به سهولت انجام می‌گیرد حال آنکه در سیستم‌های فیزیکی وقت و هزینهٔ زیادی باید به این منظور صرف شود. نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی برای این گونه عملیات تک‌سازی در شکل شمارهٔ ٦ نشان داده شده است. در این شکل، سه تصویر با توالی زمانی مناسب مشاهده می شود که نشان دهنده اجسام جدا شده از محصول فله است.

٥- نتیجه گیری:

با توجه به گسترش روز افزون کامپیوتر و روند فوق العادهٔ افزایش سرعت در آنها، امکان انجام تحقیقات بر پایهٔ شبیه‌سازی عددی نیازمند به محاسبات بسیار زیاد و سیکلی را فراهم کرده است. هدف اصلی از ارائهٔ این مقاله معرفی مدلی است که امکان شبیه سازی سیستم هایی با ماهیت منفصل (اکثر محصولات کشاورزی) را فراهم می سازد. این مدل مبتنی است بر روش المان‌های مجزا DEM منتها با این ویژگی منحصر به فرد که قادر است اجسامی (دانه‌هایی) در مدل ایجاد نماید که شکلی غیر کروی دارند و مناسب شبیه سازی محصولات کشاورزی باشند. بررسی منابع نشان می‌دهد که مدل‌هایی با این ویژگی هنوز معرفی نشده‌اند. نتایج ارزیابی تحلیلی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اولاً این مدل به خوبی فرموله شده است و الگوریتم‌های آن می‌توانند به‌طور اتوماتیک دانه‌های در حال تماس را تشخیص دهند، نیروهای تماسی را محاسبه کنند و بر اساس برآیند نیرو و گشتاور وارد بر هر دانه در هر گام زمانی شتاب، سرعت، و موقعیت هر دانه را به روز کنند. مضافاً اینکه چنانچه خصوصیات مواد به خوبی اندازه گیری و به مدل داده شود این مدل قادر است با دقت قابل قبولی رفتار آن مواد را پیش‌بینی کند.

به‌منظور نشان دادن توانایی بالقوه مدل در شبیه‌سازی رفتار محصولات کشاورزی، چند مثال

www.SID.ir

Archive of SID

مختلف به‌علاوه نمونه اطلاعات قابل استخراج از مدل ارائه شد. این مثال ها به خوبی نشان می‌دهند که این مدل قادر است طیف وسیعی از عملیات مختلف را در فرایندهای پس از برداشت محصولات مختلف کشاورزی شبیه سازی کند. از آنجا که روش‌های آزمایشگاهی و نیز مدل‌های عددی روش‌هایی ایده آل در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی نیستند و هر یک نقاط ضعف خاصی دارد، پیشنهاد می‌شود در کنار روش‌های آزمایشگاهی روش‌های شبیه‌سازی عددی نیز مورد توجه قرار گیرد تا این دو بتوانند اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری را از رفتار مواد ارائه دهند. برای مثال، از روش‌های آزمایشگاهی می‌توان برای‌اندازه‌گیری خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی مواد استفاده کرد و از این نتایج به عنوان ورودی‌های مورد نیاز مدل‌های عددی بهره گرفت.

۶- 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 modeling of the dynamic behaviour of non-spherical particulate materials. Ph.D Thesis, University of Newcastle upon Tyne.**

3- **Brown, G. K., Pason, N. L. S., Timm, E. J., Burton, C. L., and Marshal, D. E. 1990. Apple Packing line Impact Damage Reduction. *Applied Engineering in Agriculture* 6, 759-764.**

4- **Chen, P., and Yazdani, R. 1991. Prediction of Apple Bruising Due to Impact on Different Surfaces. *Trans. of the ASAE* 34, 956-961.**

5- **Foutz, T. L., and Thompson, S. A. 1993. Comparison of Loading Response of Packed Grain and Individual Kernel. *Trans. of ASAE* 36, 569-576.**

6- **McRae, D. C., Melrose, H., and Fleming, J. 1995. Evaluation of the Performance of a Singulator for Potatoes. *Potato Research* 38, 53-60.**

7- **Ng, T. T., and Dobry, R. 1994. Numerical Simulation of Monotonic and Cyclic Loading of Granular Soils. *Journal of Geotechnical Engineering* 120, 388-403.**

8- **Ooi, J. Y., Chen, J. F., and Rotter, J. 1998. Measurement of Solids Flow Patterns in a Gypsum Silo. *Powder Technoly* 99, 272-284.**

9- **Peleg, K. 1986. Simulation of Vibration Damage in Produce Transportation. *Trans. of ASAE* 29, 633-641.**

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

11- **Ting, J., Meachum, L. R., and Rowell, J. D. 1995. Effect of Particle Shape on the Strength and Deformation Mechanism of Ellipse Shape Granular Assemblies. *Engineering Computations* 12, 99-108.**

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir