ایجاد، بازتولید و بسته‌بندی احجام تصادفی به منظور استفاده از آن‌ها در تحلیل مواد ناپیوسته به روش المان مجزا

سیدعلی سجادی[1]، خلیل خلیلی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

2-دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

(دریافت: اسفند 1393 پذیرش: تیر 1394)

چکیده

امروزه با گسترش روزافزون نیاز به شبیه‌سازی مواد گرانول و نیز شبیه‌سازی دانه‌بندی مواد، ایجاد احجام و سطوح تصادفی اهمیت چشمگیری پیدا کرده است. ازآنجایی‌که مواد ناپیوسته دارای ذراتی با شکل تصادفی هستند، به همین دلیل ایجاد احجام تصادفی و استفاده از آن‌ها به‌عنوان بلوک‌های مجزا در تحلیل‌های المان مجزا، می‌تواند کمک شایانی در نزدیک کردن نتایج تحلیل‌های عددی مواد ناپیوسته به نتایج تجربی، انجام دهد. در این مقاله یک روند مناسب برای ایجاد و آماده‌سازی ذرات دارای اشکال پیچیده، به‌منظور استفاده از آن‌ها در تحلیل‌های مواد ناپیوسته به روش المان مجزا، ارائه می‌گردد. برای این منظور، ابتدا به ایجاد احجام و سطوح تصادفی با استفاده از دو الگوریتم پیشنهادی جدید، پرداخته می‌شود. سپس برای اینکه احجام تصادفی ایجاد شده، در نرم‌افزارهای تحلیلی که از روش المان مجزا استفاده می‌کنند، قابل استفاده باشند، الگوریتمی برای بازتولید آن‌ها از طریق مونتاژ کره‌ها بر روی یکدیگر ارائه می‌گردد. درنهایت، ازآنجایی‌که ورودی اولیه در تحلیل مواد ناپیوسته، مجموعه‌ای بسته‌بندی شده از بلوک‌های مجزا است، با ارائه‌ی یک الگوریتم بسته‌بندی جدید، به بسته‌بندی این بلوک‌های مجزا پرداخته می‌شود. کلیه‌ی الگوریتم‌های موجود در این مقاله، به‌صورت موفق پیاده‌سازی شده و نتایج آن‌ها در محیط یک نرم‌افزار مدلسازی هندسی، به نمایش درآمده‌اند.

کلمات کلیدی

شکل ذرات، بازتولید مدل سه‌بعدی، مواد گرانول، اشکال تصادفی، روش المان مجزا

* عهده دار مکاتبات: kkhalili@birjand.ac.ir

1- مقدمه

امروزه با گسترش روزافزون نیاز به شبیه‌سازی مواد گرانول و نیز شبیه‌سازی دانه‌بندی مواد، ایجاد احجام و سطوح تصادفی اهمیت چشمگیری پیدا کرده است. ازآنجایی‌که مواد گرانول واقعی، ذرات غیر کروی هستند که می‌توانند به یکدیگر بچسبند، مدلسازی توده‌ی گرانول تنها با استفاده از ذرات کروی، ممکن است کافی و دقیق نباشد، ازاین‌رو می‌توان از احجام تصادفی شبه کره یا احجام تصادفی با شکل‌های پیچیده‌تر استفاده نمود[5-1].

مواد مهندسی عمدتاً دارای ساختاری به‌صورت دانه‌بندی هستند که این دانه‌ها به‌صورت تصادفی در کنار هم قرار می‌گیرند. محاسبه‌ی سطح/حجم دانه‌ها و مقایسه‌ی آن با سطح/حجم خالی، موضوعی است که در بسیاری از کاربردها، اهمیت دارد. مدلسازی دانه‌بندی می‌تواند ابزاری مفید در این راستا باشد و اولین گام در جهت مدلسازی دانه‌بندی، ایجاد احجام تصادفی است.

از کاربردهای سطوح تصادفی، می‌توان به ایجاد سطوح با زبری تصادفی و استفاده از آن‌ها در شبیه‌سازی پدیده‌ی اصطکاک و سیستم‌های سایش‌شناسی، اشاره کرد.

این پژوهش سعی می‌نماید تا با استفاده از تکنیک‌های نرم‌افزاری و مدلسازی هندسی، روشی جهت ایجاد احجام و سطوح تصادفی پیشنهاد نماید. برای این منظور دو الگوریتم ابتکاری برای ایجاد احجام و سطوح تصادفی طراحی گردید، سپس این الگوریتم‌ها در محیط برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک پیاده‌سازی شده و در نهایت از طریق لینک کردن نرم‌افزار ویژوال بیسیک به نرم‌افزار طراحی کتیا، خروجی آن‌ها به نمایش درآمد.

به‌منظور اینکه احجام و سطوح تصادفی تولید شده، در نرم‌افزارهای تحلیلی که از روش المان مجزا استفاده می‌کنند، قابل استفاده باشند، نیاز به بازتولید دقیق احجام از طریق مونتاژ کره‌ها بر روی یکدیگر، اصلی غیرقابل‌چشم‌پوشی به نظر می‌رسد. به همین منظور، در مرحله‌ی بعد الگوریتمی برای بازتولید ذرات از طریق مونتاژ کره‌ها بر روی یکدیگر، ارائه می‌گردد. روش المان مجزا، یک روش مؤثر در تحلیل محیط‌ها و مواد ناپیوسته است. در این روش، جسم به‌صورت یک محیط ناپیوسته یا به‌عبارت‌دیگر، به‌صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های(ذرات) مجزا، در نظر گرفته می‌شود. این بلوک‌های مجزا می‌توانند به‌صورت صلب یا تغییر شکل‌پذیر رفتار کرده و هم‌چنین امکان جابه‌جایی‌ها و چرخش‌های بزرگ را خواهند داشت (برخلاف روش‌های المان محدود که در مدلسازی جابه‌جایی‌های بزرگ ناتوان هستند). در نتیجه در روش المان مجزا، می‌توان تأثیر عوارض ساختاری مانند درزها، ترک‌ها و ناپیوستگی‌های دیگر را مورد بررسی قرار داد[1].

در نهایت، ازآنجایی‌که ورودی اولیه در تحلیل مواد گرانول با استفاده از روش المان مجزا، مجموعه‌ای بسته‌بندی شده از گرانول‌های دارای اشکال تصادفی است، به همین دلیل الگوریتم جدیدی نیز برای بسته‌بندی احجام و سطوح تصادفی ارائه خواهد شد. از ویژگی‌های این الگوریتم بسته‌بندی آن است که توانایی بسته‌بندی ذرات با شکل‌های واقعی آن‌ها (به جای شکل تقریبی آن‌ها که از بازتولید ذرات با کره‌ها تولید می‌شود)، را دارا است.

برای تبیین به اهمیت پژوهش انجام‌شده در این مقاله و نقش آن در ایجاد و آماده‌سازی مجموعه‌ی ذرات داری شکل پیچیده، به‌عنوان ورودی اولیه‌ی نرم‌افزارهای تحلیل عددی که از روش DEM استفاده می‌کنند، ابتدا روش المان مجزا شرح داده می‌شود.

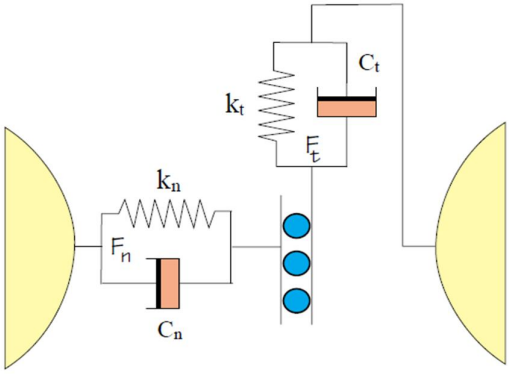
2- روش المان مجزا(DEM)

روش المان مجزا، برای مدل کردن رفتار مکانیکی مواد ناپیوسته (مانند مواد گرانول، سنگ‌ها، مواد معدنی و ...) به کار می‌رود[6]. فرض اساسی در این روش آن است که ماده شامل ذرات گسسته است که این ذرات ممکن دارای خواص متفاوتی باشند[7].

در حقیقت در این روش مواد ناپیوسته به‌عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا در نظر گرفته می‌شوند که به این بلوک‌ها اجازه‌ی جابه‌جایی‌ها و چرخش‌های بزرگ داده می‌شود(برخلاف روش‌های المان محدود که توانایی مدلسازی جابه‌جایی‌های بزرگ را ندارند). بلوک‌های مجزا می‌توانند به‌صورت صلب یا تغییر شکل‌پذیر (ذرات نرم که اجازه‌ی همپوشانی داشته و مقدار این همپوشانی Δx است)، رفتار کنند. بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر به المان‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند و هر المان بر طبق قانون تنش-کرنش خطی یا غیرخطی تعیین شده، رفتار می‌کند.

روش المان مجزا شامل حل معادلات مسیر حرکت، چرخش و جهت‌گیری هر ذره در طول جریان و مدل کردن هر برخورد بین ذرات با یکدیگر یا بین ذرات و اشیای مرزی اطراف آن‌ها (مانند ظرف در برگیرنده‌ی ذرات)، است. اگر ذرات به‌صورت تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شوند، اجازه‌ی همپوشانی به اندازه‌ی Δx را دارا هستند. سرعت‌های نسبی نرمال(V_n) و مماسی(V_t)، نیروهای برخورد را تعیین می‌کنند[2].

در روش المان مجزا چندین مدل نیروی تماسی برای تقریب دینامیک برخورد، وجود دارد. یکی از این مدل‌ها، مدل رایج خطی فنر- میراگر است که در شکل(1)، نشان داده شده است[8].



شکل 1: نمودار شماتیک مدل خطی فنر - میراگر، شامل نیروهای برخورد نرمال(F_n) و برخورد مماسی(F_t)

نیروی نرمال ($F_n = -K_n * \Delta x + C_n * V_n$)، شامل یک فنر خطی برای ایجاد نیروی دافعه و یک میراگر برای تلف کردن مقداری از انرژی جنبشی نسبی (که صرف تغییر شکل پلاستیک و ... می‌شود)، استفاده می‌شود.

بیشینه‌ی همپوشانی بین ذرات به‌وسیله‌ی سفتی K_n فنر در جهت نرمال، تعیین می‌شود. ضریب میرایی نرمال C_n، به گونه‌ای انتخاب می‌شود تا ضریب بازگشت ε (که به‌عنوان نسبت مؤلفه‌ی نرمال سرعت نسبی پس از برخورد به مؤلفه‌ی نرمال سرعت نسبی پیش از برخورد تعریف می‌شود) را حاصل نماید.

نیروی مماسی برخورد از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$F_t = Min\{\mu F_n, K_t \int V_t dt + C_t V_t\} \qquad (1)$$

در رابطه‌ی(1)، انتگرال سرعت مماسی(V_t) در طول برخورد، به‌عنوان یک فنر رفتار می‌کند که انرژی حرکت نسبی مماسی را ذخیره کرده و تغییر شکل الاستیک مماسی سطوح در حال تماس را نشان می‌دهد. میراگر نیز بخشی از انرژی حرکت مماسی را تلف کرده و تغییر شکل پلاستیک مماسی سطوح در حال تماس را مدل می‌کند.

نیروی مماسی کل (حاصل از جمع مؤلفه‌های الاستیک و پلاستیک) به‌وسیله‌ی محدوده‌ی اصطکاک کولمب، در نقطه‌ای که ذرات شروع به لغزیدن بر روی یکدیگر می‌کنند، محدود می‌شود. یک الگوریتم DEM، نسبتاً ساده بوده و شامل مراحل زیر است[2]:

1- ایجاد یک مجموعه‌ی اولیه شامل n دانه، تعریف مرزها (مانند مرز ظرف)، اعمال شرایط اولیه بر روی هر ساختار داخلی مورد استفاده در طول شبیه‌سازی.

2- تشخیص برخورد، برای تعیین جفت ذره‌هایی که با هم برخورد می‌کنند(تهیه‌ی لیست برخورد ذرات همسایگی مجاور).

3- محاسبه‌ی نیروهای برخورد (بین ذرات ، بین ذرات و اشیاء مرزی) از طریق یک مدل تماسی (مانند مدل خطی فنر- میراگر).

نیروهایی که ممکن است در شبیه‌سازی با استفاده از روش DEM به کار گرفته شوند، عبارت‌اند از:

الف- اصطکاک، هنگامی که دو ذره یکدیگر را لمس می‌کنند.

ب- شکل‌پذیری تماسی و یا پس زدن، هنگامی دو ذره با یکدیگر برخورد می‌کنند.

پ- نیروهای جذب کننده مانند نیروهای چسبندگی، پیوستگی، جاذبه‌ی الکترواستاتیک و غیره.

ج- نیروهای دوربرد مانند گرانش، نیروی جاذبه‌ی بین ذرات به دلیل جرمشان (که بیشتر مربوط به شبیه‌سازی‌های نجومی است).

د- نیروهای در سطح مولکولی مانند نیروی دافعه‌ی پائولی، نیروی واندروالس و غیره.

4- نیروهای وارد از ذرات و اشیاء مرزی، جمع شده و از معادلات حرکتی حاصل، انتگرال گرفته می‌شود تا سرعت خطی، سرعت دورانی، جهت و موقعیت جدید ذرات (در هر مرحله‌ی زمانی در طول شبیه‌سازی)، به دست آید.

5- به روز رسانی لیست همسایگی‌های مجاور. با توجه به حرکت نسبی بین ذرات، لازم است تا در هر مرحله

لیست همسایگی‌های مجاور و موقعیت جدید ذرات به روزرسانی شود.

همان‌طور که ذکر گردید در هر مرحله باید سرعت خطی، سرعت دورانی، جهت و موقعیت جدید ذرات، به روز رسانی شود. درنتیجه برای دستیابی به دقت بالا در تشخیص تماس و شبیه‌سازی جریان ذرات، نیاز به مراحل زمانی بسیار کوچک (10^{-3} تا 10^{-6} ثانیه) است.

شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌ی جریان‌های مواد ناپیوسته (مانند مواد گرانول و ...)، ممکن است شامل شبیه‌سازی میلیون‌ها ذره و همچنین سطح بالایی از پیچیدگی‌ها برای توصیف تعاملات بین ذرات (شامل شکست، سائیدگی، چسبندگی و ...)، باشد. در نتیجه روش DEM، از لحاظ محاسباتی بسیار سنگین است که این امر طول مدت زمان شبیه‌سازی جریان و یا تعداد ذرات را محدود می‌سازد. با استفاده از الگوریتم‌های موازی (قابلیت پردازش موازی) برای پیاده‌سازی روش DEM، این مشکل تا حدودی حل شده و امکان افزایش تعداد ذرات و یا طول مدت زمان شبیه‌سازی فراهم شده است[8].

در بعضی حالت‌های خاص، می‌توان از تکنیک‌های دیگری برای کاهش محاسبات استفاده کرد، به‌عنوان مثال هنگامی که نیروهای دوربرد (نیروی گرانش، نیروی جاذبه‌ی بین ذرات به دلیل جرمشان و ...)، در تحلیل DEM در نظر گرفته شوند، تعامل و اثر هر جفت از ذرات بر روی یکدیگر باید محاسبه شود؛ که تعداد این تعاملات با افزایش تعداد ذرات به‌صورت فاکتوری از توان دو ، افزایش می‌یابد. یک راه برای کاهش این محاسبات آن است که ذرات دور از ذره‌ی تحت بررسی را ترکیب کرده و آن‌ها را به‌صورت یک ذره‌ی منفرد در نظر گرفت. برای درک این موضوع تعامل بین یک ستاره و یک کهکشان دور را در نظر بگیرید، خطای ناشی از ترکیب همه‌ی ستاره‌های موجود در کهکشان دور به یک جرم نقطه‌ای و آنگاه بررسی تأثیر این جرم نقطه‌ای بر روی ستاره‌ی مورد نظر بسیار ناچیز است.

از عوامل دیگری که باعث پیچیدگی روش DEM و در نتیجه سنگینی محاسبات می‌شود، استفاده از ذرات با شکل پیچیده است. وجود ذرات با شکل پیچیده (که به‌طور شایانی بر روی رفتار جریان مواد تأثیر گذاشته و به نزدیک کردن شبیه‌سازی جریان مواد به واقعیت کمک می‌کند)، تشخیص تماس بین ذرات و بررسی تعاملات بین ذرات را بسیار مشکل می‌سازد[۸،۴]. برای رفع این مشکل به بازتولید ذرات پیچیده از طریق مونتاژ احجام کروی بر روی یکدیگر پرداخته می‌شود.

پس از بازتولید ذرات پیچیده از طریق مونتاژ احجام کروی بر روی یکدیگر، دو حالت را می‌توان برای ذره‌ی بازتولید شده(کلوخه)، در نظر گرفت:

الف- کره‌ها را با اتصالات تماسی در نظر گرفت. یک اتصال تماسی می‌تواند به‌عنوان یک نقطه‌ی چسبنده با چسبندگی قائم و برشی در نقطه‌ی تماس بین دو کره در نظر گرفته شود. در این حالت اگر مقدار نیروی تماسی برشی و یا قائم کششی به ترتیب از چسبندگی برشی و قائم بیشتر شود، اتصال شکسته شده و کره‌ی دارای این حالت، از ذره(کلوخه) جدا می‌شود. این حالت هنگامی استفاده می‌شود که پیچیدگی شکل به دلیل چسبیدن گرانول‌ها به یکدیگر است.

ب- کلوخه به‌عنوان یک ذره‌ی واحد شناخته شده و به‌صورت یک جسم یکپارچه عمل می‌کند. این حالت هنگامی استفاده می‌شود که پیچیدگی شکل به دلیل پیچیدگی خود ذره است (خود ذره ذاتاً دارای شکل غیر کروی است).

3- ایجاد احجام و سطوح تصادفی

همان‌طور که در قسمت 2 ذکر شد برای نزدیک کردن نتایج تحلیل‌های عددی مواد ناپیوسته به نتایج تجربی، نیاز فراوانی به ایجاد ذرات داری شکل‌های پیچیده و تصادفی حس می‌گردد؛ به همین منظور در این قسمت به ایجاد احجام پیچیده و تصادفی پرداخته می‌شود.

تا به امروز در مورد ایجاد احجام و سطوح تصادفی، کارهای محدودی انجام‌شده است. لذا در این قسمت، ابتدا روش‌ها و الگوریتم‌های معدودی که تاکنون در مورد ایجاد احجام و سطوح تصادفی، توسط اشخاص مختلف ارائه گردیده‌اند، بیان می‌شود، سپس محدودیت‌های این الگوریتم‌ها ذکر شده و در نهایت به‌منظور رفع این محدودیت‌ها، دو الگوریتم پیشنهادی جدید برای ایجاد احجام و سطوح تصادفی، ارائه خواهد گردید.

جولین جانسون[9]، در سال 2005، یک کد جدید را برای باد کردن مجازی احجام به وجود آورد. این کد، یک ابزار کروی ساز متفاوت است و می‌تواند به‌عنوان یک

تغییرشکل‌دهنده‌ی پایه‌ای احجام عمل کند. در این کد پارامترهای مختلفی برای باد کردن احجام در نظر گرفته شده است؛ از جمله انتخاب مراکز باد کردن، تعیین مقدار شعاع باد کردن و تعیین ناحیه‌هایی از احجام که باید باد شوند. با تغییر پارامترهای ذکر شده در بالا به‌صورت تصادفی و انتخاب مقادیر تصادفی برای شعاع در هر مرحله از باد کردن، می‌توان به یک حجم نهایی تصادفی دست یافت.

دیمیتری پکروسکی[10]، در سال2011، از طریق بارش تصادفی مکعب‌ها، به ایجاد احجام تصادفی پرداخت. در حین این فرایند ماتریس مدل ثبت می‌شود. در حقیقت در پایان بارش، ماتریسی تصادفی که تعداد مکعب‌ها در هر موقعیت را مشخص می‌کند، ایجاد می‌شود.

گیاوادو[11]، در سال 2013، از طریق بارش تصادفی مکعب‌ها به ایجاد احجام تصادفی پرداخت؛ با این تفاوت که برای هر مکعب علاوه بر موقعیت تصادفی، جهت و زاویه‌ی تصادفی نیز در نظر گرفت.

الکساندرگرنیخ[12]، در سال 2013، الگوریتمی را برای ایجاد احجام تصادفی پیشنهاد داد که این الگوریتم بر پایه‌ی گسترش و رشد تصادفی یک حجم اولیه‌ی مکعبی شکل استوار است.

ندیر پاتیر[13]، در سال 1977، یک روش عددی برای تولید زبری سطح سه‌بعدی تصادفی با خصیصه‌های آماری تعیین شده، ارائه داد، که از طریق استفاده از تبدیلات خطی در ماتریس‌های تصادفی، به تولید سطوح خشن گاوسی (نرمال) یا غیرگاوسی (غیر نرمال)، با هر تابع خودهمبستگی، می‌پردازد.

دی‌جی وایت‌هوس[14]، در سال1983 با استفاده از توابع خودهمبستگی، به تولید سطوح زبر تصادفی پرداخت. خودهمبستگی، یک فرآیند تصادفی همبستگی بین مقادیر مختلف تصادفی ارتفاع، در نقاط مختلف است. در حقیقت، در این روش از طریق ایجاد ارتفاع‌های شبه تصادفی که مقادیر این ارتفاع‌ها دارای همبستگی صفر یا نزدیک به صفر هستند، به ایجاد سطوح زبر تصادفی پرداخته می‌شود.

دیمیتریو و همکاران[15]، در سال2010، از فشردن مواد ورقه‌ای در دست به عنوان یک مولد سطح آزاد و تصادفی استفاده کردند. دست بشر از استخوان‌های کوچک زیادی تشکیل شده است و دارای 28 درجه‌ی آزادی است. فشردن دست، یکی از حرکات و عکس‌العمل‌های غریزی بشر است[16]. با مچاله کردن یک کاغذ در دست، می‌توان یک سطح چروکیده‌ی تصادفی دارای هندسه‌ی پیچیده تولید کرد. فشردن مواد پوسته‌ای در دست به عنوان یک مولد سطح آزاد، اثر الگوهای تنش را بر روی ورق باقی می‌گذارد که از این الگوها می‌توان به‌منظور شبیه‌سازی فرآیندهایی مانند خم کردن، مچاله کردن، کمانش و پیچش استفاده کرد[17]. دیمیتریو و همکاران[15]، برای دستیابی به سطوح تصادفی‌تر از طریق این روش، ارتفاع رئوس، شکل مرزها و الگوها را به‌صورت تصادفی تغییر دادند که برای این کار از نرم‌افزار اریگامی [18]، استفاده نمودند.

سالا و همکاران[19]، در سال 2002، با استفاده از الگوریتم فراکتال نقطه‌ی میانی تصادفی، به ایجاد سطوح تصادفی با زبری تصادفی دارای خواص آماری از پیش تعیین شده، پرداختند.

میشاییل ساکوپ[20]، در سال 2006، با استفاده از مفهوم فراکتال به ایجاد احجام تصادفی پرداخت. او ابتدا فراکتال اسفنج سرپینسکی را ایجاد نمود و سپس با اعمال یک روند تصادفی(حذف مکعب‌ها به‌صورت تصادفی) بر روی آن، یک حجم تصادفی به نام اسفنج تصادفی سرپینسکی را ایجاد نمود.

3-1- روش‌های پیشنهادی جدید برای ایجاد احجام و سطوح تصادفی

اکثر روش‌های ایجاد احجام تصادفی که در قسمت 3 ذکر شدند، تنها از مکعب ها برای ایجاد احجام تصادفی استفاده می کنند. بنابراین استفاده از این احجام به عنوان ذرات دارای شکل های پیچیده، در تحلیل مواد ناپیوستار، ممکن است کافی نباشد.

همچنین اکثر احجام تصادفی حاصل از فراکتال‌ها (ذکر شده در قسمت 3) نیز به عنوان ذرات دارای شکل های پیچیده در تحلیل‌های عددی مواد ناپیوستار، قابل استفاده نیستند. زیرا این احجام معمولاً دارای ساختارهای ناپیوسته، توخالی و در مواردی متخلخل هستند که بیشتر برای شبیه‌سازی فوم‌ها به کار می‌روند و نمی‌توان از آن‌ها به عنوان ذرات مواد ناپیوستار مانند مواد گرانول، مواد معدنی، سنگ‌ها و...، استفاده نمود.

به همین دلیل در این قسمت، دو الگوریتم پیشنهادی جدید برای ایجاد احجام و سطوح تصادفی، ارائه خواهد گردید.

3-1-1- استفاده از یک کتابخانه‌ی احجام تصادفی پایه و ترکیب این احجام تصادفی پایه

در این روش، به ساخت تعدادی(تعداد تصادفی) حجم پایه با ابعاد تصادفی پرداخته می‌شود و در هر مرحله این احجام به‌گونه‌ای با یکدیگر ترکیب می‌شوند که حتماً با یکدیگر تداخل داشته باشند. احجام مکعب، استوانه، مخروط، بیضی‌گون و کره به عنوان حجم‌های پایه مورد استفاده قرار گرفتند و برای اطمینان از تداخل آن‌ها با یکدیگر از صفحه‌های کاری دارای زاویه‌ی تصادفی در فضا که همگی از نقطه‌ی (0,0,0) می‌گذرند، استفاده گردید. منظور از صفحه‌ی کاری، صفحه‌ای است که ترسیم اولیه‌ی حجم پایه در آن انجام می‌شود و سپس از طریق اکسترود و یا چرخش این ترسیم اولیه، حجم پایه‌ی مورد نظر ایجاد می‌شود. الگوریتم ایجاد احجام و سطوح تصادفی با استفاده از این روش به‌صورت زیر است:

1- انتخاب یک عدد صحیح تصادفی (N)، که تعداد احجام تصادفی را مشخص می‌کند.

2- انتخاب یک عدد صحیح تصادفی(M)، که مشخص کننده‌ی تعداد حجم‌های پایه که از ترکیب آن‌ها حجم تصادفی نهایی ایجاد می‌شود، است.

3- انتخاب یک صفحه‌ی کاری تصادفی (صفحه‌ی دارای زوایای تصادفی نسبت به محورهای x و y و z و گذرنده از نقطه‌ی(0,0,0)).

4- تعیین نوع حجم پایه به‌صورت تصادفی (مکعب، استوانه، مخروط، بیضی‌گون و یا کره).

5- ایجاد حجم پایه‌ی انتخاب شده با ابعاد تصادفی.

6- تکرار مراحل 3-5 به تعداد M بار.

7- ذخیره‌سازی حجم تصادفی ایجاد شده و تبدیل حجم تصادفی به سطح تصادفی از طریق تبدیل فرمت، ذخیره‌سازی سطح تصادفی تولید شده.

8- تکرار مراحل 2-7 به تعداد N بار.

با استفاده از این روش، می‌توان به ایجاد احجام و سطوح کاملاً تصادفی پرداخت. در شکل(2)، تعدادی از احجام و سطوح تصادفی تولید شده با این الگوریتم به نمایش گذاشته شده است.

با تغییر در پارامترهای این روش(مانند محدود کردن انواع احجام پایه، محدود کردن دامنه‌ی ابعاد تصادفی و ...) می‌توان احجام تصادفی دارای ویژگی خاص (به عنوان مثال احجام تصادفی دارای سطح هموار، سطح تیز و ...) ایجاد کرد.

شکل(3) پارامترهای قابل تغییر در برنامه‌ی نوشته شده برای پیاده‌سازی این روش را، نشان می‌دهد. این الگوریتم، در محیط برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک، پیاده‌سازی شده و از طریق لینک کردن این نرم‌افزار به نرم‌افزار طراحی کتیا، خروجی آن به نمایش درآمد.

در شکل(4)، چند سطح تصادفی هموار که با استفاده از این الگوریتم ایجاد شده‌اند، نشان داده شده است. ایجاد این احجام تصادفی هموار، از طریق محدود کردن انواع احجام پایه در الگوریتم (در اینجا فقط از کره و بیضی‌گون استفاده گردید)، انجام‌شده است.

3-1-2- ایجاد احجام کروی در تعدادی از نقاط یک حجم

این روش در حقیقت از روش بازتولید احجام (به منظور استفاده در تحلیل به روش المان مجزا)، الهام گرفته شده است. در روش بازتولید، به پر کردن حجم مورد نظر از طریق قرار دادن احجام کروی در داخل حجم، پرداخته می‌شود. روش ارائه شده در این قسمت دقیقاً مانند روش بازتولید احجام با کره‌ها است با این تفاوت که کره‌ها به جای آنکه در تمامی نقاط داخل حجم مورد نظر ایجاد شوند، در تعدادی از این نقاط ایجاد خواهند شد. در حقیقت به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود که از بین نقاط موجود، در کدام نقطه کره ایجاد شود و در کدام نقطه، فضا خالی بماند. الگوریتم این روش به‌صورت زیر است:

1- ایجاد یک حجم پایه و یا حتی تصادفی (برای این منظور می‌توان از الگوریتم استفاده شده در قسمت 3-1-1 استفاده نمود.)

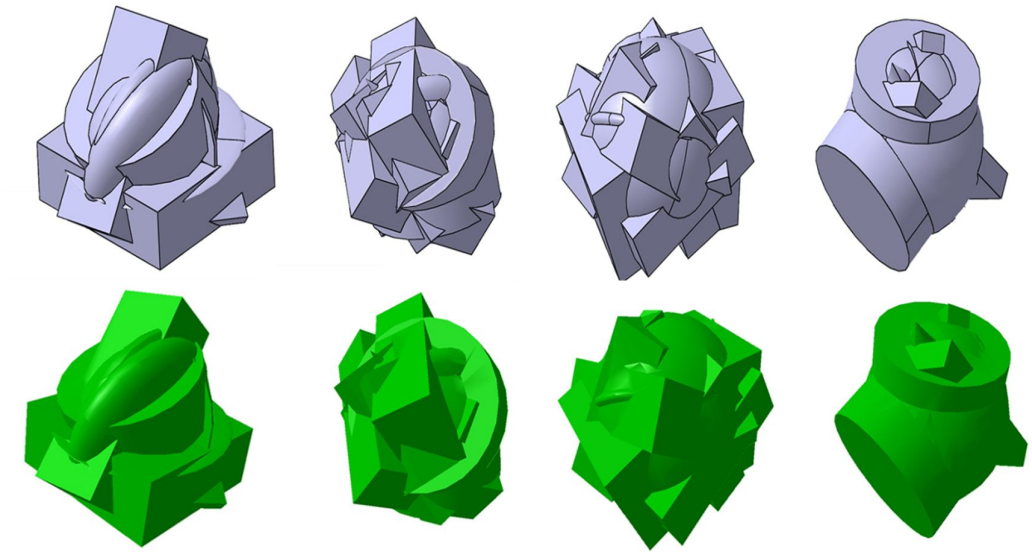
2- استفاده از یک نرم‌افزار مش‌بندی به منظور استخراج نقاط حجم.

3- قرار دادن احجام کروی در این نقاط با احتمال تصادفی،(البته در این مرحله، چک می‌شود که هر کره

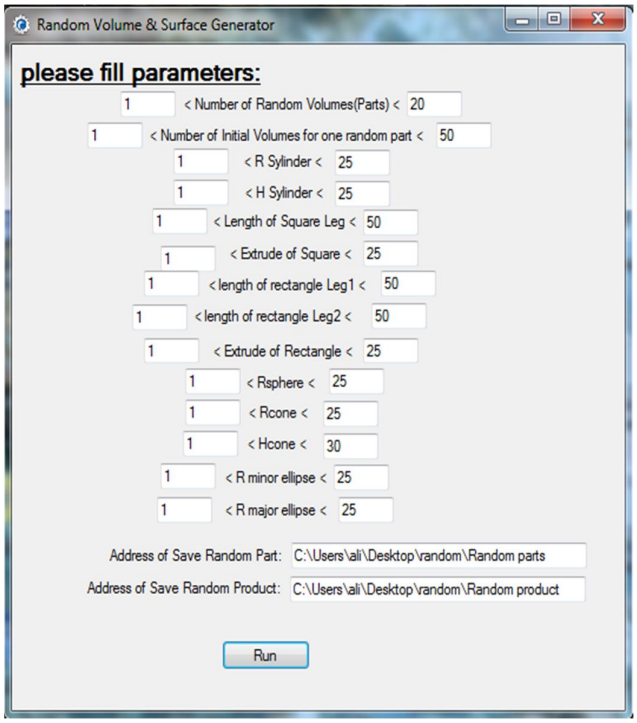
حداقل با یک کره‌ی دیگر تماس داشته باشد تا در حجم، ناپیوستگی ایجاد نگردد).

4- ذخیره‌سازی حجم ایجاد شده.

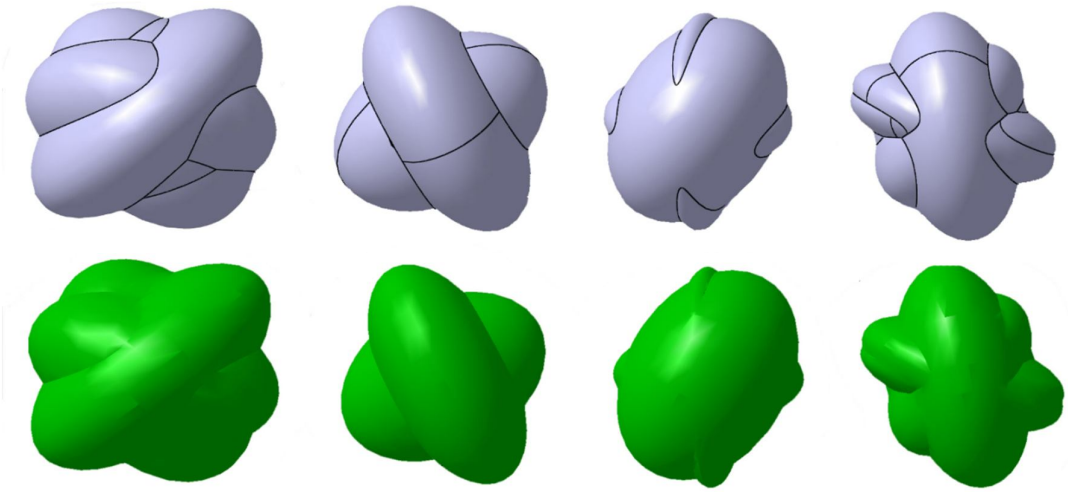
در شکل(5) تعدادی از احجام تولیدی با این روش نشان داده شده است. این الگوریتم نیز، در محیط برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک، پیاده‌سازی شده و از طریق لینک کردن این نرم‌افزار به نرم‌افزار طراحی کتیا، خروجی آن به نمایش درآمد. در پیاده‌سازی این الگوریتم، امکان انتخاب مقدار شعاع برای کره‌ها، در نظر گرفته شده است.



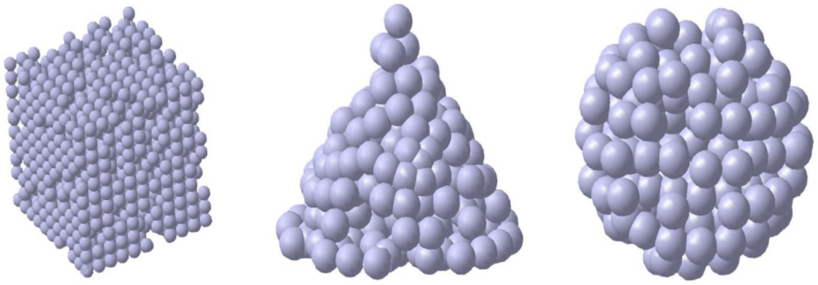
شکل2: احجام و سطوح تصادفی ایجاد شده از طریق ترکیب کردن احجام پایه ی تصادفی. احجام تصادفی در قسمت بالا و سطح معادل آن‌ها در قسمت پایین شکل نشان داده شده‌اند



شکل 3: پارامترهای قابل تغییر در الگوریتم ایجاد احجام و سطوح تصادفی از طریق ترکیب کردن احجام پایه‌ی تصادفی



شکل 4: احجام و سطوح هموار تصادفی که از طریق ترکیب کردن احجام پایه‌ی تصادفی ایجاد شده‌اند. احجام تصادفی در قسمت بالا و سطح معادل آن‌ها در قسمت پایین شکل نشان داده شده‌اند



شکل 5: احجام تصادفی ایجاد شده از طریق مونتاژ تصادفی کره‌ها

4- بازتولید احجام پیچیده به منظور استفاده از آن‌ها در روش المان مجزا

از آنجایی که شکل واقعی ذرات گرانول، نامنظم و زاویه‌دار است لذا استفاده از ذرات کروی در شبیه‌سازی جریان مواد گرانول با استفاده از روش المان مجزا، چندان مناسب نبوده و باعث می‌شود که نتایج حاصل، از دقت بالایی برخوردار نباشند. برای اینکه نتایج کمی حاصل از روش المان مجزا، قابل اعتماد بوده و به واقعیت نزدیک باشند، نیاز قابل توجهی به استفاده از ذرات با شکل نامنظم، حس می‌شود[1].

البته برای اینکه ذرات پیچیده(با شکل نامنظم)، در تحلیل‌هایی که به روش المان مجزا انجام می‌شوند، قابل استفاده باشند، لازم است تا آن‌ها به‌صورت دقیق بازتولید شوند. یک روش اصلی و بسیار ساده برای بازتولید احجام پیچیده، از طریق مونتاژ کره‌ها بر روی یکدیگر صورت می‌گیرد. استفاده از کره در بازتولید احجام پیچیده، تشخیص تماس و محاسبه‌ی نیروهای تعاملی بین احجام را آسان و سریع می‌گرداند. روش‌های بسیار متنوعی برای بازتولید احجام با استفاده از این اصل (مونتاژ کره‌ها)، وجود دارد که هر کدام درجه‌ی دقت و نیاز محاسباتی متفاوتی دارند.

4-1- روش‌های بازتولید احجام پیچیده

همان‌طور که در قسمت 2 بیان شد، یکی از عواملی که باعث پیچیدگی روش DEM و در نتیجه سنگینی محاسبات می‌شود، استفاده از ذرات با شکل پیچیده است. وجود ذرات با شکل پیچیده (که به طور شایانی بر روی رفتار جریان مواد تأثیر گذاشته و به نزدیک کردن شبیه‌سازی جریان مواد به واقعیت کمک می‌کند)، تشخیص تماس بین ذرات و بررسی تعاملات بین ذرات را بسیار

مشکل می‌سازد[4,8]. برای رفع این مشکل به بازتولید ذرات پیچیده از طریق مونتاژ احجام کروی بر روی یکدیگر پرداخته می‌شود. به همین منظور در این قسمت ابتدا روش‌های گوناگون بازتولید احجام پیچیده بیان شده، سپس یکی از این روش‌ها پیاده‌سازی خواهد شد.

4-1-1- روش خوشه‌بندی

لو و مک‌داول[21]، در سال 2007، احجام را از طریق کره‌هایی که با هم تداخل داشته و تماس‌های داخلی آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود، بازتولید کردند. در این حالت توده‌ی ایجاد شده، به‌صورت یک جسم یکپارچه، رفتار خواهد کرد. این روش، روش خوشه‌بندی نامیده می‌شود.

وانگ و همکاران[22]، در سال 2007، یک روش بازتولید را پیشنهاد دادند که در آن حجم مربوطه ابتدا توسط کره‌های کوچک پر شده و سپس از طریق جایگزینی یک گروه از کره‌های مجاور با یک کره‌ی بزرگ‌تر، عمل پر کردن بهینه می‌شود(البته در صورتی که امکان جایگزینی وجود داشته باشد). هدف از جایگزینی کره‌های کوچک با یک کره‌ی بزرگ، کاهش تعداد کره‌ها و در نتیجه کاهش محاسبات و زمان شبیه‌سازی است. دقت(تیزی) شکل بازتولید شده، به اندازه‌ی کره‌هایی که برای چیدمان اولیه انتخاب می‌شوند، بستگی دارد، به گونه‌ای انتخاب کره‌های کوچک‌تر برای چیدمان اولیه، دقت بالاتری را حاصل می‌کند. با این وجود چنانچه اندازه‌ی کره‌های کوچک اولیه نسبت به اندازه‌ی کره‌های بزرگ‌تر جایگزین، بسیار متفاوت باشد، سطح حاصل بسیار خشن(پر از چاله) بوده و نماینده‌ای از سطح واقعی نخواهد بود.

4-1-2- روش دینامیکی

ماتسوشیما و همکاران[23]، در سال 2003، برای بازتولید دانه‌های شن، از یک فرآیند پیچیده‌ی دینامیکی برای پر کردن حجم داخل مرز دانه‌ها استفاده کردند. این روش بازتولید به این صورت است که ابتدا تعدادی کره با شعاع‌های مختلف و تصادفی، در مکان‌های تصادفی، در داخل مرزهای حجم نامنظم ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از نیروهای مجازی حرکتی و مقیاسی (انبساطی/انقباضی)، این کره‌ها را برای حجم نامنظم، مناسب ساخته و به این ترتیب حجم را از کره‌ها پر می‌گرداند. مقدار نیروهای مجازی حرکتی و یا مقیاسی، به فاصله‌ی بین کره‌ها و نقطه‌های روی مرز حجم بستگی داشته و به‌وسیله‌ی ثابت‌های فنری حرکتی و یا مقیاسی وزن‌دار می‌شوند. این روش به‌شدت به موقعیت‌های تصادفی اولیه‌ی کره‌ها و تنظیم پارامترهای نیروهای مجازی بستگی دارد. شرایط بهینه برای دریافت نتایج رضایت‌بخش با این روش هنوز پایه‌گذاری نشده است.

4-1-3- روش گذراندن یک کره از چهار نقطه‌ی تصادفی واقع بر سطح واقعی ذره

پرایس و همکاران[24]، در سال 2007، یک روش دو مرحله‌ای را برای بازتولید ذرات تصادفی پیشنهاد دادند. گام اول بر این اصل استوار است که از هر 4نقطه‌ی منحصر به فرد در فضا، تنها یک کره عبور می‌کند. با تکرار انتخاب 4نقطه‌ی تصادفی روی سطح حجم مورد نظر و گذراندن یک کره از آن 4نقطه، تقریباً حجم به وسیله‌ی کره‌ها پر خواهد شد. در این گام، یک تخمین خشن از سطح به دست می‌آید. در گام دوم، از طریق بهینه‌سازی موقعیت محلی کره‌ها (با توجه به سطح واقعی حجم مورد نظر)، تخمین دقیق‌تری از احجام حاصل خواهد شد که برای دستیابی به این هدف، دو قانون برای گام دوم در نظر گرفته شده است.

1- هر نقطه از سطح با نزدیک‌ترین کره، پیوند یا ارتباط (منظور از ارتباط آن است که لزومی ندارد که نقطه دقیقاً بر سطح کره مماس باشد، بلکه می‌تواند فاصله‌ی کمی نسبت به سطح کره داشته باشد) برقرار کند، که این کار از طریق نیروهای مجازی انتقالی انجام خواهد شد.

2- فاصله‌ی بین هر کره و گروه نقاط مرتبط با آن به وسیله‌ی انبساط یا انقباض کره‌ها به حداقل می‌رسد که این امر از طریق نیروهای مجازی انبساطی/ انقباضی انجام خواهد شد.

عمل بهینه‌سازی در این روش بسیار وقت‌گیر بوده و باعث افزایش قابل توجه زمان محاسبات در کل فرآیند می‌شود.

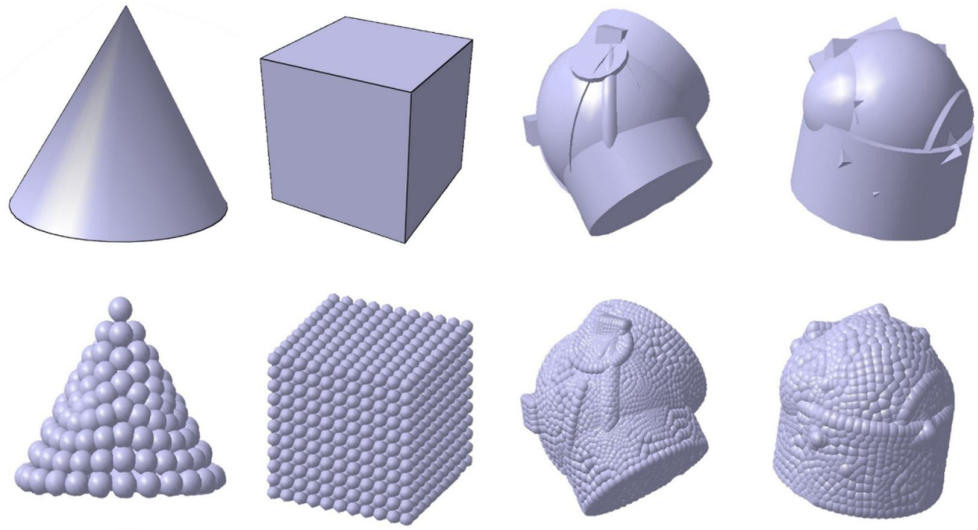
4-1-4- ایجاد کره‌هایی با قطرهای مختلف در راستای بردارهای نرمال داخلی

فریلیک و مک‌داول[1]، در سال 2013، برای بازتولید احجام تصادفی از یک روش جدید استفاده کردند. در این روش تعدادی نقطه، سطح واقعی حجم را توصیف کرده و

بردارهای نرمال داخلی این نقاط تعیین می‌گردد. تعیین بردارهای نرمال داخلی، مرحله‌ی کلیدی در این روش است. در این روش نیز مانند روش‌های قبلی، حجم مورد نظر به وسیله‌ی کره‌هایی با شعاع‌های مختلف پر می‌گردند با این تفاوت که در این روش ابتدا یک نقطه روی سطح حجم به‌صورت تصادفی انتخاب شده و یک کره مماسی در جهت بردار نرمال داخلی سطح در آن نقطه ایجاد می‌شود. سپس این کره در جهت بردار نرمال داخلی، شروع به رشد کرده تا به بیشترین رشد ممکن در داخل مرز حجم برسد. به عبارت دیگر، رشد کره تا زمانی ادامه می‌یابد که سطح آن به یک نقطه روی سطح ذره برسد. این روند برای نقاط دیگر تکرار می‌شود، البته نقاط جدیدی که انتخاب می‌شوند نباید به کره‌هایی که در مراحل قبلی تولید شده‌اند، نزدیک باشند تا تعداد کره‌های موردنیاز برای پر کردن حجم کاهش یابد (مقدار این نزدیکی، توسط کاربر تعیین می‌شود). برای این منظور میزان مجاورت نقطه‌ی جدید انتخاب شده و کره‌های تولید شده در مراحل قبل(فاصله‌ی بین نقطه روی سطح ذره و سطح کره)، اندازه‌گیری می‌شود. اگر این فاصله از مقدار حد آستانه‌ی از پیش تعیین شده، کمتر باشد، کره‌ای در نقطه‌ی جدید ایجاد نخواهد شد. این امر موجب کاهش تعداد کل کره‌های موردنیاز برای بازتولید حجم و در نتیجه کاهش زمان محاسبات می‌گردد.

2-4- پیاده‌سازی روش خوشه‌بندی در بازتولید احجام تصادفی

در این مقاله برای بازتولید احجام تصادفی تولید شده در قسمت 3-1-1، از روش خوشه‌بندی استفاده گردید. الگوریتم پیاده‌سازی این روش دقیقاً مانند الگوریتمی است که در قسمت 3-1-2 (به منظور پیاده‌سازی دومین روش ایجاد احجام تصادفی) ارائه گردیده است، با این تفاوت که کره‌ها، در تمامی نقاط داخل حجم، ایجاد خواهند شد. در پیاده‌سازی این الگوریتم، امکان انتخاب مقدار شعاع برای کره‌ها، در نظر گرفته شده است. این الگوریتم، در محیط برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک، پیاده‌سازی شده و از طریق لینک کردن این نرم‌افزار به نرم‌افزار طراحی کتیا، خروجی آن به نمایش درآمد. در شکل (6)، بازتولید چند حجم با استفاده از این الگوریتم، نشان داده شده است.



شکل 6: بازتولید چند ذره‌ی تصادفی با استفاده از پیاده‌سازی روش خوشه‌بندی

5- بسته‌بندی احجام

از آنجایی که ورودی اولیه در تحلیل مواد ناپیوسته (مخصوصاً در مکانیک مواد گرانول و مکانیک سنگ)، مجموعه‌ای بسته‌بندی شده از بلوک‌های مجزا (ذرات) است، به همین منظور در این قسمت ابتدا روش‌های گوناگون بسته‌بندی احجام بیان می‌شود، سپس الگوریتم جدیدی برای بسته‌بندی احجام و سطوح تصادفی ارائه خواهد شد. از ویژگی‌های این الگوریتم جدید آن است که توانایی بسته‌بندی ذرات با شکل‌های واقعی آن‌ها (به جای شکل

تقریبی آن‌ها که از بازتولید ذرات با کره‌ها تولید می‌شود)، را دارا است.

امروزه بسته‌بندی ذرات، تبدیل به یک موضوع مهم (چه از لحاظ علمی و چه از لحاظ صنعتی) گردیده و تعداد معدودی الگوریتم بسته‌بندی ارائه شده است، که به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود اکثر الگوریتم‌های بسته‌بندی منتشر شده، برای کره‌ها[25-27] یا ترکیب‌های کروی[29، 28] بوده و تنها تعداد کمی از آن‌ها برای ذرات غیر کروی است که بیشتر آن‌ها محدود به شکل‌های منظم مانند شبه کره، بیضی، بیضی‌گون و استوانه‌ها[30-32] است.

برخلاف روش‌های شبیه‌سازی دینامیکی بسته‌بندی، روش‌های هندسی بسته‌بندی، اجازه‌ی بسته‌بندی سریع تعداد زیادی از ذرات را می‌دهد، که این ساختارهای بسته‌بندی می‌توانند به عنوان حالت اولیه (ورودی اولیه) در تحلیل‌های عددی مواد ناپیوستار مورد استفاده قرار گیرند. در حقیقت روش‌های هندسی بسته‌بندی موجب بهبود کارایی مرحله‌ی آماده‌سازی ذرات برای تحلیل‌های عددی و شبیه‌سازی‌های دینامیکی(مانند روش DEM)، می‌گردد. به عنوان مثال مرتب کردن و آماده‌سازی اولیه‌ی چند صد ذره با استفاده از روش‌های دینامیکی ممکن است بیش از چندین ساعت طول بکشد، در حالی با استفاده از روش‌های هندسی، این آماده‌سازی کمتر از چند دقیقه طول خواهد کشید. عیب روش‌های هندسی نسبت به روش‌های دینامیکی آن است که در روش‌های هندسی از آنجایی که ذرات به تعادل دینامیکی نمی‌رسند، هیچ‌گونه اطلاعی در مورد نیروهای تماسی حاصل نمی‌شود. با این وجود، روش‌های هندسی، مجموعه ذرات را به اندازه‌ی کافی به تعادل مکانیکی نزدیک می‌سازند، در نتیجه ساختار بسته‌بندی حاصل از این روش‌ها می‌توانند به عنوان یک نقطه‌ی شروع خوب برای شبیه‌سازی‌های دینامیکی(مانند DEM)، در نظر گرفته شود.

5-1- روش‌های هندسی بسته‌بندی احجام

5-1-1- بسته‌بندی آپولونین

دانشمندان مدت‌ها به مسئله‌ی پر کردن فضا با واحدهای (احجام) بدون تداخل و دارای اندازه‌های کوچک و کوچک‌تر پرداخته‌اند که این واحدها توسط قوانین گوناگونی، در فضا گنجانده می‌شوند. قدیمی‌ترین بسته‌بندی شناخته شده از این نوع، بسته‌بندی آپولونین(AP) دایره‌ها است که در حدود 200 سال قبل از میلاد مسیح توسط آپولونیوس انجام گردید[33]. این بسته‌بندی از طریق قرار دادن یک دایره در فضای بین سه‌دایره مماس بر هم، انجام می‌شود. این روند تکرار می‌شود و گپ‌های جدید ایجاد شده، به‌وسیله‌ی دایره‌های جدید پر خواهند شد. در نهایت این سیستم بسته‌بندی، منجر به یک بسته‌بندی متراکم از دایره‌های با اندازه‌ی کوچک و کوچک‌تر، با کسر بسته‌بندی نزدیک به 1 و تعداد نامحدود از دایره‌ها خواهد شد. روند این بسته‌بندی در فضای سه‌بعدی، مانند همان روند فضای دوبعدی است، با این تفاوت که به جای دایره از کره استفاده می‌شود.

5-1-2- الگوریتم‌های تعریف مسیر

در این روش ذرات مدارهای تعریف شده یا تعریف‌پذیر را به خوبی دنبال کرده تا یک محل استقرار در فضای بسته‌بندی پیدا کنند. در مقایسه با انواع دیگر بسته‌بندی از لحاظ محاسباتی، سبک و کارآمد است اما از لحاظ پیاده‌سازی و اجرا، مخصوصاً برای ظرف‌های با هندسه‌های پیچیده، دشوار است. این روش به میزان فراوان برای بسته‌بندی تصادفی کره‌ها استفاده شده است[34].

با استفاده از این روش می‌توان ساختارهای بسته‌بندی در محدوده‌ی بین ساختار متراکم تا ساختار شبیه به رشد فراکتال (غیر متراکم)، را ایجاد نمود. تراکم ساختار بسته‌بندی در این روش به‌شدت به نحوه‌ی تعریف مسیر و شکل ظرف بستگی دارد.

5-1-3- الگوریتم‌های تعیین محل تصادفی ذرات

در این روش ذرات با توزیع اندازه مورد نظر، یکی یکی در موقعیت‌های تصادفی در فضای بسته‌بندی قرار می‌گیرند. اگر ذره‌ی جدید با ذرات دیگر برخورد نداشته باشد، مجاز به ماندن است در غیر این صورت در موقعیت تصادفی دیگری آزمایش می‌شود. اگر پس از یک تعداد سعی از پیش تعریف شده، ذره هنوز مکانی برای ماندن پیدا نکرده باشد، دور انداخته شده و ذره‌ی دیگری انتخاب می‌شود و روند گفته شده برای آن تکرار می‌گردد. این روش، بسته‌بندی تصادفی آپولونین (RAP)، نیز نامیده می‌شود (مانا در سال 1991 بسته‌بندی آپولونین(AP) را از

طریق انتخاب موقعیت‌های تصادفی برای مراکز دیسک‌ها، توسعه داد و روش جدید بسته‌بندی تصادفی آپولونین(RAP) را پایه‌گذاری کرد[35]. پیاده‌سازی این الگوریتم حتی برای ظرف‌های پیچیده آسان است، با این وجود این روش بسیار وقت‌گیر بوده و از آنجایی که برخی از ذرات ممکن است دور ریخته شوند، توزیع اندازه‌ی ذرات بسته‌بندی شده تا حدودی با توزیع اندازه‌ی موردنظر متفاوت خواهد بود.

از آنجایی که پیاده‌سازی این روش بسیار آسان است، به همین دلیل به میزان فراوان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش بسته‌بندی، توالی افزودن ذرات، به‌شدت بر روی تراکم بسته‌بندی تأثیرگذار است. اگر ذرات بزرگ‌تر در مراحل اول و ذرات کوچک‌تر در مراحل آخر اضافه گردند، بسته‌بندی متراکم‌تری حاصل خواهد شد.

5-1-4- الگوریتم‌های رشد

در این روش ذرات علاوه بر اینکه در موقعیت تصادفی قرار می‌گیرند، امکان رشد نیز دارند. در حقیقت به یک ذره اجازه‌ی رشد داده می‌شود تا هنگامی که با ذره‌ی دیگر و یا دیواره‌ی ظرف برخورد کند. (مدل (RAP) در سال 1994 توسط آدرینکو، بریلیانتو و کراپیوسکی توسعه داده شد، به‌گونه‌ای که به دیسک‌ها اجازه داده می‌شد تا به‌صورت همزمان و با یک نرخ رشد خطی، رشد پیدا کنند. این روش (ABK) نامیده شد[36]).

دادز و ویتز[37]، در سال 2002، ویژگی‌های جامع روش‌های بسته‌بندی AP، RAP و ABK را بررسی کرده و روش بسته‌بندی رشد محدود (PLG) را ارائه کردند. تفاوت این روش با روش ABK در این است که دانه‌ها به‌صورت تصادفی و با نرخ‌های تصادفی، رشد پیدا می‌کنند. دادز و ویتز، هم‌چنین اعلام داشتند که روش‌های بسته‌بندی ABK و PLG، با افزایش تعداد ذرات همگرا می‌شوند.

الگوریتم‌های رشد، بدون بازآرایی معمولاً بسته‌بندی متراکمی را نتیجه نمی‌دهند، به همین دلیل آن‌ها نیازمند بازآرایی‌هایی مانند اجازه دادن به ذرات برای حرکت پیرامون موقعیت اصلی خود، اجازه دادن به ذرات برای انقباض و نیز اجازه‌ی چرخش به ذرات در حین فرآیند بسته‌بندی، می‌باشند. به عنوان مثال چنانچه در روش بسته‌بندی تصادفی آپولونین(RAP)، به ذرات، در حین بسته‌بندی و رشد، اجازه‌ی چرخش داده شود (این روش RRAP نامیده می‌شود)، معمولاً بسته‌بندی متراکم‌تری حاصل می‌شود. بازآرایی‌ها، معمولاً بسیار وقت‌گیر بوده و زمان کلی بسته‌بندی را به‌شدت افزایش می‌دهند.

چهار روش بسته‌بندی هندسی ذکر شده، اگر برای اشکال پیچیده مورد استفاده قرار بگیرند، ممکن است در سه سطح ریاضی، پیاده‌سازی و سطح محاسباتی دچار مشکل شوند:

1- سطح ریاضی

بیشتر ذرات موجود در صنعت و طبیعت، دارای اشکال نامنظم هستند، که بیان آن‌ها به‌صورت عبارات ریاضی(هندسی) دشوار است(مدل کردن ریاضی شکل‌های پیچیده دشوار است). این موضوع می‌تواند موجب محدودیت در انواع شکل‌های مورد استفاده در بسته‌بندی، شود.

2- پیاده‌سازی

پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترل مسیر، تشخیص برخورد و بسته‌بندی ذرات، مخصوصاً در مورد ذرات پیچیده، یک چالش بزرگ برای برنامه‌نویسان محسوب می‌شود.

3- سطح محاسباتی

در عمل اغلب ذرات پیچیده، تقریبی از ترکیب اشکال ساده مانند نقاط و خطوط (در دوبعد) و چند وجهی‌ها، کره‌ها و غیره (در سه‌بعد)، هستند. در نتیجه در صورتی که تعداد زیادی ذره در فرآیند بسته‌بندی مورد استفاده قرار گیرد، زمان محاسبات به‌صورت چشمگیری افزایش پیدا می‌کند.

5-1-5- بسته‌بندی دیجیتال

بیشتر روش‌های بسته‌بندی که ذکر شد، برای کره‌ها یا ترکیب‌های کروی کارایی داشته و تنها تعداد کمی از آن‌ها برای ذرات غیر کروی(آن هم محدود به شکل‌های تحلیلی نظیر شبه کره، بیضی، بیضی‌گون، استوانه‌ها و...) استفاده می‌شوند. با استفاده از روش بسته‌بندی دیجیتال، امکان بسته‌بندی ذرات پیچیده در یک ظرف با هر شکل دلخواه، وجود دارد. نوآوری این روش در تکه‌سازی فضای بسته‌بندی(ظرف) و ذرات است. در حقیقت پس از تکه‌سازی، فضای بسته‌بندی(ظرف) و ذرات، تبدیل به

مجموعه‌ای از پیکسل‌ها (در حالت دوبعدی) و یا مجموعه‌ای از وکسل‌ها (در حالت سه‌بعدی)، خواهند شد. تشخیص تماس یا برخورد ذرات توسط یک اصل بدیهی انجام می‌شود و این اصل، اشغال همزمان یک تکه از فضای بسته‌بندی توسط دو یا چند ذره است[38]. این روش بسته‌بندی، از مشکلاتی که در سایر روش‌های بسته‌بندی ایجاد می‌شود، جلوگیری می‌کند.

در این روش، ذرات در هر مرحله‌ی زمانی تنها اجازه دارند در یک خانه‌ی شبکه (یک پیکسل یا یک وکسل) حرکت کنند؛ بنابراین در هر مرحله‌ی زمانی، هر ذره، تنها می‌تواند در یکی از جهات ممکن حرکت کند. در هر مرحله‌ی زمانی، در حالت دوبعدی، 8 و در حالت سه‌بعدی، 26 جهت حرکتی وجود دارد که تمامی این جهت‌ها دارای احتمال انتخاب‌شدن برابر هستند. در هر مرحله‌ی زمانی، برای هر ذره یک جهت تصادفی(از جهات ممکن)، انتخاب می‌شود که نتیجه‌ی این کار ایجاد حرکات جهت‌دار و پخشی برای ذرات است.

این حرکات پخشی به ذرات اجازه می‌دهند تا همه‌ی فضاهای موجود را جستجو کنند. تشخیص تماس یا هم‌پوشانی، به‌سادگی و از طریق این سؤال که آیا دو شیء در یک زمان معین، یک پیکسل (در حالت دوبعدی) و یا یک وکسل(در حالت سه‌بعدی)، را اشغال می‌کنند یا نه، انجام می‌شود. بسته‌بندی شکل‌های پیچیده با استفاده از روش دیجیتالی نسبت به سایر روش‌های بسته‌بندی دارای مزایای زیر است:

1- این روش محدودیت ریاضی و محاسباتی در بیان شکل‌ها ندارد، زیرا تمامی شکل‌ها با استفاده از پیکسل‌ها (در حالت دوبعدی) و یا وکسل‌ها (در حالت سه بعدی)، بیان می‌شوند. اسکنرهای دوبعدی و سه بعدی، می‌توانند برای این هدف مورد استفاده قرار گیرند.

2- تعداد پیکسل‌ها یا وکسل‌های موردنیاز برای نمایش یک شکل، با توجه به رزولوشن موردنیاز تعیین می‌شود. بنابراین سنگینی محاسبات به مساحت (در حالت دوبعدی) و یا حجم شکل (در حالت سه‌بعدی) بستگی داشته و لزوماً به پیچیدگی شکل وابسته نیست، درحالی‌که در سایر روش‌های بسته‌بندی، المان‌های بیشتری برای نمایش شکل‌های پیچیده، موردنیاز است.

3- از آنجایی که ذرات، در هر مرحله‌ی زمانی تنها در یک خانه حرکت می‌کنند، تشخیص تماس یا هم‌پوشانی به‌سادگی و از طریق این سؤال که آیا دو شیء در یک زمان معین، یک پیکسل(در حالت دوبعدی) و یا یک وکسل(در حالت سه‌بعدی) را اشغال می‌کنند یا نه، انجام می‌شود. در سایر روش‌های بسته‌بندی، تشخیص تماس یا هم‌پوشانی، دشوارترین و از لحاظ محاسبتی سنگین‌ترین قسمت فرآیند بسته‌بندی است.

مزایای ذکرشده در بالا، سادگی روش، سهولت پیاده‌سازی و سرعت الگوریتم‌های بسته‌بندی دیجیتال، بسته‌بندی دیجیتال را به یک روش مطلوب برای بسته‌بندی به‌ویژه در هنگام بسته‌بندی اشکال پیچیده، تبدیل کرده است.

2-5- روش پیشنهادی جدید برای تشخیص تماس و بسته‌بندی احجام تصادفی(روش استفاده از نقاط کنترلی)

در این قسمت، یک الگوریتم پیشنهادی جدید برای تشخیص تماس و بسته‌بندی احجام تصادفی، ارائه می‌گردد. سپس مزیت این الگوریتم بسته‌بندی نسبت به سایر روش‌های بسته‌بندی بیان می‌شود.

در این روش، برای کنترل هر حجم از نقاط مرزی (نقاط سطح خارجی حجم) و یا کل نقاط حجم، استفاده خواهد شد. از این پس، این نقاط را نقاط کنترلی می‌نامیم. الگوریتم این روش به‌صورت زیر است:

1- استخراج نقاط سطح خارجی حجم و یا کل نقاط حجم با استفاده از یک نرم‌افزار مش‌بندی. در صورتی که حجم توپر باشد، استفاده از نقاط سطح خارجی حجم، برای کنترل حجم کفایت کرده و در نتیجه حجم محاسبات کاهش یافته و سرعت الگوریتم بسته‌بندی افزایش می‌یابد.

2-در هر مرحله‌ی زمانی، احجام با استفاده از یک بردار یکه‌ی تصادفی در فضا حرکت می‌کنند.

3-پس از هر حرکت، با استفاده از ماتریس انتقال بردار یکه، مختصات نقاط کنترلی هر حجم به روز رسانی می‌شود.

4- سپس فاصله‌ی بین نقاط کنترلی هر حجم با نقاط کنترلی احجام دیگر محاسبه می‌شود. در صورتی که فاصله‌ی بین یک جفت نقطه، کمتر از فاصله‌ی تعیین شده توسط کاربر(d) باشد، برخورد اتفاق افتاده است. اگر مقدار

d، توسط کاربر، صفر در نظر گرفته شود؛ هنگامی که دو حجم مماس بر یکدیگر می‌شوند، برخورد تشخیص داده می‌شود. مقادیر بزرگ‌تر d، در مواردی که نیاز است احجام با فاصله از یکدیگر، در فضای بسته‌بندی قرار گیرند، استفاده می‌شود.

5- در صورتی که فاصله‌ی بین یک جفت نقطه، بیشتر از فاصله‌ی تعیین شده توسط کاربر(d) باشد، مراحل 2 تا 4 تکرار خواهند شد.

این الگوریتم جدید، در محیط برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک پیاده‌سازی شده و در نهایت از طریق لینک کردن نرم‌افزار ویژوال بیسیک به نرم‌افزار طراحی کتیا، خروجی آن به نمایش درآمد. در این الگوریتم به کاربر اجازه‌ی تعیین فاصله‌ی برخورد(d)، داده شده است.

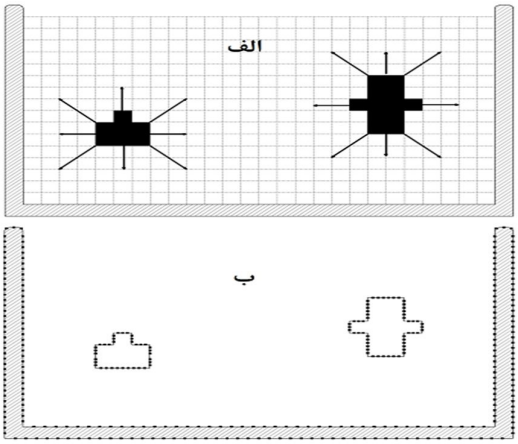
این روش جدید بسته‌بندی (روش استفاده از نقاط کنترلی)، محدودیت‌های سایر روش‌های بسته‌بندی (محدودیت‌های ریاضی، پیاده‌سازی و محاسباتی) را نداشته و علاوه بر این‌که تمامی مزیت‌های روش بسته‌بندی دیجیتال را دارد، دارای مزیت دیگری نیز هست. در این روش، در هر مرحله‌ی زمانی، هر حجم(ذره)، می‌تواند در هر جهتی(بی‌شمار جهت) حرکت کند درحالی‌که در روش بسته‌بندی دیجیتال، در هر مرحله‌ی زمانی، هر حجم(ذره)، تنها می‌تواند در یکی از 26 جهت ممکن(در حالت سه‌بعدی)، حرکت کند.

در شکل(7)، روش بسته‌بندی دیجیتال (قسمت الف) و روش بسته‌بندی استفاده از نقاط کنترلی (قسمت ب)، در فضای دوبعدی، مورد مقایسه قرار گرفتند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌کنید، در هر دو روش، ذرات به راحتی توسط پیکسل‌ها (در روش بسته‌بندی دیجیتال) و نقاط (در روش بسته‌بندی پیشنهادی جدید (استفاده از نقاط کنترلی))، بیان می‌شوند. در روش بسته‌بندی دیجیتال، از آنجایی که فضای بسته‌بندی، تکه‌سازی می‌شود، لذا هر ذره، در هر مرحله‌ی زمانی، تنها می‌تواند در یک خانه‌ی شبکه و در نتیجه در یکی از جهت‌های نشان داده شده در شکل(7-الف)، حرکت کند. اما در روش بسته‌بندی استفاده از نقاط کنترلی، از آنجایی ذرات و خود ظرف با استفاده از نقاط توصیف می‌شوند (در نتیجه نیازی به توصیف فضای بسته‌بندی نیست)، به همین دلیل هر ذره، در هر مرحله‌ی زمانی، می‌تواند در هر جهتی (بی‌شمار جهت)، حرکت کند.

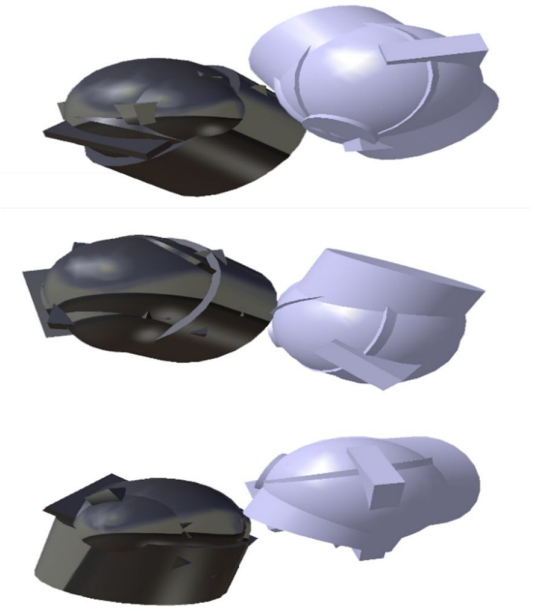
شکل(8)، تشخیص برخورد دو حجم تصادفی را در چند بار اجرای این برنامه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از آنجایی که بردارهای یکه به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شوند، در هر اجرا، برخورد در ناحیه‌ی متفاوتی، اتفاق افتاده است. همچنین با وجود پیچیدگی بسیار زیاد شکل احجام، تشخیص تماس، به‌صورت دقیق انجام‌شده است.

این الگوریتم همچنین می‌تواند برای بسته‌بندی احجام تصادفی که بازتولید شده‌اند؛ مورد استفاده قرار گیرد. شکل(9)، تشخیص برخورد دو ذره‌ی تصادفی بازتولید شده را در چند بار اجرای این برنامه نشان می‌دهد.

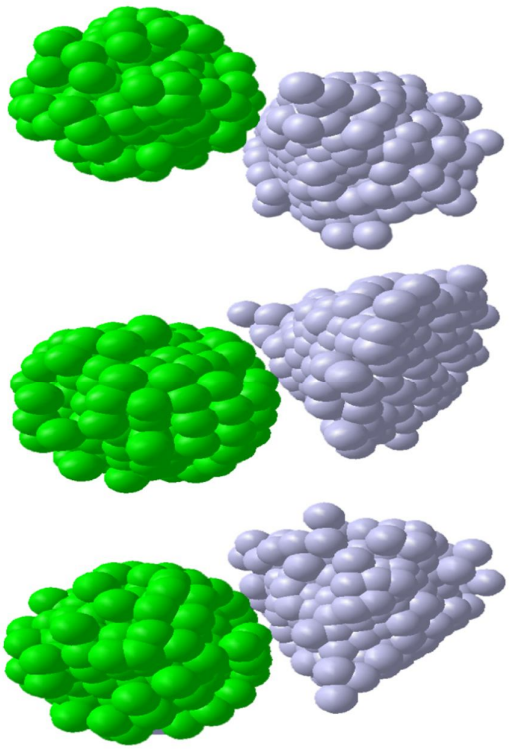
این روش جدید (روش استفاده از نقاط کنترلی)، به منظور استفاده در کاربردهای مختلف و نیز بسته‌بندی تعداد زیاد ذرات، نیاز به تعریف چگونگی حرکت ذرات (بسته به نوع کاربرد)، دارد. به عنوان مثال برای شبیه‌سازی اثر جاذبه‌ی زمین، بردارهای یکه‌ی تصادفی (که ذرات در هر مرحله‌ی زمانی به‌وسیله‌ی آن‌ها جابه‌جا می‌شوند)، باید متمایل به پایین باشند و یا برای شبیه‌سازی اثر ارتعاش در بسته‌بندی، می‌توان به ذرات پس از برخورد با یکدیگر، اجازه‌ی چند حرکت رو به بالا (از طریق بردارهای یکه‌ی تصادفی متمایل به بالا) را داد. در کارهای آینده به بهبود این الگوریتم بسته‌بندی (تعریف چگونگی حرکت ذرات بسته به نوع کاربرد و ...)، پرداخته خواهد شد.



شکل7: مقایسه‌ی روش بسته‌بندی دیجیتال (قسمت الف) و روش بسته‌بندی استفاده از نقاط کنترلی(قسمت ب)



شکل 8: تشخیص برخورد دو ذره‌ی تصادفی در اجراهای متفاوت برنامه‌ی تشخیص تماس و بسته‌بندی احجام تصادفی با استفاده از روش نقاط کنترلی



شکل 9: تشخیص برخورد دو ذره‌ی تصادفی بازتولید شده، در اجراهای متفاوت برنامه‌ی تشخیص تماس و بسته‌بندی احجام تصادفی با استفاده از روش نقاط کنترلی

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روند مناسب برای ایجاد و آماده‌سازی ذرات دارای اشکال پیچیده، به منظور استفاده در تحلیل‌های مواد ناپیوسته به روش المان مجزا، ارائه گردید. در ابتدا، از آنجایی که اکثر مواد ناپیوسته دارای ذراتی با شکل نامنظم و پیچیده هستند، دو الگوریتم جدید برای ایجاد احجام و سطوح تصادفی ارائه گردید. سپس برای اینکه احجام تصادفی تولید شده، در نرم‌افزارهایی که از روش المان مجزا استفاده می‌کنند، قابل استفاده باشند، به بازتولید آن‌ها از طریق مونتاژ کره‌ها بر روی یکدیگر پرداخته شد. در نهایت از آنجایی که ورودی اولیه در تحلیل مواد ناپیوسته به کمک روش المان مجزا، مجموعه‌ای بسته‌بندی شده از ذرات است، این احجام به کمک یک الگوریتم بسته‌بندی جدید، بسته‌بندی شدند. اساس این روش جدید، استفاده از نقاط کنترلی (نقاط سطح بیرونی حجم و یا نقاط کل حجم)، برای کنترل و تشخیص برخورد احجام است. این روش بسته‌بندی جدید (روش استفاده از نقاط کنترلی)، علاوه بر این که تمامی مزیت‌های روش بسته‌بندی دیجیتال را دارد، دارای مزیت دیگری نیز هست. در این روش، در هر مرحله‌ی زمانی، هر حجم (ذره)، می‌تواند در هر جهتی (بی‌شمار جهت) حرکت کند در حالی که در روش بسته‌بندی دیجیتال، در هر مرحله‌ی زمانی، هر حجم (ذره)، تنها می‌تواند در یکی از 26 جهت ممکن، حرکت کند. این مزیت می‌تواند موجب کارایی بالاتر این روش بسته‌بندی جدید (استفاده از نقاط کنترلی) نسبت به سایر روش‌های بسته‌بندی (حتی روش بسته‌بندی دیجیتال) گردد.

روش بسته‌بندی استفاده از نقاط کنترلی، به منظور استفاده در کاربردهای مختلف و نیز بسته‌بندی تعداد زیاد ذرات، نیاز به تعریف چگونگی حرکت ذرات (بسته به نوع کاربرد)، دارد. به عنوان مثال برای شبیه‌سازی اثر جاذبه‌ی زمین، بردارهای یکه‌ی تصادفی(که ذرات در هر مرحله‌ی زمانی به‌وسیله‌ی آن‌ها جابه‌جا می‌شوند)، باید متمایل به پایین باشند و یا برای شبیه‌سازی اثر ارتعاش در بسته‌بندی، می‌توان به ذرات پس از برخورد با یکدیگر، اجازه‌ی چند حرکت رو به بالا (از طریق بردارهای یکه‌ی تصادفی متمایل به بالا) را داد.

توسعه‌ی این روش بسته‌بندی، برای احجام نرم، از دیگر قابلیت‌هایی است که می‌توان به این روش، افزود؛ به‌طوری‌که احجام پس از برخورد با یکدیگر، اجازه‌ی تغییر شکل داشته باشند.

پس از تکمیل و بهینه‌سازی این الگوریتم بسته‌بندی، پیشنهاد می‌شود که به اعتبارسنجی این الگوریتم از طریق مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج حاصل از سایر روش‌های بسته‌بندی، پرداخته شود. به عنوان مثال می‌توان بیشینه‌ی چگالی بسته‌بندی حاصل از این روش را برای تعدادی ذره با شکل‌های مختلف، به دست آورد، سپس آن را با بیشینه‌ی چگالی بسته‌بندی حاصل از سایر روش‌ها، مقایسه نمود. برای اعتبارسنجی این روش بسته‌بندی، همچنین می‌توان از مقایسه‌ی نتایج حاصل از این روش با نتایج بسته‌بندی‌های تجربی، استفاده نمود.

در نهایت پیشنهاد می‌شود، تأثیر پارامترهای مختلف، مانند نرخ افزودن ذرات، شرایط مرزی، نحوه‌ی افزودن ذرات، شکل ذرات و غیره، بر روی این روش بسته‌بندی مورد بررسی قرار گیرد.

در کارهای آینده به بهبود این الگوریتم بسته‌بندی (تعریف چگونگی حرکت ذرات بسته به نوع کاربرد و ...)، پرداخته خواهد شد.

7- مراجع

[1] Ferellec, J.-F., & McDowell, G. (2008). A simple method to create complex particle shapes for DEM. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 3(3), 211-216.
[2] Ferrez, J.-A. (2001). Dynamic triangulations for efficient 3D simulation of granular materials.
[3] Mollon, G., & Zhao, J. (2012). Fourier–Voronoi-based generation of realistic samples for discrete modelling of granular materials. Granular Matter, 14(5), 621-638.
[4] Yohannes, B., Hill, K., & Khazanovich, L. (2009). Mechanistic modeling of unbound granular materials.
[5] Cleary, P. W., & Sawley, M. L. (2002). DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge. Applied Mathematical Modelling, 26(2), 89-111.
[6] Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique, 29(1), 47-65.
[7] Bobet, A., Fakhimi, A., Johnson, S., Morris, J., Tonon, F., & Yeung, M. R. (2009). Numerical models in discontinuous media: review of advances for rock mechanics applications. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 135(11), 1547-1561.
[8] Sawley, M. L., & Cleary, P. W. (1999). A parallel discrete element method for industrial granular flow simulations.
[9] Johnson, J. (2005). JJ_Superspherize software., Accessed 8 December 2005; http://www.exch.demon.co.uk/jj_superspherize.html , julian@exch.demon.co.uk.
[10] Pokrovskii, D. (2011). Chrome Experiments - "Visual Random", Accessed 25 March 2011; http://www.chromeexperiments.com/detail/visual-random/?f=, http://voxelrain.appspot.com/.
[11] Dev, G. (2013). Exploding Voxels. Accessed 3 September 2013; http://www.giawa.com/journal-entry-15-so-much-stuff/.
[12] Chernyh, A. (2013). R&D Random Volume Spread on Vimeo, Accessed 14 January 2013; http://www.orbaz.com/forum/viewtopic.php?p=17567&sid=2ad7d75cafae326cd8f07ab510.
[13] Patir, N. (1978). A numerical procedure for random generation of rough surfaces. Wear, 47(2), 263-277.
[14] Whitehouse, D. (1983). The generation of two dimensional random surfaces having a specified function. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 32(1), 495-498.
[15] Dimitriou, M., & Vyzoviti, S. (2010). The grasping hand as form generator. Generative modelling in physical and digital media: Department of Architecture, University of Thessaly - Greece.
[16] Schott, J., & Rossor, M. (2003). The grasp and other primitive reflexes. Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry, 74(5), 558-560.
[17] Allen, S., & McQuade, M. (2011). Landform building: architecture's new terrain: Lars Müller Publishers.
[18] Tachi, T. (2010). Free form origami software. Accessed 23 January 2014; http://www.tsg.ne.jp/TT/software/.
[19] Sala, N., Metzeltin, S., & Sala, M. (2002). Applications of mathematics in the real world: territory and landscape. University of Italian Switzerland, Switzerland , Largo Bernasconi.
[20] Sukop, M. (2006). Sierpinski Carpet and Menger Sponge. Department of Earth and Environment Florida International University, Accessed 18 September 2014; http://faculty.fiu.edu/~sukopm/fractals.htm.
[21] Lu, M., & McDowell, G. (2007). The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method. Granular Matter, 9(1-2), 69-80.
[22] Wang, L., Park, J.-Y., & Fu, Y. (2007). Representation of real particles for DEM simulation using X-ray tomography. Construction and Building Materials, 21(2), 338-346.

[23] atsushima, T., Saomoto, H., Matsumoto, M., Toda, K., & Yamada, Y. (2013). Discrete element simulation of an assembly of irregularly-shaped grains: Quantitative comparison with experiments. Springer-Verlag, Heidelberg., 44(2).
[24] Price, M., Murariu, V., & Morrison, G. (2007). Sphere clump generation and trajectory comparison for real particles. Proceedings of Discrete Element Modelling 2007.
[25] Soppe, W. (1990). Computer simulation of random packings of hard spheres. Powder Technology, 62(2), 189-197.
[26] Visscher, W. M., & Bolsterli, M. (1972). Random packing of equal and unequal spheres in two and three dimensions. Nature, 239, 504-507.
[27] Powell, M. (1980). Computer-simulated random packing of spheres. Powder Technology, 25(1), 45-52.
[28] Evans, K., & Ferrar, M. (1989). The packing of thick fibres. Journal of Physics D: Applied Physics, 22(2), 354.
[29] Nolan, G., & Kavanagh, P. (1995). Random packing of nonspherical particles. Powder Technology, 84(3), 199-205.
[30] Ting, J. M., Khwaja, M., Meachum, L. R., & Rowell, J. D. (1993). An ellipse-based discrete element model for granular materials. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 17(9), 603-623.
[31] Sherwood, J. (1997). Packing of spheroids in three-dimensional space by random sequential addition. Journal of Physics A: Mathematical and General, 30(24), L839.
[32] Coelho, D., Thovert, J.-F., & Adler, P. (1997). Geometrical and transport properties of random packings of spheres and aspherical particles. Physical Review E, 55(2), 1959.
[33] Delaney, G. W., Hutzler, S., & Aste, T. (2008). Relation between grain shape and fractal properties in random Apollonian packing with grain rotation. Physical review letters, 101(12), 120602.
[34] Vold, M. J. (1960). The sediment volume in dilute dispersions of spherical particles. The Journal of Physical Chemistry, 64(11), 1616-1619.
[35] Manna, S., & Herrmann, H. (1991). Precise determination of the fractal dimensions of Apollonian packing and space-filling bearings. Journal of Physics A: Mathematical and General, 24(9), L481.
[36] Andrienko, Y. A., Brilliantov, N., & Kurths, J. (2000). Complexity of two-dimensional patterns. The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems, 15(3), 539-546.
[37] Dodds, P. S., & Weitz, J. S. (2002). Packing-limited growth. Physical Review E, 65(5), 056108.
[38] Jia, X., & Williams, R. (2001). A packing algorithm for particles of arbitrary shapes. Powder Technology, 120(3), 175-186.

Generating, Reproducing and Packaging of Random Volumes for Discrete Element Analysis of Discontinuous Materials

A. Sajjadi[1], Kh. Khalili[2]*
1- MSc. Student of Mechanics, Dept. of Mechanics Engineering, Birjand University, Iran
2- Associate Professor, Dept. of Mechanics Engineering, Birjand University, Iran

* Corresponding Author: khkhalili@yahoo.com
(Received: February 2015, Accepted: June 2015)

Abstract

Today, with the increasing need for simulation of granular materials and simulation of materials grading, creating random volumes and surfaces have become significantly important. Since discontinuous materials have particles with random shapes, thus, creating random volumes and using them as separate blocks in the analysis of discrete element can significantly help to adjust the numerical analysis results of discontinuous materials to the experimental results. In this paper, an appropriate process is offered to create and prepare particles with complex shapes in order to use them in the analysis of discontinuous materials by discrete element method. To this end, using two new proposed algorithms, random surfaces and volumes are created. Then, in order to use the produced random surfaces and volumes in the analytical software that uses discrete element method, an algorithm is offered to reproduce them through assembling the spheres on each other. Finally, since the initial input in the analysis of discontinuous materials is a packing set of discrete blocks by offering a new packaging algorithms, these discrete blocks are got packed. All algorithms were successfully implemented and the random volumes are generated and displayed in geometric modeling environment.

Keywords

Particle shapes, 3D model reproduction, Granular materials, Random shapes, discrete element method