

شبیه‌سازی رفتار توده‌ی مواد گرانوله‌ای در حین ترمز کردن با استفاده از روش المان‌های مجزا (۳۸۹)

جانی‌سرنای امده^۱، مدرس مطلق اسعد^۲، رحمانی‌دیدار علاء‌الدین^۳

چکیده

در این مقاله توده مواد گرانوله‌ای به صورت گسسته و با استفاده از روش المان‌های مجزا شبیه‌سازی شده است. هدف از این شبیه‌سازی بررسی خصوصیات دینامیکی مواد گرانوله‌ای و عکس‌العمل بین آنها و بدنه وسیله حمل و نقل در حین ترمز کردن وسیله و یا به عبارتی در حین تغییر در شتاب حرکت وسیله می‌باشد. ذرات گرانوله‌ای با استفاده از المان‌های کروی غیر چسبناک توسط مدل تماسی هرتز-میندلین شبیه‌سازی شده است. شرایط اولیه مختلفی شامل شتاب‌ها و سرعت اولیه برای سیستم لحاظ شده است. سیستم دینامیکی حاصل به صورت عددی و با استفاده از روش تفاضل مرکزی و بر اساس انتگرال‌گیری صریح زمانی تحلیل شده است و در نهایت نیروهای دینامیکی ناشی از ضربه به دست آمده است. نتایج نشان داد که در زمان‌های کوتاه‌تر ترمز مقدار بیشینه نیروی دینامیکی، فاکتور ضربه، بیشتر می‌شود و نیروی دینامیکی سریع‌تر به این مقدار می‌رسد. اثرات اصطکاک دیواره‌ها و چگالی جرمی ذرات روی نیروی دینامیکی وارد بر دیواره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده اطلاعات مفیدی را برای تعیین استحکام قسمت‌های مختلف سیستم انتقال مواد گرانوله‌ای ارائه می‌دهد.

کلید واژه: مواد گرانوله‌ای، روش المان‌های مجزا، مدل تماسی، فاکتور ضربه

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه، پست الکترونیک: johnny.hamed@gmail.com

۲- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۳- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۱ مقدمه

مواد گرانوله‌ای به وفور در طبیعت، در صنعت و بخصوص در کشاورزی وجود دارند. در صنایع مربوط به کشاورزی هر محصول برداشت شده در حین جابجایی و انتقال از برداشت تا مصرف، حداقل یک مرحله به صورت گرانوله‌ای می‌باشد. طراحان و مهندسين سیستم‌های انتقال مواد گرانوله‌ای همواره به مسئله ساز بودن فرآیندهای جریان یافتن و مخلوط شدن این مواد و نیز جابجا کردن آنها اذعان دارند [۱ و ۲]. در این باره چنین تخمین زده می‌شود که حدود ۴۰ درصد از عملکرد و ظرفیت ما بین آلات صنعتی مربوط به مواد گرانوله‌ای بدلیل مسائل ناشی از جابجایی مواد گرانوله‌ای تلف می‌شود [۳ و ۴]. در صنایع مربوط به کشاورزی برخی از این مسائل مربوط به صدماتی می‌شود که محصول کشاورزی که به صورت گرانوله‌ای است، در حین فرآیندهای برداشت، سورتینگ، انتقال و انبار کردن و غیره می‌بیند [۵].

مدل کردن رفتار مواد گرانوله‌ای به طور گسترده‌ای با استفاده از مکانیک محیط‌های پیوسته مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل‌سازی‌ها یک سری معادلات رفتاری برای میدان‌های تنش و سرعت در نظر گرفته می‌شود که این کار با استفاده از معادلات بقای جرم و اندازه حرکت خطی صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از این روابط رفتارهای گوناگون توده‌ی مواد مانند قابلیت جریان پذیری، شکست، برش و غیره مورد بررسی قرار می‌گیرد [۶]. در نتیجه روابط ساختاری بسیار پیچیده‌ای برای بیان واقعی رفتار مواد گرانوله‌ای بوجود می‌آید. بطوریکه در حال حاضر مدل کردن رفتار مواد گرانوله‌ای در تغییر شکل‌های بزرگ و در حین جریان یافتن این مواد با استفاده از مدل‌های ساختاری پیوسته تقریباً غیر ممکن می‌باشد [۷]. انتقال مواد گرانوله‌ای در جعبه بوسیله ماشین‌های مختلف در قسمت‌های مختلفی از صنایع گوناگون و حتی در باربری‌های جاده‌ای مشاهده می‌شود. مواد گرانوله‌ای خصوصیات مخصوص به خود را دارند، به عنوان مثال قابلیت جریان پذیری و تغییرات در خواص ماکروسکوپی آنها در حین ترمز کردن، پرتاب کردن و دور زدن یا عبارت دیگر شتاب گرفتن ممکن است با سایر مواد متفاوت باشد. این عکس‌العمل‌ها می‌توانند بار وارد بر سیستم حمل و نقل را به طور چشمگیری تحت تاثیر قرار دهد، همچنین در ارزیابی استحکام این وسایل نقش مهمی را ایفا می‌کنند. بنابراین ارزیابی مقدار بارهای وارد بر سیستم در حین کار که شامل بار مضاعف دینامیکی هم می‌باشد، از اهمیت والایی برخوردار است. قابل ذکر است که در صنایع کشاورزی این بارها باعث آسیب دیدن محصولات می‌شوند.

روش المان‌های مجزا^۱ یک تکنیک عددی است که برای محاسبه و تعیین تغییر شکل‌ها و مشخصه‌های حرکتی مربوط به تعداد زیادی از ذرات که با هم و با محیط اطراف در تقابل هستند، بکار می‌رود. نتایج حاصل از کارهای قبلی نشان می‌دهد که روش المان‌های مجزا می‌تواند خصوصیات کلیدی جریان گرانوله‌ها را بدست دهد. در این روش هر یک از ذرات به عنوان یک جسم به طور جداگانه با جرم، ممان اینرسی و خواص فیزیکی مربوط به خود تعریف می‌وند. تماس بین دو ذره و بین هر ذره با محیط اطراف در جهت مماس و عمود بر نقطه یا سطح تماس بوسیله مدل‌های تماسی مختلفی قابل نمایش است [۸]. در این مقاله برخورد بین ذرات گرانوله‌ای با هم و با دیواره‌های جعبه در راستای عمود بر سطوح تماس با استفاده از مدل تماسی هرتز و در راستای مماس بر سطوح تماس با مدل تماسی میندین-درسیویچ^۲ شبیه‌سازی شده است. در این مقاله توده‌ای از مواد گرانوله‌ای کروی، درون یک محفظه مکعبی قرار گرفته‌اند و رفتار این مواد در حین ترمز کردن با استفاده از برنامه‌ی PFC3D3.00 شبیه‌سازی می‌گردد. هدف از این شبیه‌سازی بررسی خصوصیات دینامیکی مواد گرانوله‌ای و عکس‌العمل بین آنها و بدنه وسیله حمل و نقل در حین ترمز کردن وسیله و یا به عبارتی در حین تغییر در شتاب حرکت وسیله می‌باشد. نیروی دینامیکی وارد بر دیواره‌ی جلویی و اثرات چگالی جرمی ذرات و اصطکاک دیواره‌ها روی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج عددی بدست آمده از این برنامه در قالب جداول و نمودارهایی مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲ مواد و روش‌ها

۲-۱ روش المان‌های مجزا در برنامه PFC^{3D}3.00

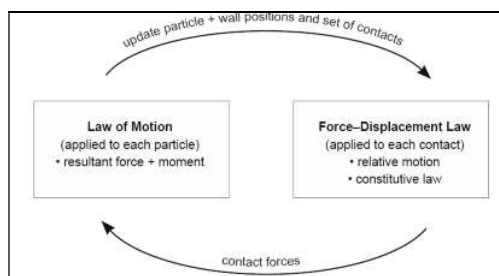
برنامه PFC^{3D}3.00 جابجایی‌ها و برهم‌کنش‌های موجود در بین یک اجتماع^۳ از ذرات را با استفاده از روش المان‌های مجزا مدل می‌کند. مدل‌سازی به روش المان‌های مجزا اولین بار توسط کاندل^۱ و استراک^۲ در زمینه مکانیک سنگ به کار گرفته شده

^۱ Discrete Element Method

^۲ Deresiewicz

^۳ Assembly

است [۹]. روش المان های مجزا اصولاً یک تکنیک عددی است که برای مدل کردن یک اجتماع از ذرات با خواص فیزیکی و مکانیکی مشخص بکار گرفته می شود. در این روش برهم کنش بین ذرات به صورت یک فرآیند دینامیکی و متغیر با زمان است که حالت تعادل زمانی شکل می گیرد که نیروهای داخلی متعادل شوند. نیروهای تماسی و جابجایی های توده تحت تنش ذرات را می توان با بدست آوردن مسیر حرکتی هر ذره بدست آورد. این جابجایی ها از انتشار یک بهم خوردگی در سیستم ذرات بوجود می آید، این بهم خوردگی می تواند ناشی از حرکت یک دیوار و یا یک ذره و یا یک نیروی خارجی باشد. این پدیده یک فرآیند دینامیکی است که در آن سرعت انتشار به خواص فیزیکی و مکانیکی ذرات بستگی دارد. رفتار دینامیکی ذرات به صورت عددی و با استفاده از یک الگوریتم با گام های زمانی نشان داده می شود به طوریکه در طول هر کدام از این گام های زمانی مقادیر سرعت و شتاب ثابت می ماند. محاسباتی که در این برنامه انجام می شود در واقع حالت متناوبی از کاربرد قانون دوم نیوتن برای حرکت ذرات و یک قانون نیرو-جابجایی برای برخوردهای بین ذرات است [۹].



شکل ۱ چرخه محاسبات در برنامه PFC^{3D}3.00

قانون نیرو-جابجایی مربوط به ارتباط جابجایی نسبی بین دو ذره که در تماس با هم هستند و نیروی بین ا می باشد. برای هر دو نوع برخورد شامل برخورد بین دو کره و برخورد یک کره با دیوار، نیروی تماسی در یک نقطه وارد می شود. نیروی تماسی بین دو ذره شامل دو مولفه برشی و نرمال می باشد که قانون نیرو-جابجایی رابطه بین این دو مولفه با مقادیر جابجایی را بیان می کند. از آنجاییکه نیروهای تماسی تنها روی دو ذره ای که با هم برخورد می کنند بوجود می آیند بنابراین به یک الگوریتم پیشرفته نیاز است تا بتواند برای هر ذره تماس های ممکن را شناسایی و برخوردهای آن ذره را شکل دهد. در این برنامه از یک الگوریتم بی یار قوی برای این منظور استفاده شده است.

همانطور که بیان گردید به یک قانون نیرو-جابجایی نیاز است، در این مقاله از قانون نیرو-جابجایی و یا اصطلاحاً از مدل تماسی هرتز-میندلین^۳ برای شبیه سازی استفاده شده است. یک مدل هرتز-میندلین ساده شده که در برنامه PFC^{3D}3.00 تعبیه شده است، یک مدل غیر خطی می باشد که برای استفاده از این مدل لازم است که نسبت پواسون و مدول برشی یا مدول یانگ در اختیار باشد. این مدل برای کره هایی که تحت کشش هستند تعریف نشده است بنابراین با مدل هایی که بین ذرات پیوندهایی بوجود می آورند سازگاری ندارد. در برهم کنش کره با کره خواص الاستیک به صورت مقادیر میانگین لحاظ می شود و در برهم کنش کره با دیوار، دیوار به صورت جسم صلب در نظر گرفته می شود و از خواص الاستیک کره استفاده می شود.

۴ Cundall

۵ Strack

۴ Hertz-Mindlin

۲-۲ تشریح مسئله

در این مقاله رفتار یک اجتماع از ذرات نمایش داده می شود که در آن بیشتر به برهم کنش بین توده مواد با دیواره جعبه و جابجایی توده مواد پرداخته شده است. در اینجا جعبه ای به طول ۴ m، عرض ۲ m و ارتفاع ۱ m برای قرار گرفتن توده مواد گرانوله ای در آن تعبیه شده است. مدل DEM مواد گرانوله ای که با برنامه PFC^{3D}3.00 شبیه سازی شده است شامل تعداد ۵۰۰۰۰ ذره یکسان و کروی به شعاع ۰/۰۴۵ m است. از آنجا که برای شبیه سازی برخوردها در برنامه از مدل تماسی هرتز-میندلین استفاده شده است، مشخصات مکانیکی مربوط به ذرات شامل ضریب پواسون، مدول یانگ و ضریب اصطکاک است. مدول یانگ این ذرات برابر با ۷۰ Mpa لحاظ شده است که در حدود مدول یانگ برخی از محصولات کشاورزی می باشد و خاصیت الاستیکی برابر با یک هزارم خاصیت الاستیک دیواره دارد. این مقادیر در جدول ۱ آمده است.

در کارهای انجام شده قبلی به این نتیجه رسیده اند که استفاده از مدول های کوچکتر برای مواد گرانوله ای تاثیر ناچیزی روی رفتار فیزیکی سیستم دارد، اما این کار می تواند با افزایش گام زمانی بحرانی زمان مورد نیاز برای شبیه سازی را کاهش می دهد [۱۰]. در شبیه سازی عددی با برنامه PFC^{3D}3.00 فضایی که ذرات گرانوله و یا سایر اشیا مورد تحلیل در آن حرکت می کنند بسیار مهم می باشد زیرا این برنامه فضای مذکور را به سلول های مکعبی تقسیم می کند تا بتواند جابجایی های ممکن و حالت های تماسی که می تواند رخ دهد را تعیین نماید. ابعاد این فضا یک پارامتر کلیدی است که راندمان کلی محاسبات را تحت تاثیر قرار می دهد. بنابراین یک تبدیل معادل بکار گرفته می شود تا فضای کاری تا حد ممکن کوچک باشد. در اینجا نیز جعبه ساکن نگه داشته می شود و حرکت نسبی ذرات مورد تحلیل قرار می گیرد.

جدول ۱ خواص مکانیکی و فیزیکی

شعاع ذرات	۰/۰۴۵m
چگالی ذرات	۳۰۰ Kg/m ³
مدول یانگ ذرات	۷۰ Mpa
ضریب پواسون ذرات	۰/۲۵
ضریب اصطکاک بین ذرات	۰/۳۵
تعداد ذرات	۵۰۰۰۰
جرم تمام ذرات	۵۷۲۶Kg
مدول یانگ دیواره ها	۷۰ Gpa
ضریب پواسون دیواره ها	۰/۳

جدول ۲ ویژگی های کینتیکی حالت های ترمز کردن

حالت	مدت زمان ترمز کردن (s)	شتاب نگهدارنده (m/s ²)	مسافت ترمز (m)
اول	۱	۲۰	۱۰
دوم	۰/۸	۲۵	۸
سوم	۰/۶۶۷	۳۰	۶/۶۷
چهارم	۰/۵	۴۰	۵

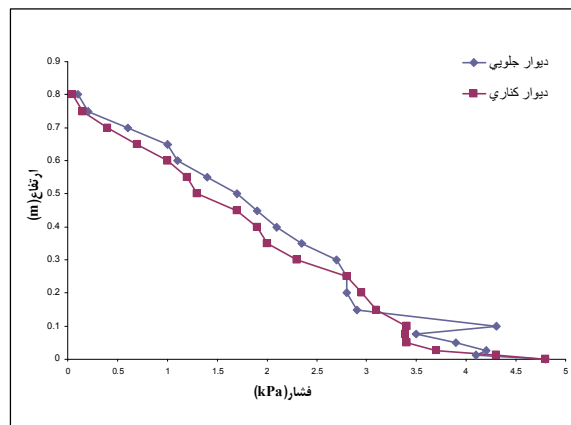
مسئله مورد بررسی در این مقاله عبارتست از جعبه حاوی توده مواد گرانوله ای که قبل از ترمز کردن دارای سرعت ۷۲ km/h می باشد، این جعبه در چهار حالت ترمز می کند، به این معنی که در هر حالت یک شتاب نگهدارنده به آن وارد می شود. مقادیر شتاب نگهدارنده، زمان و مسافت های ترمز متناظر با این چهار مرحله در جدول ۲ آمده است. از آنجا که بیشترین فشار و نیرو در حین ترمز کردن به دیواره جلویی وارد می شود، بیشتر در مورد نیروهای وارد بر دیواره جلویی بحث می شود. در برنامه PFC^{3D}3.00 ذرات به صورت تصادفی در حجم درون جعبه با مشخصات فیزیکی و مکانیکی مربوطه ایجاد می شوند، سپس تحت شتاب گرانش قرار می گردند. تعداد زیادی از سیکل های محاسبات در گام زمانی معینی که توسط برنامه به صورت بهینه انتخاب می شود، انجام می گردد تا اینکه ذرات ته نشین شده و به یک تعادل نسبی برسند (در این مرحله سرعت تمام ذرات برابر با صفر می گردد) سپس

برای شبیه سازی حالت ترمز کردن ذرات در راستای پیشروی (راستای X) برابر با 72 km/h می شود و در ادامه شتاب نگهدارنده به تمام ذرات وارد می شود. در این مرحله محاسبات سیکلیک اصلی شروع می شود.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ فشار استاتیکی روی دیواره جلویی

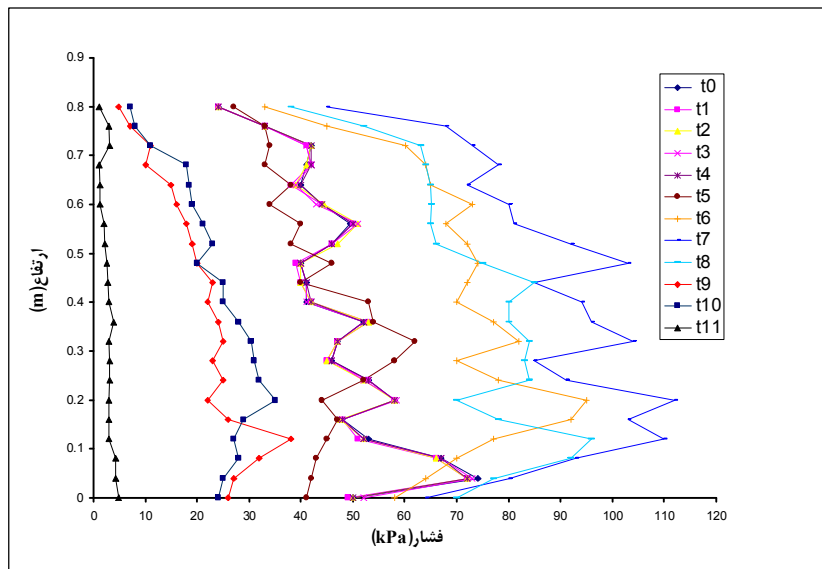
زمانیکه بستری از ذرات گرانوله ای درون جعبه شکل گرفت و به حالت تعادل نسبی رسید، می توان با استفاده از برنامه نیروهای عکس العمل استاتیکی موجود در بین ذرات و هر کدام از دیواره ها را بدست آورد. این اطلاعات می توانند به صورت میانگین های آماری برای برآورد توزیع فشار و یا تنش نرمالی که در سطح داخلی دیواره ها بوجود می آید، مورد استفاده قرار گیرد. همانطور که انتظار می رفت یافته ها حاکی از این بود که توزیع فشار روی دیواره جلویی، دیواره عقبی و دو دیواره کناری تقریباً یکسان بود. توزیع فشار در طول دیواره های جلویی و کناری در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می گردد که فشار وارد بر دیواره ها به صورت خطی با ارتفاع تغییر می کند. نکته ای که در اینجا حائز اهمیت می باشد این است که لزومی ندارد توزیع فشار استاتیکی که در اینجا مشاهده می شود مانند توزیع فشارهای استاتیکی موجود در دیواره های سیلوهای بلند باشد، زیرا در اینجا عمق عمودی محفظه بسیار کوچک و تعداد ذرات محدود است. پروفیل فشار استاتیکی می تواند برای مقایسه با داده های بدست آمده از فشارهای دینامیکی مفید واقع شود.



شکل ۲ توزیع فشار استاتیکی روی دیواره های جلویی و کناری

۳-۲ فشار دینامیکی روی دیواره جلویی

برای بدست آوردن توزیع فشار دینامیکی روی سطح داخلی دیواره جلویی همانند توزیع فشار استاتیکی می بایست که در لحظه معینی از زمان این کار صورت گیرد، تا داده های مربوطه به صورت نمودار نسبت به ارتفاع دیواره ترسیم شوند. تغییرات توزیع فشار دینامیکی روی دیواره جلویی در لحظات زمانی مختلف برای حالتی که شتاب نگهدارنده برابر با 25 m/s^2 می باشد و در بازه زمانی به طول $0/8$ ثانیه، در شکل ۳ نشان داده شده است.



زمان (ثانیه)

t_0	0
t_1	0/076
t_2	0/152
t_3	0/227
t_4	0/265
t_5	0/303
t_6	0/379
t_7	0/455
t_8	0/531
t_9	0/607
t_{10}	0/682
t_{11}	0/724

شکل ۳ توزیع فشار دینامیکی روی دیواره جلویی

در مورد نمودارهای شکل ۳ چنین استنباط می شود که با افزایش زمان ترمز کردن فشار دینامیکی روی سطح دیواره نسبت به ارتفاع دیواره به صورت یکنواخت توزیع نمی شود بلکه به صورت خطوط زیگزاگی با مقادیر مختلف ظاهر می گردد. این امر می تواند چنین توجیح شود که در استفاده از روش المان های مجزا با تعداد محدودی از ذرات، قوس ها و فرورفتگی های قوسی شکل محلی به راحتی و بیش از حد انتظار شکل می گیرند. این قوس ها بخصوص در گوشه های پایینی دیواره جلویی یعنی در جاییکه بدلیل اصطکاک بین ذرات با ذراتی که به کف جعبه فشرده شده اند، فشار به شدت دچار افت می شود بوجود می آیند.

۳-۳ نیروی دینامیکی وارد بر دیواره جلویی

نیروی دینامیکی برآیند که در اینجا با F_d نشان داده می شود از اینرسی جرم ذرات در حین ترمز کردن ناشی می شود. این نیرو از روی مجموع نیروهای تماسی بین ذرات گرانوله و دیواره جلویی در لحظه خاصی از زمان محاسبه می شود. همانگونه که پیشتر بیان گردید این نیرو می تواند به عنوان یک شاخص مهم برای برآورد استحکام بدنه وسیله حمل و نقل باشد، بنابراین خصوصیات بیشتر و مهم تری از این نیرو بایستی مد نظر قرار گیرد. به منظور ارائه اثرات اینرسی جرمی ذرات در حالت کلی تر یک فرم بدون بعد از نیروی دینامیکی، f_d ، مطابق با رابطه زیر در نظر گرفته می شود.

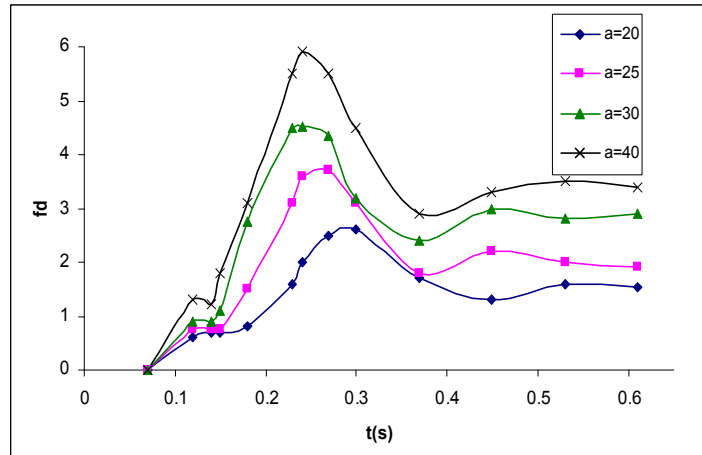
$$f_d = \frac{F_d}{Mg} \quad (1)$$

که در آن g شتاب گرانش و M جرم کلی توده مواد گرانوله ای است. نیروی دینامیکی F_d و جرم M را می توان به صورت روابط ۲ و ۳ در نظر گرفت.

$$F_d = \sum_{i=1}^n N_i \quad (2)$$

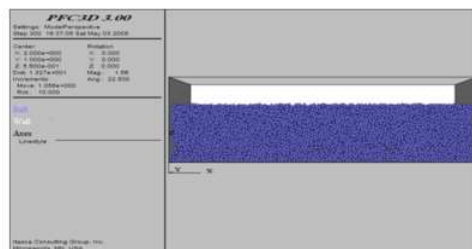
$$M = \sum_{i=1}^n m_i \quad (3)$$

که در این روابط N_i بیانگر نیروی تماسی بین دیواره جلویی و i -امین ذره با جرم m_i است و n تعداد کل ذرات می باشد.

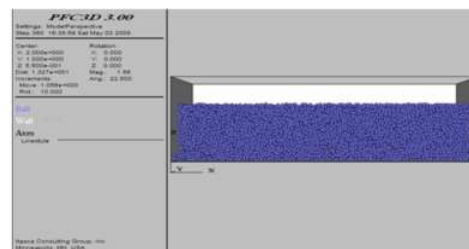


شکل ۴ نیروی دینامیکی بدون بعد نسبت به زمان در شتاب های نگهدارنده مختلف

مقدار بیشینه نیروی دینامیکی بدون بعد $k_d = f_{dMAX}$ ، را می توان به عنوان فاکتور ضربه^۱ در نظر گرفت. مقدار تغییرات نیروی دینامیکی در قالب نیروی دینامیکی بدون بعد (f_d) در مقابل زمان ترمز کردن برای چهار مقدار شتاب در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده از برنامه که در شکل ۴ نشان داده شده است می توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش زمان در هر یک از حالت های چهارگانه ی شتاب نگهدارنده، مقدار نیروی دینامیکی بدون بعد در چهار مرحله دستخوش تغییرات می شود. در مرحله اول نیرو به صورت یکنواخت تا یک مقدار خاصی افزایش می یابد. این مرحله در واقع بیانگر حالت فشرده شدن ذرات در تماس با دیواره در بین دیواره و ذرات مجاور است. در مرحله دوم در بازه نسبتاً کوتاهی از زمان افزایش در نیروی دینامیکی وارد بر دیواره به تاخیر می افتد به طوری که به صورت یک قسمت صاف با مقدار نسبتاً ثابت در نمودار نمایان می شود. همانگونه که در شکل مشاهده می شود زمان ترمز کوتاهتر و یا به عبارتی شتاب نگهدارنده بیشتر، مقدار نیروی دینامیکی بیشتری را در بازه زمانی کوتاهتر به همراه دارد. اما در مرحله سوم مقدار نیروی دینامیکی به سرعت افزایش می یابد و به مقدار بیشینه خود یعنی k_d می رسد. بزرگی این مقدار بیشینه به زمان ترمز کردن یا همان مقدار شتاب نگهدارنده بستگی دارد، به طوری که در زمان ترمز کوتاهتر نیروی دینامیکی زودتر به مقدار بیشینه خود می رسد و همچنین مقدار بیشینه نیروی دینامیکی بیشتر می شود. در نهایت در آخرین مرحله نیروی دینامیکی بدون بعد سریعاً از مقدار بیشینه خود نزول می کند و با نوسانات میرا به سمت یک مقدار ثابت میل می کند. برای تشریح چهار مرحله ای که در بالا توضیح داده شد به ترتیب چهار نما از جعبه حاوی توده مواد گرانوله ای ساخته شده در محیط برنامه، در چهار لحظه از زمان که هرکدام متناظر با یکی از مراحل چهارگانه مذکور است ارائه شده است. در این تصاویر دیواره سمت راست در تصویر دیواره جلویی جعبه می باشد.

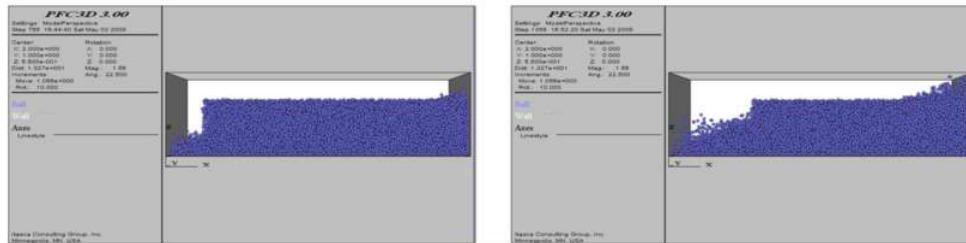


الف- مرحله اول $t=0.02275$ s



ب- مرحله دوم $t=0.11373$ s

^۱ Impact factor



ج - مرحله سوم $t = 0.32755$ s

د - مرحله چهارم $t = 0.55346$ s

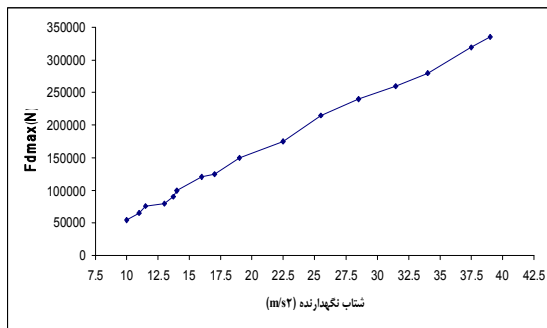
شکل ۵ نماهای جعبه ذرات در شتاب نگهدارنده 25 m/s^2

در اولین نما (شکل ۵الف) که مربوط به مرحله اول است، ذرات نزدیک به دیواره جلویی بلافاصله با دیواره جلویی برخورد می کنند که در نتیجه منجر به افزایش یکنواخت فشار می شود. در دومین نما (شکل ۵ب) که مربوط به مرحله دوم است ذرات جلویی در حال برگشتن به جای اولیه خود هستند که با ذراتی که پس از ذرات جلویی قرار گرفته اند و در حال حرکت رو به جلو هستند برخورد می کنند، و به این ترتیب این برخوردهای ذرات با هم باعث عدم افزایش و ثبات نسبی در فشار وارد بر دیواره جلویی می شود. بدین ترتیب قسمت مسطح منحنی شکل می گیرد. در سومین نما (شکل ۵ج) که نشان دهنده لحظه ای از مرحله سوم است تقریباً تمام ذرات به سمت جلو حرکت می کنند که این امر باعث می شود که افزایش پیوسته نیروهای تماسی ادامه پیدا کند تا اینکه این نیروها به مقدار بیشینه خود برسند. در آخرین نما (شکل ۵د) که آخرین مرحله سیر تغییرات نیروی دینامیکی وارد بر دیواره جلویی را نسبت به زمان نشان می دهد، تعدادی از ذرات به ذرات دیگر برخورد می کنند و به جای اولیه خود به می گردند به طوری که یک موج ارتعاشی و تناوبی از نیروهای تماسی بین ذرات مجاور دیواره جلویی و خود دیواره شکل می گیرد. این امر موجب ایجاد نوساناتی میرا در فشار موجود روی دیواره جلویی می شود تا اینکه این فشار به یک مقدار ثابت برسد.

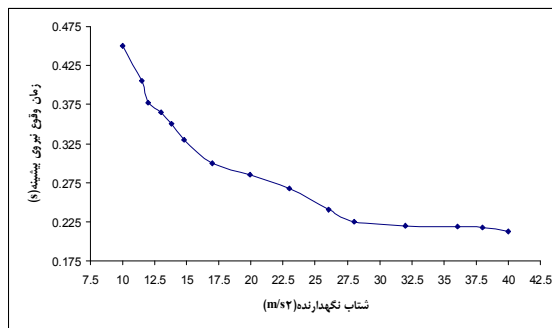
مهمترین ویژگی که در این چهار مرحله از تغییرات وجود دارد مقدار بیشینه نیروی دینامیکی است که همانطور که بیان شد به عنوان فاکتور ضربه مورد توجه قرار می گیرد. مقادیر فاکتور ضربه برای چهار حالت مختلف از زمان ترمز که در تمام آنها سرعت اولیه قبل از ترمز برابر با 72 کیلومتر در ساعت می باشد در جدول ۴ آمده است. این مقادیر نشان می دهند که زمانیکه شتاب نگهدارنده برابر با 20 متر بر مجذور ثانیه است و 1 ثانیه تا توقف کامل زمان لازم است، فاکتور ضربه در 0.297 ثانیه پس از لحظه ترمز کردن و با مقداری برابر با $2/658$ برابر وزن توده مواد گرانوله ای موجود در جعبه ظاهر می شود. در صورتیکه زمانیکه مدت زمان لحظه ترمز کردن تا لحظه توقف کامل 0.5 ثانیه است، فاکتور ضربه با مقداری برابر با $5/96$ برابر وزن توده مواد گرانوله ای موجود در جعبه و در زمان 0.22 ثانیه پس از ترمز کردن قرار می گیرد.

جدول ۴ مقادیر فاکتور ضربه در حالت های مختلف برای سرعت اولیه 72 km/h

حالت	مدت زمان ترمز کردن (s)	شتاب نگهدارنده (m/s^2)	زمان وقوع f_{dMAX} (s)	k_d
اول	1	20	10	2/6583
دوم	0/8	25	8	3/3708
سوم	0/667	30	6/67	4/3751
چهارم	0/5	40	5	5/9554



ب

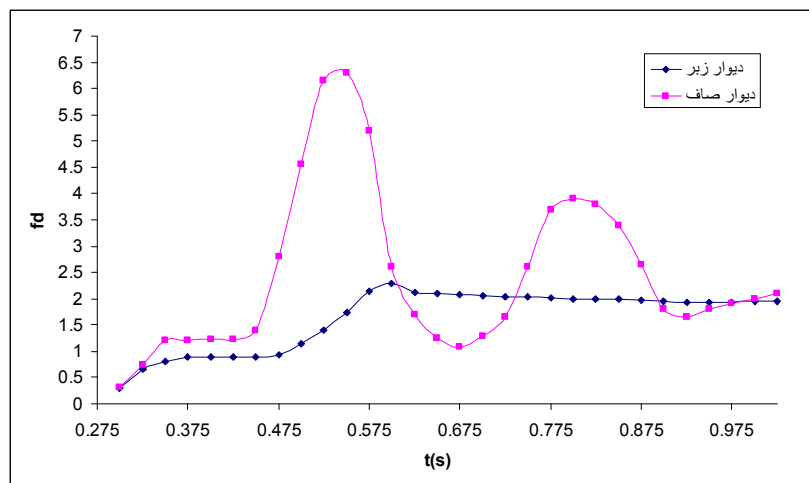


الف

شکل ۶- الف: رابطه نیروی دینامیکی پیشینه با شتاب نگهدارنده ب: رابطه زمان وقوع نیروی دینامیکی پیشینه با شتاب نگهدارنده

۳-۴ تاثیرات اصطکاک دیواره‌ها روی نیروی دینامیکی

اصطکاک یکی از خصوصیت‌های مهم فیزیکی مربوط به مواد می‌باشد. در این تحقیق از ابتدا ضریب اصطکاک ذرات گرانوله‌ای با مقداری برابر با ۰/۳۵ لحاظ گردید. در این قسمت اثر اصطکاک دیواره محفظه حمل توده مواد گرانوله‌ای روی مقدار نیروی دینامیکی وارد بر دیواره جلویی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور دو حالت در نظر گرفته شده است و نمودار تغییرات نیروی دینامیکی بدون بعد نسبت به زمان برای هر دو حالت ترسیم شده است، حالت اول دیواره بدون اصطکاک است و در حالت دوم مقدار ضریب اصطکاک دیواره برابر با ضریب اصطکاک ذرات گرانوله‌ای یعنی برابر با ۰/۳۵ لحاظ شده است.

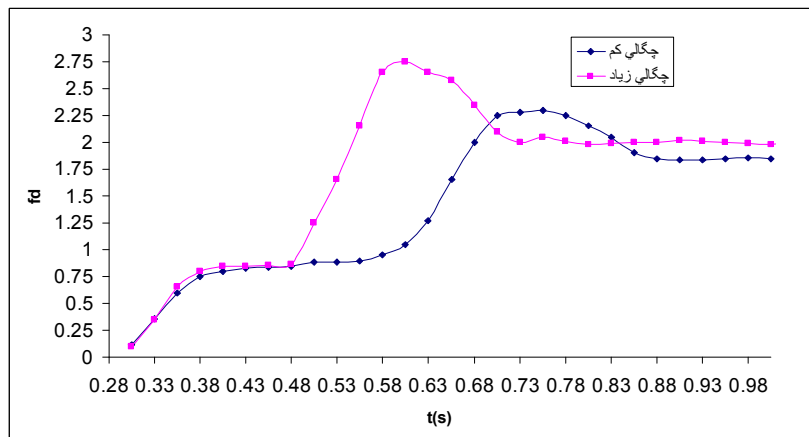


شکل ۷ اثر اصطکاک دیواره‌ها روی نیروی دینامیکی بدون بعد

با توجه به نمودارها چنین به نظر می‌رسد که زمانیکه دیواره‌ها خیلی صاف هستند نیروی دینامیکی بسیار بزرگتر از حالتیست که دیواره‌ها زبر هستند، و نیز میزان نوسانات نهایی نیروی دینامیکی بیشتر می‌باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که اصطکاک دیواره‌ها به مقدار چشمگیری نیروی دینامیکی را کاهش می‌دهد و نوسانات ناشی از صاف بودن دیواره‌ها را کاهش می‌دهد.

۳-۵ تاثیرات چگالی روی نیروی دینامیکی

برای بررسی اثر چگالی جرمی ذرات بر روی نیروی دینامیکی وارد بر دیواره جلویی نتایجی را که تا بحال بدست آمده بودند با نتایج حاصل از دو برابر کردن چگالی جرمی ذرات در قالب نمودار تغییرات نیروی دینامیکی نسبت به زمان، ترسیم گردید. این دو نمودار در شکل ۹ آمده است.



شکل ۸ تاثیرات چگالی جرمی ذرات روی نیروی دینامیکی بدون بعد

مقایسه این دو دسته از نتایج که به صورت نمودار در شکل ۹ دیده می شود، نشان می دهد که منحنی های نیروی دینامیکی در دو حالت شکل یکسانی دارد اما در حالتیکه چگالی دو برابر شده است فاکتور ضربه بزرگتر (در حدود ۱/۲ برابر) و مرحله دوم از سیر تغییرات نیروی دینامیکی نسبت به زمان حدوداً دو برابر کوتاهتر و لی دارای مقدار نسبتاً ثابتی می باشد. بنابراین زمانیکه چگالی بیشتر می شود فاکتور ضربه زودتر اتفاق می افتد.

۳-۶ نتیجه گیری

در این تحقیق از روش المان های مجزا برای شبیه سازی عددی پاسخ دینامیکی توده ای از مواد گرانوله ای که درون یک محفظه مکعبی شکل که می تواند یک جعبه و یا یکی از قسمت های مختلف یک سیستم انتقال باشد، در مقابل ترمز کردن استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده گردید که در حین ترمز کردن نیروی وارد بر دیواره جلویی چهار مرحله مختلف را سپری می کند که نیروهای تماسی بین ذرات و دیواره در برخوردها نقش اساسی را ایفا می کند. نتایج بدست آمده حاکی از این بود که علاوه بر نیروهای استاتیکی موجود روی دیواره های جعبه ای حاوی ذرات گرانوله ای، نیروی دینامیکی ای که روی دیواره ی جلویی وارد می شود در حین ترمز کردن در چهار مرحله خود را نشان می دهد: افزایش در ابتدای ترمز کردن، باقی ماندن در یک مقدار نسبتاً ثابت، سپس افزایش سریع و در نهایت میل کردن به سمت صفر با نوسانات میرا. همچنین مشاهدات نشان داد که در زمان های کوتاهتر ترمز مقدار بیشینه نیروی دینامیکی بیشتر می باشد و نیروی دینامیکی سریع تر به این مقدار می رسد. اثرات اصطکاک دیواره ها و چگالی جرمی روی نیروی دینامیکی وارد بر دیواره ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده می تواند اطلاعات مفیدی را برای تعیین مقاومت شاسی سیستم انتقال فراهم آورد. باید به این نکته اشاره نمود که هرچند مدل المان های مجزا یک بیان ساده شده از مسئله واقعی می باشد اما همین مدل می تواند به عنوان یک روش با دقت بالا برای طراحی سیستم های انتقال مواد گرانوله ای مورد استفاده قرار گیرد. می توان بررسی ها و تحلیل های بیشتری را بر روی توده مواد گرانوله ای که تحت ارتعاش هستند را در این زمینه انجام داد.

مراجع

- 1.S.C. Cowin, M. Satake, 1978. Proceedings of the US/Japan Seminar on Continuum Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials, Gakujutsu Bunken Fukyu-kai, Tokyo.
2. C.S. Chang, A. Misra, T.Y. Liang and M. Babic. 1997. Mechanics of Deformation and Flow of Particulate Materials, American Society of Civil Engineers, New York.



3. B.J. Ennis, J. Green and R. Davis. 1994. Particle Technology p. 32.
4. T.M. Knowlton, J.W. Carson, E. Klinzing and W. C. Yang. 1994. Particle Technology p. 44.
5. R. Bartram, J. Fountain, K. Olsen and D. O'Rourke, 1983. Washington state apple condition at retail, 1982–83. Proceedings of the Washington State Horticultural Society pp. 36–46.
6. J.M. Hill and A.P.S. Selvaduri. 2005 . Mathematics and mechanics of granular materials. Journal of Engineering Mathematics 1–9 © Springer
7. barbosa.carrillo, Ricardo E. 1990 .phd thesis . Discrete elements models for granular materials and rock masses, university of illinoise at urbana champaign, p10
8. E. Tijssens, H. Ramon and J. De Baerdemaeker, 18 September 2003, Discrete element modelling for process simulation in agriculture, Journal of Sound and Vibration Volume 266, Issue 3, Pages 493-514
9. Itasca Consulting Group, Inc. 1999. PFC^{3D}3.00 (Particle Flow Code in 3 Dimensions) manual
10. Xu., Kafui, K.D., Thorenton, C. and Guoping Lian , 2002, Effects of material properties on granular flow in silo using DEM simulation, Particulate science and Technology, Vol.20 No .2, pp 109-24