

## شبیه سازی عددی رفتار دینامیکی مواد دانه ای کشاورزی در محیط های گسسته با ارائه

### مدلی با المان های مجزا<sup>۱</sup>

محمد حسین عباسپور فرد<sup>۲</sup>

#### ۱- چکیده:

یکی از عوامل مهم در دقت شبیه سازی مدل های DEM، انطباق شکل المان های به کار رفته در مدل کامپیوتری با شکل ذرات یا اجسام در سیستم حقیقی است. مطالعات انجام شده به کمک مدل های DEM در زمینه سیستم های حاوی مواد دانه ای، تاکنون مدل هایی بوده اند که المان های به کار رفته در آنها کروی یا بیضی مانند بوده است. از آنجا که شکل اکثر میوه ها و سبزی ها غیر کروی و نامنظم اند مدل های حاوی این گونه المان ها نمی تواند بیان کننده رفتار دقیق آنها باشد. مقاله حاضر مدلی را ارائه می کند که المان های آن می تواند کروی یا غیر کروی باشد. در این مدل، شکل هر المان با ترکیبی از گوی ها (کرات در سیستم های سه بعدی و دواپر در دو بعدی) با اندازه های مختلف، با هم پوشانی دلخواه بین آنها تعیین می شود به طوری که شکل نهایی آنها بسیار نزدیک به شکل واقعی میوه یا محصول مورد نظر باشد. نتایج ارزیابی تئوری مدل نشان دهنده تنها ۰/۰۷ درصد خطاست که این امر دلالت بر صحت فرموله شدن مدل و الگوریتم های موجود در آن است. همچنین، نتایج ارزیابی تجربی مدل برای بررسی دقت پیش بینی رفتار یک سیستم فیزیکی مشابه نشان می دهد که مدل توانسته است با دقت ۸۲ درصد رفتار سیستم را پیش بینی کند. این میزان خطا می تواند 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، نمونه هایی 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 می کنند.

#### ۲- واژه های کلیدی:

المان های مجزا، رفتار دینامیکی، شبیه سازی عددی، مواد دانه ای

۱- برگرفته از Discrete Element Modeling

۲- عضو هیئت علمی گروه ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳ مشهد.

تلفن: ۰۵۱۱ ۸۷۹۵۶۱۲-۱۷، فاکس: ۰۵۱۱ ۷۸۷۴۳۰ - پیام نگار: abaspour@ferdowsi.um.ac.ir

## ۱- مقدمه:

این دو حالت به طور قابل توجهی متفاوت است [۵] به خصوص اگر دانه‌ها از نظر شکل و اندازه در داخل سیستم متفاوت باشند. از طرفی به منظور صرفه‌جویی در وقت و کاهش هزینه‌ها، اکثر مطالعات تجربی در زمینه جا به جایی و انتقال غلات به خصوص در سیلوها، به کمک مدل‌های کوچک‌تر از سیلوهای حقیقی و در حالت‌های بسیار ساده و خاص انجام گرفته است. اطلاعات حاصل از این گونه مدل‌های کوچک فیزیکی باید از طریق برون‌یابی به مدل‌های حقیقی تعمیم یابد که این امر اغلب سبب تفسیر به غلط نتایج می‌شود [۸]. محاسبه و تخمین نیروهای برخورد بین دانه‌ها در مواد توده همیشه از مسائل مورد علاقه محققان بوده و هست. مطالعات تجربی انجام شده در خصوص برآورد صدمات در میوه‌های نرم به هنگام برخورد با همدیگر یا با سطوح داخلی ماشین‌های فرآوری منجر به ساخت و توسعه دستگاه کره‌ثبات<sup>۴</sup> 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 وسیله<sup>۵</sup> کروی با قرارگیری در داخل مواد در حال حرکت، با اندازه‌گیری شتاب لحظه‌ای وارد برخوردش، می‌تواند 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 می‌کند لذا در شرایطی که چندین ضربه متقابل به

محصولات دانه‌ای<sup>۱</sup> کشاورزی از ابتدای مرحله کاشت تا رسیدن به دست مصرف‌کننده، 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 میوه‌های نرم و شکستگی در مواد بیولوژیک سخت‌تر است. تحقیقات نشان می‌دهد که تلفات حاصل از این گونه صدمات در سطح جهانی بالغ بر ۳۰ درصد است [۹].

برای بهبود تجهیزات حمل و نقل و فرآوری به منظور کاهش صدمات، اطلاعات جامعی در مورد خصوصیات فیزیکی و رفتار دینامیکی این گونه مواد مورد نیاز خواهد بود. اگرچه تعیین بسیاری از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد صرفاً از طریق تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی امکان‌پذیر است، رفتار دینامیکی آنها را می‌توان تماماً و با استفاده از مدل‌های تئوری یا عددی نیز مطالعه کرد به طوری که اطلاعات به دست آمده از این مدل‌ها می‌تواند به مراتب دقیق‌تر 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 می‌شود.

اکثر محصولات کشاورزی به صورت توده<sup>۶</sup> فله منتقل و فرآوری می‌شوند، با وجود این، رفتار آنها باید هم به صورت منفرد<sup>۲</sup> و هم به صورت توده<sup>۳</sup> مطالعه شود، زیرا رفتار مکانیکی این گونه مواد در

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، دانه غلات، و غیره باشد.

- مدل‌های مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته<sup>۱</sup>  
 - مدل‌های مبتنی بر مکانیک محیط‌های گسسته<sup>۲</sup>  
 روش المان‌های محدود<sup>۳</sup> (FEM) و روش المان‌های مرزی<sup>۴</sup> (BEM) دو روش معمول و شناخته شده مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته هستند. این روش‌ها برای مطالعه مواد دانه‌ای (محیط‌های گسسته) نیز به کار می‌روند. ولی فقط موقعی می‌توانند برای این محیط‌ها مفید باشند که اندازه اجزای تشکیل دهنده سیستم (دانه‌ها) از ابعاد کلی سیستم به مراتب کوچک‌تر باشد (مثل دانه‌های گندم در سیلو یا ذرات خاک در نمونه خاک). چنانچه این ویژگی در سیستم شبیه‌سازی شده وجود نداشته باشد، یعنی ابعاد دانه‌ها نسبت به ابعاد سیستم نسبتاً بزرگ باشد (مثلاً شبیه‌سازی جعبه با تعدادی محدود میوه)، فرض پیوستگی محیط در سیستم دور از واقعیت است و نتایج به دست آمده از مدل شبیه‌سازی شده خطای زیادی دارد و قابل تعمیم به مدل فیزیکی مشابه نخواهد بود [۱۰].

در مدل‌های مبتنی بر محیط‌های گسسته، رفتار کلی هر سیستم با شبیه‌سازی رفتار تک تک اجزای تشکیل دهنده آن شبیه‌سازی می‌شود. با افزایش روز افزون سرعت کامپیوترها این امکان فراهم شده است تا محاسبه موقعیت، شتاب، و سرعت تک تک اجزای سیستم منفصل که متشکل از تعداد نسبتاً زیادی المان (دانه) است، امکان پذیر باشد. لذا این مدل‌ها که طبیعت گسسته سیستم‌های حاوی اجزای منفصل را مد نظر قرار می‌دهند و رفتار سیستم را از روی رفتار تک تک اجزای آن شبیه‌سازی می‌کنند، تحت عنوان مدل‌های با المان‌های

طور همزمان برآن وارد آید بین اندازه 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 میوه‌های حقیقی و غیر کروی بودن میوه‌ها خطاهای دیگری نیز در نتایج به دست آمده از این دستگاه بروز می‌کند. زیرا شکل دانه‌ها یکی از فاکتورهای مؤثر در رفتار مواد دانه‌ای است [۱۱].

گسترش سریع کامپیوتر سبب شد تا با استفاده از آن شبیه‌سازی 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 می‌توان نتایج متفاوتی به دست آورد در حالی که 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 می‌توان از داخل سیستم در هر زمان دلخواه استخراج کرد در حالی که در مدل‌های تجربی این کار اگر ناممکن نباشد بسیار مشکل خواهد بود. بنابراین، جهت مطالعه رفتار دینامیکی مواد مدل‌های عددی می‌توانند مکمل مناسبی برای روش‌های تجربی باشند.

- استفاده از مدل‌های عددی در مطالعه رفتار مواد دانه‌ای

مطالعات انجام شده به کمک مدل‌های عددی روی مواد دانه‌ای (میوه‌ها و غلات) بر اساس دو اصل متفاوت پایه‌گذاری، برنامه‌سازی، و تدوین می‌شوند:

کشاورزی و صنعتی کروی نیست، نتایج به دست آمده از این مدل‌ها نمی‌تواند به سادگی به یک مدل واقعی تعمیم داده شود. شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط (Ng and Dobry, 1994) نشان داد که چنانچه از المان‌های کروی در مدل استفاده شود، نتایج شبیه‌سازی حکایت از چرخش بیش از حد دانه‌ها دارد و مقاومت برشی مواد را به مراتب کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌کند. از طرف دیگر، در مدل‌های 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 شبیه‌سازی 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 دانه‌ها در یک مدل واقعی مورد مطالعه ایجاد کند. این مدل، که روش کرات ترکیب نامگذاری شده است، می‌تواند المان‌ها یا اجسام را به صورت سه بعدی به گونه‌ای تولید کند که هر جسم متشکل از یک یا چند کره با هم پوشانی یا بدون هم پوشانی و با اندازه‌های مختلف متصل به هم ساخته شده باشد. از آنجا که اکثر میوه‌ها، سبزی‌ها، و دانه‌ها غیر کروی و با سطوح خارجی محدب هستند، دانه‌های ایجاد شده به این روش ممکن است به گونه‌ای با ترکیب متفاوتی از کرات مختلف ساخته شوند تا به شکل میوه و دانه‌های واقعی نزدیک‌تر باشند. از آنجا که اجزای بنیادی هر المان در این مدل کره است بنابراین تماس بین المان‌ها در مدل را می‌توان بر اساس محاسبات

مجزا<sup>۱</sup> (DEM) شناخته می‌شوند. در این مدل‌ها، جهت شبیه‌سازی رفتار هر سیستم مراحل زیر طی می‌شود:

- تولید و ایجاد دانه‌ها (المان‌ها) و دیواره‌های سیستم،

- تعیین زوج المان‌های در تماس با هم یا با دیواره‌ها در هر گام زمانی<sup>۲</sup>،

- محاسبه نیروهای تماسی بین دانه‌ها یا بین دانه‌ها و دیواره‌ها،

- به دست آوردن شتاب، سرعت، و موقعیت دانه‌ها در اثر برآیند نیروهای وارد بر هر دانه در انتهای هر گام زمانی،

- تکرار سه مرحله دوم، سوم، و چهارم به دلخواه کاربر در سیکل بسته تا رفتار سیستم طی یک فرایند شبیه‌سازی شود.

### - معرفی مدل روش کرات ترکیب (MSM)<sup>۳</sup>

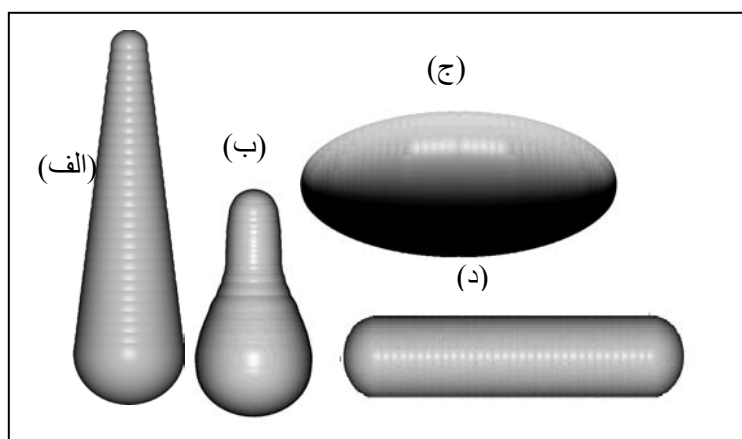
در این مقاله مدلی ارائه می‌شود که می‌تواند المان‌هایی تولید نماید که نسبت به دیگر مدل‌های ارائه شده (مثل مدل‌های دایره‌ای و بیضوی که تاکنون در زمینه شبیه‌سازی مواد دانه‌ای کشاورزی ارائه شده‌اند)، از نظر شکل بسیار نزدیک‌تر به دانه‌های محصولات کشاورزی باشند. المان‌های به کار رفته در اکثر مدل‌های ارائه شده در این زمینه کروی (دایره در مدل‌های دو بعدی) بوده‌اند. محاسبات مکانیکی مربوط به نیروهای تماسی بین این گونه 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

1- Discrete Element Models

3- Multi-Sphere Method

2- Time step

تماس بین دو کره در نظر گرفت که سبب می‌شود الگوریتم مربوط تقریباً همان سادگی مدل‌هایی را داشته باشد که شکل المان‌های آن صرفاً کره‌ای یا دایره‌ای است با این مزیت که شکل کلی المان‌ها در این مدل هر چیز دلخواهی نزدیک به شکل واقعی دانه‌ها خواهد بود. شکل شماره ۱ نمونه‌هایی از المان‌های ایجاد شده در این مدل را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۱- نمونه‌هایی از شکل‌های 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.

نیروی تماسی بین دو کره از دو دانه در حال تماس انجام می‌گیرد. در هر دانه، نیروهای تماسی تمام کرات تشکیل دهنده آن با کرات تشکیل دهنده دانه‌های مجاور محاسبه می‌شود و سپس این نیروهای تماسی به مرکز ثقل آن دانه منتقل می‌شوند. قابل ذکر است که اصولاً تماس بین کرات تشکیل دهنده هر دانه به صورت نیروهای داخلی است که در محاسبه برآیند نیروهای خارجی وارد بر دانه (مثل نیروهای حاصل از برخورد دانه‌ها با هم یا با دیواره‌ها) مد نظر نیست، لذا این گونه نیروها در مدل محاسبه نمی‌شوند.

در هر نقطه تماس بین دو کره از دو دانه در حال تماس، نیروی تماسی بر حسب دو مؤلفه عمود و مماس بر سطح تماس در آن نقطه محاسبه می‌شود

#### 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 پیکره یک دانه را تشکیل می‌دهد به طوری که وقتی بخش‌ها در کنار هم قرار می‌گیرند شکل کلی آن دانه در داخل مدل به دست می‌آید. تماس هر دانه با دانه‌ای دیگر از طریق بخش نمایان کرات تشکیل دهنده هر دانه است، با این پیش فرض که آن قسمت از هر کره که داخل کره دیگر فرو رفته و نمایان نیست قادر به تماس با کره‌ای دیگر نخواهد بود. بنابراین دانه‌ها در داخل مدل از طریق کرات تشکیل دهنده خود با همدیگر در تماس خواهد بود. لذا نیروهای تماسی بین دانه‌ها از طریق محاسبه

$$\mathbf{M}_p = \sum_{s=1}^S [(\mathbf{d}_{ps} \times \mathbf{f}_{ps}) + \mathbf{M}_{t_{ps}}] \quad (۴)$$

در این معادله،  $S$  تعداد کرات تشکیل دهنده هر دانه و  $\mathbf{d}_{ps}$  فاصله بین مرکز ثقل دانه و مرکز هر کره تشکیل دهنده آن است. بر همین اساس برآیند کل نیروهای تماسی وارد بر هر دانه از طریق جمع برداری نیروهای وارد بر تمام کرات تشکیل دهنده هر دانه محاسبه می‌شود. با محاسبه 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:

$$\alpha_p = \frac{\mathbf{M}_p}{I_p} \quad \text{و} \quad \mathbf{a}_p = \frac{\mathbf{f}_p}{m_p} + \mathbf{g} \quad (۵)$$

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

#### – ایجاد سیستم شبیه سازی شده در مدل:

قبل از اجرای برنامه شبیه سازی که برنامه‌ای به زبان فرترن ۹۰ است، باید کلیه 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 به هم در داخل دانه مشخص شود. این گونه اطلاعات از طریق یک فایل ورودی و با استفاده از یک سری دستورهای قابل تشخیص توسط برنامه اصلی وارد می‌شود.

به طوری که برآیند این دو نیرو، کل نیروی تماسی وارد بر دانه در این نقطه خواهد بود، لذا:

$$\mathbf{f}_c = \mathbf{f}_n + \mathbf{f}_t \quad (۱)$$

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

$$\mathbf{M}_{t_{psc}} = \sum_{c=1}^C (\mathbf{r}_{psc} \times \mathbf{f}_{t_{psc}}) \quad (۲)$$

که در آن،  $\mathbf{f}_{t_{psc}}$  مؤلفه 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:

$$\mathbf{f}_{ps} = \sum_{c=1}^C \mathbf{f}_{psc} \quad (۳)$$

نقطه اثر این نیروها، در سطح خارجی کره است لذا در فرایندی محاسباتی به مرکز آن دایره منتقل می‌شوند. نیروهای منتقل شده به مرکز هر کره نیز گشتاوری حول مرکز ثقل دانه مربوط به خود ایجاد می‌کنند (آنهايي که خط اثر آنها از مرکز دانه نمی‌گذرد) که این مقدار به گشتاور محاسبه شده در اثر نیروهای مماسی (معادله شماره ۲) اضافه می‌شود و کل گشتاور اعمال شده بر هر دانه به صورت زیر قابل محاسبه است:

مانند نشان دهنده تحکیم و ثبات دانه‌ها در سیستم است. انتقال و جا به جایی مواد در سیستم عددی با اعمال شتاب در یک جهت خاص به دانه‌ها و یا با اعمال سرعتی معین بر سطوح نگهدارنده مواد (نقاله) تا هر زمان دلخواه که کاربر مشخص می‌کند کنترل می‌شود. برای اطلاعات بیشتر در مورد مشخصات برنامه، فلوجارت گردش کار و الگوریتم‌های به کار رفته در مدل، به منبع شماره ۲ مراجعه شود.

#### - پردازش داده و نتایج شبیه‌سازی

از این مدل عددی نتایج مختلف و متنوعی را کاربر می‌تواند در هر مرحله از شبیه‌سازی 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 نمی‌توان از یک مدل فیزیکی مشابه استخراج کرد. بسته به هدفی که از شبیه‌سازی انتظار می‌رود، 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 دانه‌ها) و تغییرات نیروی تماسی و جهت آن بین دو دانه و یا بین دانه‌ها و دیواره‌ها اشاره کرد. این نتایج می‌تواند با نرم افزار آماری مناسب و یا گرافیکی به نمایش درآید و پردازش شود. در مورد شبیه‌سازی سیستم‌های سه بعدی، دیدن حرکات دانه‌ها در فرایند شبیه‌سازی به صورت عکس و تصاویر متحرک یا انیمیشن اهمیت خاصی دارد. این مدل توانایی آن را دارد تا اطلاعات

خلق یا ایجاد دانه در مدل از طریق یک زیرروال و بر اساس داده‌های ارائه شده در فایل ورودی انجام می‌گیرد. در این زیرروال، امکان خلق دانه‌های کروی و غیرکروی، هر دو، وجود دارد. ابتدا دانه‌ها در فضای سه بعدی عاری از شتاب ثقل زمین و بدون تماس با هم به صورت غیر متراکم و به ترتیب خلق می‌شوند. با دادن اطلاعات یک دانه به مدل، اطلاعاتی مانند تعداد کرات در برگیرنده آن، اندازه هر کره، و فاصله 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 نمونه خلق شده حتی المقدور شبیه نمونه‌ای واقعی باشد. علاوه بر این، فاصله دانه‌ها 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 مجموعه دانه‌های خلق شده غیرمتراکم باید روی هم انباشته شوند و تحکیم یابند. مرحله ایجاد تحکیم دانه‌ها در مدل با اعمال شتاب ثقل بر سیستم انجام می‌گیرد. شتاب ثقل می‌تواند همان شتاب ثقل زمین یا هر مقدار دلخواه باشد ولی مقدار آن روی زمان تحکیم و پایداری سیستم عددی تأثیر 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

را به صورت فایل‌های متنی<sup>۱</sup> قابل خواندن اتوماتیک با برنامه‌هایی مثل اتوکد و پاور<sup>۲</sup> ارائه کند. این فایل‌ها پس از اینکه با توالی مناسب زمانی تبدیل به فایل‌های گرافیکی شدند به نرم افزارهای انیمیشن ساز مثل جی‌ف انیمیتور<sup>۳</sup> منتقل و به فایل‌هایی با تصاویر متحرک و با فرمت GIF و یا AVI تبدیل می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فایل‌های 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 پاور<sup>۲</sup> به فایل‌های گرافیکی تبدیل می‌شود در حالی که نرم افزار اتوکد در این گونه مواقع به دلیل نیاز به حافظه 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 [۲].

### - ارزیابی مدل

میزان دقت روش‌هایی مثل مدل‌های DEM در پیش بینی رفتار دینامیکی مواد واقعی بستگی به دو عامل مهم دارد: اول درجه صحت معادلات مکانیک تماس بین دانه‌ها در مقیاس دانه‌ای<sup>۴</sup> و دوم سینماتیک دانه‌ها در مقیاس کل سیستم<sup>۵</sup>. بررسی میزان اثر عامل دوم در دقت نتایج حاصل از مدل، از طریق مقایسه 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<sup>۶</sup> بررسی کرد. بنابراین به منظور

ارزیابی مدل عددی از نقطه نظر صحت منطقی الگوریتم‌ها در محاسبه نیروهای تماسی و موقعیت لحظه‌ای دانه‌ها شبیه‌سازی‌های متعددی انجام گرفت. در این شبیه‌سازی‌ها، مواردی مقایسه شدند مثل: محاسبه وزن دانه در مدل از طریق محاسبه نیروی تماس دانه با سطح تماس، محاسبه 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 ضرایب 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 تأثیر دو عامل گام زمانی و ضریب میرایی<sup>۷</sup> روی میزان دقت نتایج حاصل از مدل بررسی شد. نتیجه این بررسی‌ها نشان می‌دهد که به طور متوسط میزان خطای مدل بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ درصد برای شبیه‌سازی حرکت مواد روی سطوح مختلف و ۰/۰۷ درصد در شبیه‌سازی برخورد دانه در سقوط آزاد روی یک سطح بوده است [۱].

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

1- Script file  
4- Micro-scale  
7- Damping coefficient

2- PovRay  
5- Macro-scale

3- GIF Animator  
6- Analytical



کروی (۲۰۰ عدد) ایجاد و مواردی مثل ساختار بستر دانه<sup>۳</sup> در مدل، شدت جریان خروج دانه از سیستم، شکل خروج مواد از دهانه خروجی، و پروفیل سرعت دانه‌ها در سیستم مقایسه شدند. در کلیه موارد، همخوانی مناسبی بین نتایج به دست آمده از مدل عددی و مدل فیزیکی مشاهده شد [۲].

#### ۴) کاربرد مدل در فراوری محصولات کشاورزی

هدف از این بخش نشان دادن توانایی‌های مدل Multi-Sphere یا MSM در شبیه‌سازی انتقال و فراوری مواد کشاورزی و صنعتی در وضعیت‌های مختلف است. بدین منظور مثال‌هایی از کاربرد این مدل در سیستم‌هایی ارائه می‌شود که حاوی دانه‌های غیر کروی و یا کروی هستند. در هر مثال دانه‌هایی 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.

#### – شبیه‌سازی سقوط میوه

سقوط میوه و سبزی از مسائلی است که می‌توان گفت اگر نه در تمام مراحل فراوری بلکه در اکثریت قریب به اتفاق آنها رخ می‌دهد. مطالعه 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 میوه‌ها مثل گلابی، بادمجان و ...) مطابق شکل شماره ۲ ایجاد شد.

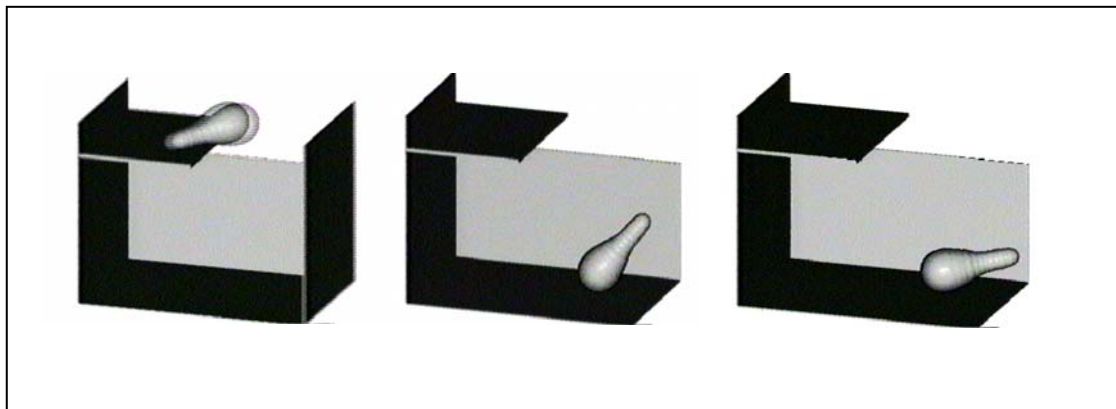
فیزیکی مشخص چه مقدار است. بدین منظور، آزمایش‌هایی در جهت ارزیابی کارایی مدل در پیش بینی رفتار سیستمی حاوی مواد واقعی در دو مقیاس دانه‌ای و مقیاس توده‌ای کل سیستم انجام گرفت. در ارزیابی مقیاس دانه‌ای، سیستمی با تعدادی محدود (۱۰ عدد) دانه غیر کروی به صورت فیزیکی ساخته شد و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مورد 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<sup>۱</sup> 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 مرحله بعد به کمک نرم افزار تصاویر برداشت شده با دوربین تبدیل به تصاویر دیجیتالی<sup>۲</sup> و هر فریم (تصویر) به یک فایل گرافیکی تبدیل شد. با استفاده از این فایل‌ها مختصات  $X$ ،  $Y$ ،  $Z$  و میزان دوران هر دانه به فواصل زمانی  $0/0005$  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.

به منظور ارزیابی مدل در مقیاس توده‌ای مجدداً دو مدل فیزیکی و عددی مشابه، با تعدادی دانه غیر

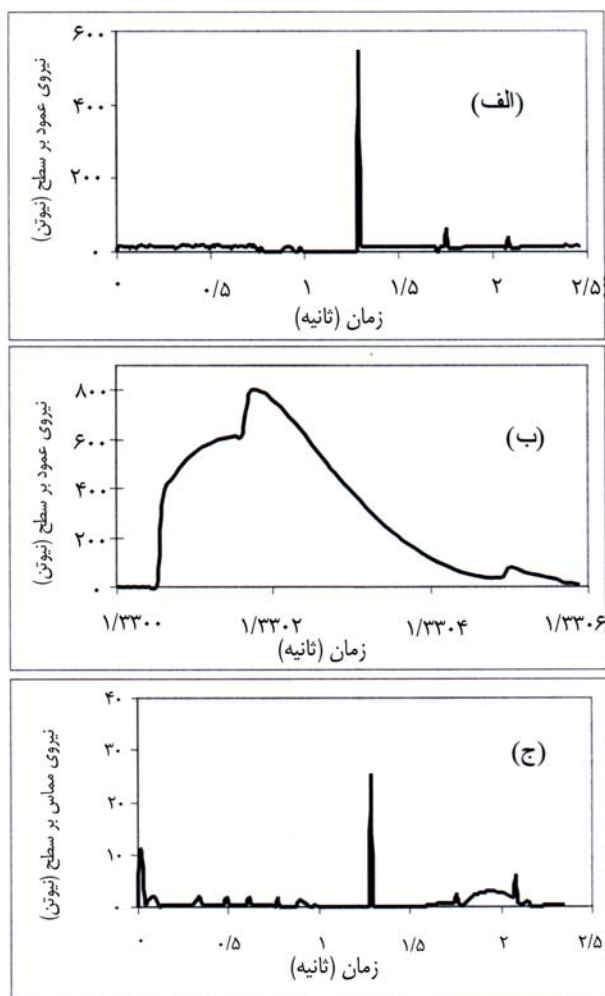
1- <http://www.measurementsgroup.com/>

2- Frame grabber

3- Bed Structure



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



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

نشان می‌دهد که حداکثر نیروی ضربه در این دو شکل از نظر مقدار متفاوت است؛ در شکل الف اطلاعات به فاصله 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 شماره ۳ ج نیروهای مماسی (مالشی) وارد بر جسم 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 مقایسه 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 شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این مدل در زمینه مطالعه نیروی ضربه و له شدن میوه‌هایی که حتی شکل غیر کروی دارند، کاربرد جالب توجهی می‌تواند داشته باشد.

### – شبیه‌سازی حرکت مواد

انتقال مواد با نقاله‌های تسمه‌ای یکی از روش‌های متداول در انتقال مواد دانه‌ای در کشاورزی است. در این مثال، رفتار مواد هنگام سقوط روی نقاله 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 شبیه‌سازی حرکت محصولاتی مثل چغندر قند یا هویج استفاده شوند. هدف اصلی از ارائه این مثال

این جسم از طریق اتصال، ادغام، و هم پوشانی ۱۵ کره با اندازه‌های مختلف به گونه‌ای در کنار هم چیده شده‌اند تا شکل مورد دلخواه ایجاد شود.

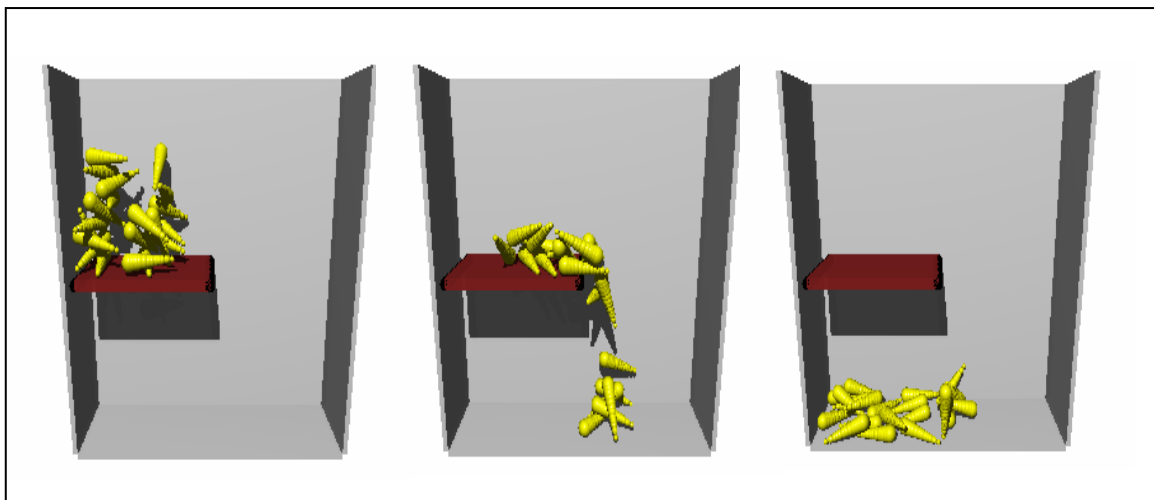
فضای محصور کننده سیستم متشکل از دیواره‌های نگهدارنده عمودی و دو نقاله افقی است. نقاله بالایی به سمت چپ و نقاله کف به سمت راست حرکت می‌کند. همان‌طور که در سه تصویر متوالی از حرکت جسم مشاهده می‌شود مدل عددی به خوبی توانسته است چرخش جسم را در حین سقوط در یک سیستم سه بعدی شبیه‌سازی کند. هنگام سقوط مواد ویسکوالاستیک حداکثر نیروی عمودی در لحظه اولین برخورد در جسم ایجاد خواهد شد و سپس با توجه به خصوصیات ویسکوالاستیک جسم (ضریب میرایی) و میزان ارتجاعی بودن آن، چندین مرتبه بالا پایین می‌شود و سپس به حالت تعادل می‌رسد. شکل شماره ۳ نمونه‌ای از اطلاعاتی را نشان می‌دهد که مدل می‌تواند ارائه کند. شکل شماره ۳ الف تغییرات نیروی عمودی وارد بر جسم را قبل، در حین، و پس از سقوط نشان می‌دهد. این اطلاعات به فاصله زمانی ۰/۰۰۰۵ (پنج ده هزارم) ثانیه (هر ۵۰ گام زمانی) اخذ شده است

به منظور بررسی دقیق‌تر نیروی ضربه وارد بر جسم در اولین برخورد، اطلاعات مربوط به این نیرو به صورت دقیق‌تر و به صورت برداشت اطلاعات به فاصله یک گام زمانی ( $10^{-5}$  ثانیه) در شکل شماره ۳ ب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این نمودار اطلاعات بسیار دقیقی از نحوه تغییرات نیروی ضربه وارد بر جسم را نشان می‌دهد. مقایسه شکل شماره ۳ الف با ۳ ب

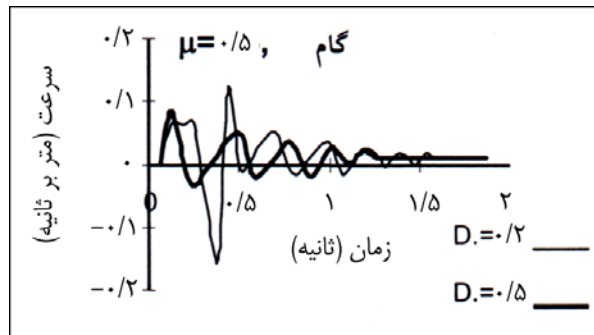
مثال، شکل شماره ۵ رفتار یکی از اجسام را هنگام سقوط روی نقاله در حال حرکت نشان می‌دهد. در این شکل نشان داده شده است که چگونه تغییر ضریب میرایی بر نحوه حرکت جسم اثر خواهد داشت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب میرایی بین جسم و سطح، حرکت جست و خیزی جسم کاهش می‌یابد و روی نقاله سریع‌تر به حالت پایدار خود می‌رسد. این موضوع اهمیت پوشش نرم روی سطوح را برای میوه‌های 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.

نشان دادن قابلیت این مدل در شبیه‌سازی سیستم‌های 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 نقاله‌ای در کف با حرکت به سمت چپ و ۲۰ جسم مخروطی شکل است. هر جسم متشکل است از ۱۳ کره با قطرهای 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 شماره ۴).

هرگونه اطلاعاتی در زمینه سرعت حرکت تک اجسام و نیروهای وارد بر آنها از طرف دیگر اجسام یا سطوح مختلف (شبه آنچه در مثال قبل مشاهده شد) به سهولت امکان پذیر است. برای



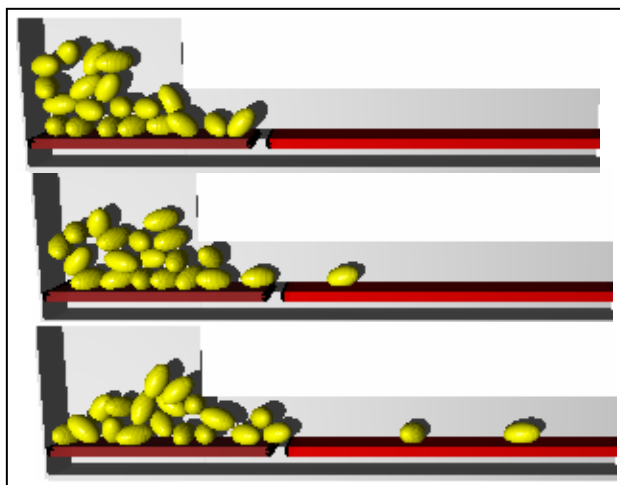
شکل شماره ۴- سه تصویر متوالی از شبیه‌سازی حرکت مواد با نقاله. حرکت نقاله بالایی به سمت راست و نقاله کف به سمت چپ در نظر گرفته شده است.



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

بیضی دلخواه و تعداد کرات تشکیل دهنده جسم، قطر هر کره و مرکز آن را در داخل جسم به گونه‌ای مشخص کند که سطح خارجی جسم تشکیل دهنده بر بیضی موردنظر محاط باشد. مکانیزم تک‌سازی در این مثال متشکل از دو نقاله افقی با حرکتی هم جهت ولی با مقادیر مختلف است به طوری که سرعت نقاله اولی کمتر از سرعت نقاله دوم باشد. مواد در ابتدا روی نقاله اولیه کم سرعت به صورت درهم ریخته می‌شوند و با این نقاله به طرف نقاله ثانویه پر سرعت هدایت می‌شوند که در مجاورت آن قرار گرفته است. هر جسمی که زودتر با نقاله ثانویه برخورد کند سرعت آن بیشتر می‌شود و به صورت عضوی مجزا از دیگر مواد جدا می‌شود.

- شبیه‌سازی برای تک‌سازی میوه‌ها و سبزی‌ها  
واژه تک‌سازی برای فرایندی به کار می‌رود که طی آن میوه‌ها (یا هر محصول دانه‌ای دیگر) از حالت فله‌ای نامنظم به صورت اجزای ناپیوسته و منظم به صف در می‌آیند [۶]. این کار یکی از عملیات معمول قبل از فرایندهایی مثل بازرسی و بسته‌بندی محصول است. در این مثال، ۲۰ عدد جسم بیضوی (مناسب شبیه‌سازی محصولات جالیزی) به صورت توده‌ای درهم (فله) ایجاد شد. هر جسم با ادغام ۱۵ کره با اندازه 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



شکل شماره ۶- سه تصویر متوالی از شبیه‌سازی مدل MSM در تک سازی محصولات کشاورزی

امکان شبیه سازی سیستم هایی با ماهیت منفصل (اکثر محصولات کشاورزی) را فراهم می‌سازد. این مدل مبتنی است بر روش المان‌های مجزا DEM متتها 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 اندازه‌گیری 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

عواملی مثل سرعت مطلق و نسبی نقاله‌ها، ضریب اصطکاک بین محصول و نقاله اولیه و ثانویه، و حجم مواد جا به جا شده از عواملی هستند که بر کیفیت جداسازی و مقدار نیروی سایش (خراشیدگی میوه‌ها) تأثیر می‌گذارند. در یک مدل عددی، تکرار فرایند شبیه‌سازی جهت بررسی اثرهای عوامل فوق تنها با تغییر مقادیر آنها در مدل به سهولت انجام می‌گیرد حال آنکه در سیستم‌های فیزیکی وقت و هزینه زیادی باید به این منظور صرف شود. نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی برای این گونه عملیات تک‌سازی در شکل شماره ۶ نشان داده شده است. در این شکل، سه تصویر با توالی زمانی مناسب مشاهده می‌شود که نشان دهنده اجسام جدا شده از محصول فله است.

##### ۵- نتیجه گیری:

با توجه به گسترش روز افزون کامپیوتر و روند فوق العاده افزایش سرعت در آنها، امکان انجام تحقیقات بر پایه شبیه‌سازی عددی نیازمند به محاسبات بسیار زیاد و سیکلی را فراهم کرده است. هدف اصلی از ارائه این مقاله معرفی مدلی است که

مختلف به علاوه نمونه اطلاعات قابل استخراج از مدل ارائه شد. این مثال‌ها به خوبی نشان می‌دهند که این مدل قادر است طیف وسیعی از عملیات مختلف را در فرایندهای پس از برداشت محصولات مختلف کشاورزی شبیه‌سازی 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 برای اندازه‌گیری خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی مواد استفاده کرد و از این نتایج به عنوان ورودی‌های مورد نیاز مدل‌های عددی بهره گرفت.

## ۶- مراجع:

- 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.

## **Numerical Simulation of the Dynamic Behaviour of Agricultural Particulate Materials Using a Suitable Discrete Element Model**

**M. H. Abbaspour Fard**

One of the most important factors in the accuracy of a DE model is the shape of elements in the model. Currently circular shape (spherical in 3-D) is the common approach for the simulation of particulate bio-material. As the real shapes of these particles are mostly non-spherical, these models can not accurately represent the behaviour of a system comprising some real particles. In this paper a new model is introduced which can generate and simulate arbitrary non-spherical particles suitable for the simulation of fruits and vegetables which are not spherical. The results obtained from the analytical validation of the model showed 0.07% error which indicates that, formulas and the algorithms were well implemented in the model. The experimental validation of the model also showed that the model could predict the behavior of a physical system with 82% accuracy. Consideration of both the analytical and experimental validations of the model showed that on the whole the match between experiments and simulations were very good given the noise introduced by physical replication of the particle assembly and the variation in physical particle geometry and the hopper structure. To demonstrate the capability of the model some simulation examples have been presented. In these examples different particle shapes have been used in some systems typical of most agricultural system operations. The snapshots obtained from the simulations indicate that the Multi-sphere model can be a promising technique for the simulation of particulate bio-materials problems.

**Key words:** Discrete Elements, Dynamic Behaviour, Numerical Modeling, Particulate Materials