

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی فرآوری معدن

بررسی پارامترهای مهم تأثیرگذار بر بازدهی عملیات سرندکنی با استفاده از روش اجزای گسسته

نویسنده:

جمال شیخ جامی

استاد راهنما:

دکتر کیومرث سیف پناهی شعبانی

دی ۱۳۹۹

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم که در سختی ها و دشواری های زندگی همواره یاری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و

مطمئن برایم بوده اند.

همسرم عزیزم که سایه مهربانش سایه ساز زندگیم می باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را

برایم تسهیل نمود.

تقدیر و تشکر

پس خدای بزرگ را که مرا یاری رساند تا بتوانم این مقطع تحصیلی را به پایان رسانده و گامی در راستای
اعتمادی علم بردارم. از استاد راهنمای گرانقدرم دکتر سیف پناهی که وجودشان همیشه قوتی برای انجام کارهایم
بوده است و بدون شک انجام این پایان نامه بدون کمک و راهنمایی های ارزنده ایشان امکان پذیر نبوده
است، همچنین از سایر اساتید آقا یان دکتر کار آموزایان، دکتر عزیزمی و دکتر جهانی که شاکردی محضرشان از
بزرگترین افتخارات زندگی علمی ام می باشد، کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب جمال شیخ جامی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی پارامترهای مهم تأثیرگذار بر بازدهی عملیات سرندکنی با استفاده از روش اجزای گسسته تحت راهنمایی دکتر کیومرث سیف پناهی شعبانی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۷

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

در این پژوهش، فرآیند سرد کردن مواد دانه‌ای توسط سرد سه صفحه‌ای ارتعاشی با روش اجزای گسسته شبیه‌سازی شده است. قوانین برخورد و نیروهای بین ذره‌ای ارائه و برای مدل‌سازی نیروی بین ذرات و مرزها، از قانون هرتز-مندلین استفاده شده است. ذرات سرد شده کروی شکل در نظر گرفته شده و روزنه سرد، مربعی و مستطیلی هستند. طی شبیه‌سازی، معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت ذرات کروی بصورت عددی حل شده و رفتار آنها پیش‌بینی می‌شود. نرم‌افزار استفاده شده به صورت متن‌باز تحت سیستم عامل لینوکس بوده، ابعاد هندسی سرد سه صفحه‌ای و پارامترهای فیزیکی خوراک تعیین شدند. بعد از انجام ۹۶ شبیه‌سازی، اثر پارامترهای مختلفی از جمله دامنه ارتعاش، زاویه پنل‌های سرد، خوراک ورودی سرد و شکل روزنه‌ها بر بازده سرد مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مربوطه گزارش شده‌اند. بازده سرد با شکل روزنه مربعی و مستطیلی در دامنه و فرکانس‌های مختلف با هم مقایسه و نتایج به دست آمده با تست‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه کمی و کیفی قرار گرفته و اختلاف نتایج کمتر از ۵ درصد بودند. در دامنه ارتعاش پایین و فرکانس ارتعاش بالا، سرد با شکل روزنه مربعی بازدهی بهتری نسبت به سرد با شکل روزنه مستطیلی داشته ولی با افزایش دامنه ارتعاش، بازدهی سرد با شکل روزنه مستطیلی تا ۱۰ درصد بیشتر از سرد با شکل روزنه مربعی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: روش اجزای گسسته، زاویه پنل سرد، شکل روزنه‌ی سرد، کارایی سرد

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و مرور منابع	۱
۱-۱- کلیات	۲
۲-۱- مروری بر کارهای گذشته	۵
۳-۱- معرفی سرندهای سه صفحه‌ای	۸
۴-۱- معرفی نرم‌افزار لایتز	۱۱
۵-۱- اهداف تحقیق	۱۲
فصل دوم: روش اجزای گسسته (DEM)	۱۳
۱-۲- مقدمه	۱۴
۲-۲- قانون برخورد فنی	۱۵
۳-۲- قانون برخورد فنی-میراگر	۱۶
۴-۲- قانون برخورد اصطکاکی	۱۷
۵-۲- جمع‌بندی	۱۹
فصل سوم: معرفی نرم‌افزار و روش شبیه‌سازی سرنده سه صفحه‌ای	۲۱
۱-۳- مقدمه	۲۲
۲-۳- مراحل انجام شبیه‌سازی	۲۲
۱-۲-۳- انتخاب ابعاد سرنده	۲۳
۲-۲-۳- رسم هندسه سرنده در نرم‌افزار سالی‌دورکس	۲۴
۳-۲-۳- ذخیره هندسه سرنده با فرمت stl	۲۴
۴-۲-۳- تبدیل و مش‌بندی فایل هندسه با استفاده از نرم‌افزار Gmsh	۲۵
۵-۲-۳- آماده‌سازی کدهای ورودی، تعیین مقدار خوراک و مشخصات ذرات	۲۷
۶-۲-۳- تبدیل فایل‌های خروجی نرم‌افزار به فایل‌های vtk با استفاده از دستور دامپ	۲۸
۷-۲-۳- نمایش فایل‌های نهایی با استفاده از نرم‌افزار پاراوو	۲۹
۳-۳- جمع‌بندی	۳۰

فصل چهارم: شبیه‌سازی.....	۳۱
۱-۴- مقدمه.....	۳۲
۲-۴- اعتبارسنجی شبیه‌سازی.....	۳۲
۳-۴- تأثیر شکل روزنه بر بازدهی سردند.....	۴۳
۴-۴- تأثیر زاویه پنل‌ها بر بازدهی سردند.....	۵۴
۵-۴- تأثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند.....	۵۸
۶-۴- تأثیر خوراک ورودی بر بازدهی سردند.....	۶۸
۷-۴- جمع‌بندی.....	۷۲
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۷۳
۱-۵- نتیجه‌گیری.....	۷۴
۲-۵- پیشنهادات.....	۷۶
پیوست ۱: متن کدهای ورودی لایتس برای خوراک ۱.....	۷۸
پیوست ۲: متن کدهای ورودی لایتس برای خوراک ۲.....	۸۰
پیوست ۳: تصاویر شبیه‌سازی سردند در شرایط مختلف.....	۸۳

فهرست تصاویر

- شکل ۱-۲- همپوشانی دو ذره با جرم و شعاع‌های مختلف. ۱۴.....
- شکل ۱-۳- فلوجارت مراحل انجام شبیه‌سازی. ۲۳.....
- شکل ۲-۳- طراحی هندسه سرند با استفاده از سالی‌دورکس. ۲۴.....
- شکل ۳-۳- طراحی هندسه سرند با استفاده از نرم‌افزار سالی‌دورکس. ۲۵.....
- شکل ۴-۳- ذخیره‌سازی طرح اولیه سرند در نرم‌افزار سالی‌دورکس. ۲۶.....
- شکل ۵-۳- محیط کار نرم‌افزار Gmsh. ۲۶.....
- شکل ۶-۳- کدهای ورودی نرم‌افزار لایتز. ۲۷.....
- شکل ۷-۳- تبدیل به فرمت vtk با استفاده از دستور dump و pizza. ۲۹.....
- شکل ۸-۳- محیط کار نرم‌افزار پاراویو جهت نمایش فایل‌های نهایی. ۳۰.....
- شکل ۱-۴- شبیه‌سازی تست ابعاد سرندی بعد از ۸ ثانیه. ۳۴.....
- شکل ۲-۴- نتایج پنل دوم تست ابعاد سرندی آزمایشگاهی. ۳۵.....
- شکل ۳-۴- نتایج پنل اول تست ابعاد سرندی آزمایشگاهی. ۳۵.....
- شکل ۴-۴- نتایج پنل چهارم تست ابعاد سرندی آزمایشگاهی. ۳۶.....
- شکل ۵-۴- نتایج پنل سوم تست ابعاد سرندی آزمایشگاهی. ۳۶.....
- شکل ۶-۴- نتایج پنل ششم تست ابعاد سرندی آزمایشگاهی. ۳۷.....
- شکل ۷-۴- نتایج پنل پنجم تست ابعاد سرندی آزمایشگاهی. ۳۷.....
- شکل ۸-۴- سرند با شکل روزنه مستطیلی. ۴۴.....
- شکل ۹-۴- سرند با شکل روزنه مربعی. ۴۴.....
- شکل ۱۰-۴- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سرند (زاویه پنل اول ۱۸ درجه، خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر). ۴۵.....
- شکل ۱۱-۴- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سرند (زاویه پنل اول ۱۸ درجه، خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر). ۴۵.....
- شکل ۱۲-۴- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سرند (زاویه پنل اول ۱۸ درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر). ۴۶.....
- شکل ۱۳-۴- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سرند (زاویه پنل اول ۱۸ درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر). ۴۷.....

- شکل ۴-۱۴- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سردند (زاویه پنل اول ۲۲درجه، خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۲ میلی متر)..... ۴۸
- شکل ۴-۱۵- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سردند (زاویه پنل اول ۲۲درجه، خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۵ میلی متر)..... ۴۸
- شکل ۴-۱۶- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سردند (زاویه پنل اول ۲۲درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۲ میلی متر)..... ۴۹
- شکل ۴-۱۷- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سردند (زاویه پنل اول ۲۲درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۵ میلی متر)..... ۵۰
- شکل ۴-۱۸- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سردند (زاویه پنل اول ۲۵درجه، خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۲ میلی متر)..... ۵۱
- شکل ۴-۱۹- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سردند (زاویه پنل اول ۲۵درجه، خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۵ میلی متر)..... ۵۱
- شکل ۴-۲۰- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سردند (زاویه پنل اول ۲۵درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۲ میلی متر)..... ۵۲
- شکل ۴-۲۱- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سردند (زاویه پنل اول ۲۵درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۵ میلی متر)..... ۵۳
- شکل ۴-۲۲- تاثیر زاویه پنل‌ها بر بازدهی سردند (خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۲ میلی متر)..... ۵۴
- شکل ۴-۲۳- تاثیر زاویه پنل‌ها بر بازدهی سردند (خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۵ میلی متر)..... ۵۵
- شکل ۴-۲۴- تاثیر زاویه پنل‌ها بر بازدهی سردند (خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۲ میلی متر)..... ۵۶
- شکل ۴-۲۵- تاثیر زاویه پنل‌ها بر بازدهی سردند (خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۵ میلی متر)..... ۵۷
- شکل ۴-۲۶- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۱ و روزنه مربعی)..... ۵۸
- شکل ۴-۲۷- شبیه‌سازی سردند سه صفحه‌ای با شکل روزنه مربعی و دامنه ارتعاش ۵ میلی متر..... ۳۹..... ۵۹
- شکل ۴-۲۸- شبیه‌سازی سردند سه صفحه‌ای با شکل روزنه مربعی و دامنه ارتعاش ۲ میلی متر..... ۴۰..... ۵۹
- شکل ۴-۲۹- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۲ و روزنه مربعی)..... ۶۰
- شکل ۴-۳۰- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۱ و روزنه مستطیلی)..... ۶۱
- شکل ۴-۳۱- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۲ و روزنه مستطیلی)..... ۶۱
- شکل ۴-۳۲- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۱ و روزنه مربعی)..... ۶۲
- شکل ۴-۳۳- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۲ و روزنه مربعی)..... ۶۳
- شکل ۴-۳۴- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۱ و روزنه مستطیلی)..... ۶۳
- شکل ۴-۳۵- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۲ و روزنه مستطیلی)..... ۶۴
- شکل ۴-۳۶- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۲ و روزنه مربعی)..... ۶۵

- شکل ۴-۳۷- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرندهای (خوراک ۱ و روزنه مربعی)..... ۶۵
- شکل ۴-۳۸- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرندهای (خوراک ۱ و روزنه مستطیلی)..... ۶۶
- شکل ۴-۳۹- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرندهای (خوراک ۲ و روزنه مستطیلی)..... ۶۷
- شکل ۴-۴۰- شبیه‌سازی سرندهای سه صفحه‌ای با روزنه مربعی و خوراک ورودی ۲..... ۶۹
- شکل ۴-۴۱- شبیه‌سازی سرندهای سه صفحه‌ای با روزنه مربعی و خوراک ورودی ۱..... ۶۹
- شکل ۴-۴۲- تاثیر خوراک ورودی بر بازدهی سرندهای دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر و روزنه مربعی..... ۷۰
- شکل ۴-۴۳- تاثیر خوراک ورودی بر بازدهی سرندهای دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر و روزنه مربعی..... ۷۰
- شکل ۴-۴۴- تاثیر خوراک ورودی بر بازدهی سرندهای دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر و روزنه مستطیلی..... ۷۱
- شکل ۴-۴۵- تاثیر خوراک ورودی بر بازدهی سرندهای دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر و روزنه مستطیلی..... ۷۲
- پیوست ۳ شکل ۱- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۱۸-۲۲-۲۵ درجه..... ۸۳
- پیوست ۳ شکل ۲- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۱۸-۲۲-۱۸ درجه..... ۸۳
- پیوست ۳ شکل ۳- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۱۸-۲۵-۲۲ درجه..... ۸۴
- پیوست ۳ شکل ۴- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۱۸-۲۵-۱۸ درجه..... ۸۴
- پیوست ۳ شکل ۵- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۲-۱۸-۲۵ درجه..... ۸۴
- پیوست ۳ شکل ۶- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۲-۱۸-۲۲ درجه..... ۸۴
- پیوست ۳ شکل ۷- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۲-۲۵-۲۲ درجه..... ۸۴
- پیوست ۳ شکل ۸- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۱۸-۲۵-۲۲ درجه..... ۸۴
- پیوست ۳ شکل ۹- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۵-۱۸-۲۵ درجه..... ۸۴
- پیوست ۳ شکل ۱۰- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۲-۱۸-۲۵ درجه..... ۸۴
- پیوست ۳ شکل ۱۱- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۵-۲۲-۲۵ درجه..... ۸۴
- پیوست ۳ شکل ۱۲- شبیه‌سازی سرندهای با روزنه مربعی و زوایای پنل ۱۸-۲۲-۲۵ درجه..... ۸۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۳-۱- مشخصات پنل‌های سرندهای..... ۲۳
- جدول ۳-۲- مشخصات ذرات و پارامترهای ارتعاشی سرندهای..... ۲۸
- جدول ۴-۱- مشخصات گلوله‌ها و سرندهای مورد استفاده در تست ابعاد سرندهای..... ۳۳
- جدول ۴-۲- نتایج شبیه‌سازی تست ابعاد سرندهای بعد از ۱۰ ثانیه..... ۳۳
- جدول ۴-۳- نتایج آزمایشگاهی تست ابعاد سرندهای بعد از ۱۰ ثانیه..... ۳۴

- جدول ۴-۴- مقایسه نتایج تست ابعاد سرندی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی..... ۳۸
- جدول ۴-۵- پارامترهای استفاده‌شده در شبیه‌سازی و تأثیرات آن‌ها بر بازدهی سرند..... ۳۹
- جدول ۴-۶- شکل و ابعاد روزنه سرند..... ۴۳
- جدول ۴-۷- مشخصات خوراک استفاده‌شده در شبیه‌سازی..... ۶۸

فصل اول : مقدمه و مرور منابع

۱-۱- کلیات

یکی از بزرگترین مشکلات فرآوری مواد معدنی تولید ذرات نرمه^۱ است. بهترین راه برای جلوگیری از آسیب‌های ذرات نرمه به خط فرآوری جداسازی این ذرات توسط سرندها در ابتدای خط فرآوری می‌باشد. سرندهایی به طور عمده در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ برای مثال در یک واحد عملیاتی بزرگ مقیاس برای جداسازی ذرات و در مقیاس کوچک مانند آزمایشگاه جهت تعیین توزیع اندازه ذرات استفاده می‌شود. تجهیزات فرآوری مواد معدنی با توزیع اندازه ذرات کم، عملکرد بهتری دارند بنابراین در بسیاری موارد خوراک ورودی جهت تعیین حد جدایش قبل از هر عملیات فرآوری دیگر، تحت کنترل قرار می‌گیرد. از بین روش‌های دانه‌بندی موجود، سرندهایی گسترده‌ترین روش مورد استفاده است. فاکتورهای زیادی بر عملیات سرندهایی تأثیر می‌گذراند، فاکتورهایی مانند: سرعت ورودی خوراک، فرکانس، دامنه و زاویه ارتعاش سرندها، ابعاد و شکل روزنه‌های سرندها، طول سرندها، شکل ذرات ورودی به سرندها، سرعت حرکت ذرات روی سرندها و نوع حرکت لرزشی سرندها. در این پژوهش تأثیر پارامترهای مختلف بر عملیات سرندهایی و تأثیر متقابل این پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. سرندهای چند صفحه‌ای با شیب متغییر، به طور گسترده برای فعالیت‌هایی با تناژ بالا که در آن ظرفیت و کارایی مهم هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرندهای سه صفحه‌ای بیشتر به صورت سه و پنج صفحه‌ای با شیب متفاوت طراحی می‌شوند.

در دهه ۱۹۸۰ مانع اصلی در حل معادلات این بود که تنها تعداد اندکی از ذرات توسط کامپیوترهای آن دوره می‌توانستند مورد بررسی قرار گیرند. از سوی دیگر محاسبات بسیار زمان‌بر بودند به سبب آن که ماتریس بیان‌کننده سختی‌های برخورد ذرات پس از ایجاد یا شکسته شدن برخورد باید از نو فرمول‌بندی می‌شد (Cundall and Strack, 1979). اما امروزه با ظهور ابررایانه‌ها این مانع به طور کامل از بین رفته است، به طوری که کامپیوترهای امروزی قادرند تا میلیاردها ذره را شبیه‌سازی کنند. روش اجزای گسسته روشی

مناسب برای مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی جریان ذرات در این واحدها است. با استفاده از این روش، شبیه‌سازی واحدهای فرآوری مواد معدنی بویژه واحدهای خردایش و طبقه بندی امکان پذیر است. با استفاده از این روش، پیش‌بینی الگوی حرکت ذرات، مقدار توان مصرفی، و انرژی جنبشی آسیاهای آزمایشگاهی و صنعتی مانند آسیاهای گلوله‌ای و نیمه‌خودشکن، و نیز بررسی عملکرد سرندهای آزمایشگاهی و صنعتی و شبیه‌سازی عملیات سردکنی آن‌ها امکان پذیر است (Jahani et al., 2015).

نرم‌افزارهای تخصصی در زمینه روش اجزای گسسته به دو صورت وجود دارند: دسته اول نرم‌افزارهای تجاری هستند که در انحصار کشورهایی مانند ایالات متحده، آلمان، فرانسه، استرالیا، کانادا، انگلستان، هلند، سوئیس و اسپانیا هستند و هزینه اجاره و تهیه آن‌ها بسیار قابل توجه است. دسته دوم نرم‌افزارهای متن‌باز هستند که به صورت آزادانه و رایگان در دسترس هستند، با وجود این، نرم‌افزارهای «متن‌باز» دارای این اشکال هستند که تقریباً بیشتر آن‌ها تنها با سیستم عامل لینوکس اجرا می‌شوند. همچنین مشکل دیگر این نرم‌افزارها موضوع کامپایل کردن آن‌ها به گونه ای است که توانایی انجام شبیه‌سازی مورد نظر کاربر را داشته باشند. از آن جایی که تمام نرم‌افزارهای «متن‌باز» به صورت کدهای منبع هستند، کامپایل کردن این کدها و ساختن پرونده اجرایی از آن‌ها بسیار دشوار است و از سوی دیگر انجام این کار معمولاً تنها در سیستم عامل‌های مبتنی بر لینوکس امکان پذیر است.

در ایران، تنها نرم‌افزار تخصصی که در فرآوری مواد معدنی برای انجام شبیه‌سازی به روش اجزای گسسته وجود دارد، نرم‌افزار تجاری PFC3D (کد جریان ذرات در سه بعد) است که متعلق به شرکت Itasca است، که تهیه نسخه‌های جدید آن به دلایل مختلف و بویژه هزینه‌های بالا امکان پذیر نیست و اغلب تهیه آن برای افراد معمولی امکان‌پذیر نیست. از این رو در این تحقیق، تلاش بر آن است که یک جایگزین مناسب برای نرم‌افزار PFC3D معرفی شود که تهیه آن برای همگان امکان پذیر باشد و همچنین قابلیت رقابت با نرم‌افزارهای پیشرفته تجاری را داشته باشد. نرم‌افزار انتخاب شده که LIGGGHTS (لایتر) نام دارد، یک بسته نرم‌افزاری کاملاً جدید و قدرتمند در زمینه شبیه‌سازی به روش راگ است (که به صورت متن‌باز است) و در سیستم

عامل لینوکس قابل اجراست. از مزایای دیگر نرم‌افزارهای متن‌باز و از جمله نرم‌افزار لایتز می‌توان به روزآمدسازی سریع این نرم‌افزارها اشاره کرد. به عبارت دیگر هر بار که نسخه جدیدی از این نرم‌افزارها عرضه می‌شود، می‌توان نرم‌افزار مورد نظر را مجدداً کامپایل کرد و قابلیت‌های جدید را به آن افزود. در نتیجه همواره آخرین نسخه این نرم‌افزارها در دسترس خواهد بود.

از آنجایی که واحد آسیاکنی به دلیل سهولت انجام شبیه‌سازی به وفور توسط محققان در سراسر دنیا به وسیله روش اجزای گسسته شبیه‌سازی شده است اما واحد سردکنی به علت زمان‌بر بودن شبیه‌سازی‌ها (به خاطر وجود روزنه‌های فراوان در سردند) کمتر از واحد مذکور مورد توجه محققان قرار گرفته است، روش اجزای گسسته^۱ روشی ایده‌آل برای مدل‌سازی عددی رفتار ذرات در فضای دوبعدی و سه‌بعدی است. روش اجزای گسسته مبتنی بر حرکت و اندرکنش ذرات می‌باشد از این روش می‌توان برای مدل‌سازی عددی رفتار سیستم‌های مکانیکی با ذرات زیاد، استفاده کرد. ذرات که به صورت طیفی از مقیاس میکرو تا ذرات درشت سنگی در بر می‌گیرند، به صورت اجسام صلب نشان داده می‌شوند. با استفاده از این روش می‌توان حرکت ذرات روی سردند را شبیه‌سازی نمود. همچنین مختصات ذرات، زاویه برخورد و سرعت ذرات روی سردند را می‌توان بررسی کرد. به دلیل استفاده از خروجی نرم‌افزارهای ترسیم هندسه مانند سالیدورکس^۲ و کاتیا^۳ به عنوان ورودی نرم‌افزارهای DEM می‌توان هندسه واقعی سردند و نیز تمام اجزای فیزیکی آن از جمله شکل روزنه‌ها و زاویه صفحه‌ها نسبت به یکدیگر را ترسیم کرد. از این‌رو در این تحقیق تأثیر پارامترهای ارتعاشی، زاویه‌ی پنل‌ها و شکل روزنه‌های سردند به منظور بهبود کارایی سردند سه صفحه‌ای سه صفحه‌ای به روش اجزای گسسته مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این پژوهش واحد سردکنی به عنوان واحد فرآوری جهت انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب شد. پس از انتخاب واحد سردکنی برای انجام شبیه‌سازی‌ها، از بین انواع سردنها،

1- Discrete Element Method
2- SOLIDWORKS
3- CATIA

سرندهای سه صفحه‌ای شکل آزمایشگاهی به دلیل جدید بودن و اهمیت و کاربرد آن‌ها در فرآوری زغال سنگ و کانسنگ آهن به عنوان واحد فرآوری مواد معدنی مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب شدند. به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها و نرم‌افزار لایتز از تست ابعاد سرندهای آزمایشگاهی استفاده شد.

۱-۲- مروری بر کارهای گذشته

شبیه‌سازی به ابزاری رایج در طراحی و بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی تبدیل شده است (Cleary, 2009; Cleary et al., 2008; 2004). مدل‌سازی‌های بسیاری برای بهبود کارایی سرندهای ارتعاشی در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی انجام شده است. این مدل‌ها به منظور بهینه‌سازی پارامترهایی مانند: فرکانس و دامنه ارتعاش، زاویه صفحه‌ها و شکل روزنه‌های سرندهای مورد بررسی قرار گرفته است (Yan-Hua and Xin., 2009). افزایش کارایی سرندها باعث کاهش نرمه ورودی به مدار فرآوری، کاهش انرژی مصرفی به منظور آسیاب کردن مجدد ذرات نرمه و همچنین مانع ایجاد مشکلات مربوط به ذرات نرمه در مدار فلوتاسیون می‌شود. روش اجزای گسسته یک ابزار عددی پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی سیستم با تعداد ذرات زیاد است. DEM براساس روش لاگرانژ^۱ است یعنی رفتار مواد دانه‌ای به عنوان مجموعه‌ای از ذرات مجزاست که هرکدام به وسیله قوانین فیزیکی کنترل می‌شوند. هر ذره با ذرات مجاور خود از طریق تماس ذره به ذره در ارتباط است و می‌تواند در هر زمان تشکیل یا شکسته شود (Yanhua and Xin., 2010). لالا و همکاران با بررسی تأثیرات دامنه‌ی لرزش، شاخص پرتاب و زاویه سرندها به این نتیجه رسیدند که بیشترین کارایی سرندها زمانی است که مقادیر این پارامترها به ترتیب ۳-۳/۵ میلی‌متر، ۲/۷ و ۱۵ درجه باشد (Lala et al., 2011). همچنین تأثیر متقابل طول سرندها و پارامترهای ارتعاشی سرندها از جمله فرکانس ارتعاش، دامنه ارتعاش، زاویه لرزش و شیب سرندها با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی توسط گیوفنگ و ژین مورد بررسی قرار گرفت

1- Lagrange

(Guifeng and Xin., 2011). استفاده از DEM در شبیه‌سازی فرآیند واقعی سرنده‌کنی مواد دانه ریز توسط دلانی و همکاران نشانگر شباهت مدل و آزمایش در نرخ پایین خوراک و اختلاف بسیار زیاد مدل و آزمایش در نرخ خوراک بالا داشت (Delaney et al., 2012). روش اجزای گسسته به خاطر مزایای ذاتی‌اش در تحلیل رفتار مواد دانه‌ای، به سرعت در دهه‌های اخیر توسعه یافته است و به طور وسیعی در رشته‌های مهندسی معدن، عمران و مکانیک مورد استفاده قرار گرفته است (Krugger-Emden et al., 2008; Chen et al., 2012; Zhang et al., 2013). شبیه‌سازی جریان ذرات در سرنده موزی تک صفحه‌ای با استفاده از DEM توسط کوشنگ و همکاران انجام و ویژگی‌های حرکتی و مکانیزم‌های نفوذ ذرات روی صفحه سرنده بررسی شده است (Chusheng et al., 2013). هر یک از ذرات با همسایه‌هایش از طریق برخوردهای ذره به ذره‌ای که می‌توانند در هر گام زمانی تشکیل یا شکسته شوند، اندرکنش می‌کند (Ting et al., 1993; Cleary and Sawley, 2002; Raji and Favier, 2004; Balevičius et al., 2006; Shmulevich, 2010; Tancredi et al., 2012). به خاطر استفاده از یک طرح گام برداری زمانی صریح، گام زمانی در روش اجزای گسسته آنقدر کوچک انتخاب می‌شود که در طی یک گام زمانی آشفتگی‌های حاصل از هر ذره نمی‌توانند به بیشتر از همسایگان بلافاصله تکثیر شوند. در هر گام زمانی متوالی، نیروهای برآیند روی هر ذره به طور انحصاری به وسیله اندرکنش آن با ذرات مجاورش تعیین می‌شوند. سادگی الگوریتم روش اجزای گسسته است که مدل کردن اندرکنش‌های غیر خطی پیچیده را درون مجموعه‌ای که تعداد زیادی از ذرات را بدون لوازم حافظه‌ای اضافی یا نیاز به یک روال تکراری در بر می‌گیرد، امکان‌پذیر می‌سازد (Lu et al., 2008). رویکرد اجزای گسسته به طور ویژه سودمند است از آنجایی که پیش‌بینی‌ها می‌توانند به آسانی از روی داده‌های شبیه‌سازی انجام شوند که به دست آوردن آن‌ها به طور تجربی دشوار و احتمالاً گران، خواهد بود. نقطه قوت دیگر مدل‌سازی اجزای گسسته سهولت انجام مطالعات پارامتری برای مطالعه کردن اثرات خواص ذرات، شرایط فرآیند یا طراحی تجهیزات است. بعلاوه، از آنجایی که راگ یک رویکرد گسسته است، ذرات می‌توانند توزیعی از خواص داشته باشند. بنابراین ذرات درون سیستم می‌توانند برای مثال توزیعی از اندازه‌ها داشته باشند یا حتی می‌توانند خواص مواد متغییر برای مدل

کردن ترکیبی از مؤلفه‌های گوناگون داشته باشند (Ketterhagen et al., 2009). در سال‌های اخیر، افزایش شدید در توان محاسباتی قابل دسترس این امکان را به شبیه‌سازی‌های اجزای گسسته داده است که به ابزاری چند منظوره برای کاربردهای صنعتی تبدیل شوند (Cleary, 2009b).

پیشرفت‌های اخیر در مدل‌سازی اجزای گسسته منجر شده است به اینکه این روش تبدیل به ابزار شبیه‌سازی مفیدی شود زیرا می‌تواند اطلاعات را که به آسانی در طی آزمایش‌ها اندازه‌گیری نمی‌شوند در اختیار قرار دهد (Cleary and Sinnott, 2008). با بلوغ شبیه‌سازی اجزای گسسته، اکنون اجرا کردن شبیه‌سازی‌هایی با میلیون‌ها ذره با شکل‌های پیچیده و نیروهای چسبنده بین ذرات در زمان‌های قابل تحمل در پردازنده‌های تک (کامپیوترهای رومیزی) دارد ممکن می‌شود (Cleary and Sinnott, 2008; Cleary, 2004, 2009b, 2010). شبیه‌سازی سرندهای ارتعاشی با استفاده از DEM توسط لی و همکاران انجام شده است و عملکرد جریان ذرات پیچیده و کارایی سرندهای ارتعاشی خطی مورد بررسی قرار گرفته است (Li et al., 2015). سرندهای موزی با استفاده از نرم‌افزار لایترا^۱ و روش DEM توسط جهانی و همکاران شبیه‌سازی شد و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است (Jahani et al., 2016). جعفری و سلجوقی‌نژاد تأثیر نیروی تماس بین ذرات بر کارایی سرندهای سایش و سایش مش با استفاده از DEM مورد اندازه‌گیری قرار داده‌اند (Jafari and Saljooghi-Nezhad., 2016). تأثیرات ترکیبی پارامترهای لرزشی بر فرآیند سرندهای ارتعاشی دایره‌ای با استفاده از DEM و طراحی آزمایش متعامد تاگوچی^۲ توسط ژائو و همکاران بررسی شده است (Zhao et al., 2017). داودی و همکاران مقاومت و خاصیت ارتجاعی مواد به منظور بررسی چگونگی تغییر روزه در مواد مختلف با استفاده از DEM بررسی و همچنین شکل روزه و شکل ذرات بر کارایی سرندهای تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند (Davoodi et al., 2019).

1- LIGGGHTS

2- Taguchi Orthogonal Experimental Design

امروزه یکی از ابزارهای رایج در طراحی و بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی به ویژه خطوط فرآوری مواد معدنی شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های عددی می‌باشد (Cleary et al., 2008). پیشرفت کامپیوترها منجر به افزایش قدرت محاسباتی و در نتیجه پیاده‌سازی روش‌های عددی پیشرفته‌ای شده است که می‌تواند رفتار هر ذره را به صورت جداگانه بررسی و ثبت نماید (Kozicki and Donzé., 2009). نخستین بار روش اجزای گسسته را برای تحلیل مکانیک سنگ پیشنهاد دادند (Tavarez and Plesha., 2007). مدل هرترز، رایج‌ترین مدل برای اندرکنش‌های ذرات در روش اجزای گسسته می‌باشد (Li et al., 2011). در این شبیه‌سازی، به دلیل افزایش تعداد ذرات، بیشتر ذرات به صورت کروی در نظر گرفته می‌شود. استفاده از ذرات غیرکروی به دلیل پیچیده‌تر بودن هندسه و نیروهای اندرکنشی کاربرد کمتری دارد (Nassauer and Kuna., 2013).

۱-۳- معرفی سرندهای سه صفحه‌ای

سرندهای سه صفحه‌ای، نوعی سرندهای ارتعاشی دارای پنل‌هایی با شیب‌های متفاوت است. متغییر بودن شیب پنل‌ها منجر به افزایش ظرفیت سرندهای سه صفحه‌ای صنعتی بیشتر دارای سه و پنج پنل هستند که به صورت یک تا سه طبقه تعبیه می‌شوند. از سرندهای سه صفحه‌ای دوطبقه صنعتی اغلب برای جداسازی کانسنگ‌های آهن، زغال‌سنگ در ظرفیت‌های بالا استفاده می‌شود (Fernandez et al., 2011). شیب پنل‌های این سرندها را با توجه به نرخ بار ورودی می‌توان تغییر داد.

سرندهای سه صفحه‌ای آزمایشگاهی یک سرندهای ارتعاشی به طور ویژه طراحی شده است که در آن زاویه پنل‌های سرندها به منظور حفظ کردن یک ضخامت بستر ثابت تغییر می‌کنند. این امر معمولاً به وسیله ترکیبی از چند پنل که زوایای شیب مختلفی دارند محقق می‌شود (Dong et al., 2009). این نوع از سرندها گزارش شده است که قادر است ظرفیت را در فرآوری کانسنگ دو برابر کند (Dong et al., 2009). نحوه کنترل و بهینه‌سازی این نوع جدید سرندها برای مناسب بودن برای شرایط گوناگون موضوع مهمی برای کاربردهایش است، که مستلزم درک اساسی این فرآیند سرندها (پیوسته) است (Dong et al., 2009). سرندهای موزی

شکل دو طبقه صنعتی اغلب برای جدایش ظرفیت بالای کانسنگ آهن، زغال سنگ و سنگ دانه‌ها به فراکسیون‌های^۱ اندازه مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند (Fernandez et al., 2011). این سرندها تعداد زیادی پارامتر قابل تنظیم دارند و شناخت بسیار کمتری نسبت به سرندهای ارتعاشی مسطح مرسوم در مورد آنها وجود دارد (Cleary et al., 2009a). آنها از یک یا تعداد بیشتری طبقه منحنی شکل تشکیل می‌شوند که با پنل‌های سردی با آرایه‌هایی از سوراخ‌های مربع یا مستطیل شکل ساخته می‌شوند (Fernandez et al., 2011). ساختار سرد معمولاً با بسامد حدود ۱۵ هرتز مرتعش می‌شود. جریان متراکمی از ذرات روی انتهای بالایی سرد بارگذاری می‌شود. ذرات به طرف پایین پنل‌های اولیه شیب‌دارتر سرد شتاب می‌گیرند و همانطور که زاویه پنل‌ها به سمت انتهای تخلیه کاهش می‌یابد از شتاب ذرات کاسته می‌شود. موادی که از بالای این طبقه تخلیه می‌شوند روسردی هستند و ممکن است محصول دانه درشت شوند یا سنگ‌شکنی شوند و مجدداً به خوراک سرد بازگردانده شوند (Cleary et al., 2009a). مواد با اندازه ذرات کمتر از روزه طبقه فوقانی می‌توانند از میان این طبقه به طبقه پایین تر سقوط کنند. در طبقه پایین تر این مواد برای برگرداندن جریان محصول از طریق شوت خروجی تحت جدایش بیشتر قرار می‌گیرند درحالی‌که مواد زیر سردی به ته‌ریز منتقل می‌شوند. سرندهای (صنعتی) اغلب برای بستن مدارهای خردایش و برگرداندن فراکسیون‌های اندازه ویژه از سنگ به مقصدهای گوناگون مانند آسیاهای قلوه‌سنگی و سنگ‌شکن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌گیری از همه سرندهای چند طبقه به خاطر محصولات میانی دشوار است. نمونه‌گیری از سرندهای موزی شکل به سبب آنکه اندازه جدایش سرد با شیب طبقه تغییر می‌کند دشوارتر است (Fernandez et al., 2011). به منظور شناخت فرآیند سردکنی پیچیده مستلزم این است که مطالعات در مقیاس ذره انجام شوند. درحالی‌که تحقق بخشیدن به این امر با تکنیک‌های تجربی موجود اغلب دشوار است، شبیه‌سازی عددی بر اساس روش اجزای گسسته (Cundall and Strack, 1979) شیوه مؤثری برای انجام

1- Fraction

دادن چنین مطالعاتی است. تحقیقات اولیه در این زمینه به فرآیندهای ساده محدود می‌شود (Cleary and Sawley, 2002; Li et al., 2002, 2003; Cleary, 2004). کلیری و ساولی یک مدل سه بعدی از جدایش ذرات کروی روی بخش متناوب یک سرند مسطح شیب دار ارائه کردند (Cleary and Sawley, 2002). کلیری مقایسه‌ای از عملکرد جدایش مختلف به دست آمده با استفاده از ذرات کروی و غیرکروی روی سرند یکسان ارائه کرد (Cleary, 2009b). لی و همکاران مدل‌سازی اجزای گسسته سرندهای غیرمتناوب را اجرا کردند، تعداد اندکی از ذرات مدور با تغییر اندازه محدود یا اندک، محدود می‌شدند (Li et al. 2003). با توجه به تحقیقات، برخی از مدل‌های کلی وجود دارند که برای فرآیندهای سرندکنی پیچیده که در صنعت استفاده می‌شوند، قابل کاربرد هستند (Shimosaka et al., 2000; Soldinger, 2000, 2002; Yoshida et al., 2013). تأثیر حالت ارتعاش بر فرآیند سرندکنی مورد مطالعه قرار گرفت (Dong et al., a 2013). اثرات متغیرهایی مانند زاویه شیب، بسامد و دامنه ارتعاش کننده را بر جریان ذرات و رفتار سرندکنی یک سرند مرتعش با رفرنس ویژه به بازدهی سرند و توزیع نرخ‌های عبورکننده برای ذرات با اندازه‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت (Dong et al., b 2013). جریان ذرات و رفتار سرندکنی ترکیبی از سرندهای منحنی و مسطح را مورد مطالعه قرار گرفت (Dong and Yu., 2012). همچنین تلاش‌هایی برای استفاده از روش اجزای گسسته برای استخراج کردن مدل‌های فرآیند انجام داده‌اند (Elskamp and Kruggel-Emden., 2014; Yoshida et al., 2013). مقایسه مفصلی از بازدهی جدایش پیش‌بینی شده از روش اجزای گسسته با استفاده از ذرات کروی با آزمایش‌های دقیق و به خوبی توصیف شده در یک سرند ارتعاشی مقیاس آزمایشگاهی افقی مسطح برای طیفی از نرخ‌های جریان (یا عمق‌های بستر) انجام داده‌اند (Delaney et al., 2012). شبیه‌سازی انجام شده ذرات با شکل‌های پیچیده مدل شد (Kruggel-Emden and Elskamp., 2014).

تحلیل اجزای گسسته گسترده عملکرد یک سرند موزی دو طبقه جداکننده کانسنگ آهن مقیاس صنعتی کامل را با استفاده از ذرات فوق مربعی شکل اجرا کردند (Cleary et al., 2009 a,b). آن‌ها انتقال و جدایش ذرات روی هر طبقه و شناسایی سهم‌های خاص هر پنل برای طیفی از شتاب‌های حداکثر را تحلیل

کردند. آن‌ها همچنین مصرف توان، تجزیه ذرات و فرسودگی سرند را تحلیل کردند (Cleary et al., 2009). همزمان یک مطالعه عددی از جریان ذرات را روی یک سرند موزی به صورت تابعی از پارامترهای ارتعاش شامل بسامد، دامنه، و نوع حرکت ارتعاشی ارائه کرده است (Dong et al., 2009). از روش اجزای گسسته برای ارزیابی کردن اثر ارتعاش طبقه و سرعت ذرات روی جدایش سرند موزی آزمایشگاهی یک طبقه استفاده شد (Dong et al., 2009). آن‌ها از ذرات کروی استفاده کردند و منفذهای شبکه‌ای به صورت روزنه‌های طویل به جای داشتن منفذهای مربعی یا مستطیلی نشان داده شدند (Dong et al., 2009). همچنین انواع سه پنبلی و پنج پنبلی را برای این پیکربندی بررسی کردند (Dong et al., 2009). اخیراً با استفاده از روش اجزای گسسته جریان ذرات را روی یک سرند موزی یک طبقه شبیه‌سازی شده است (Liu et al., 2013). همچنین ویژگی‌های حرکت و مکانیزم‌های نفوذکننده ذرات را روی طبقه سرند مطالعه کردند و اثرات پارامترهای هندسی طبقه سرند را روی فرآیند سرندکنی بررسی کردند (Liu et al., 2013).

۱-۴- معرفی نرم‌افزار لایتز^۱

یکی از نرم‌افزارهایی که برای مدل سازی و شبیه‌سازی ذرات به وسیله روش اجزای گسسته مورد استفاده قرار می‌گیرد، نرم‌افزار لایتز می‌باشد. لایتز نسخه به روز و توسعه یافته لمپس^۲ است (Goni et al., 2012). لمپس یک مجموعه دینامیک مولکولی کلاسیک متن‌باز^۳ برای شبیه‌سازی دینامیک اتم‌های در حال اندرکنش است. همچنین لمپس ذرات دانه درشت و پتانسیل‌های اندرکنش را بررسی و اندازه‌گیری می‌کند، همچنین قادر به مدل‌سازی و شبیه‌سازی ذرات در مقیاس ریز نیز می‌باشد (FrantzDale et al., 2011). کدهای متن‌باز یک جایگزین کارآمد را برای نرم‌افزارهای تجاری موجود ارائه می‌کنند (Kloss and Goniva., 2011). کدهای متن‌باز نرم‌افزارهایی که دارای لایسنس^۴ غیرقابل دسترس به صورت رایگان هستند را بوسیله یک تیم از توسعه

1- LIGGGHTS
2- LAMMPS
3- Open Source
4- License

دهندگان نرم‌افزار برای کاربران ایجاد می‌کنند. یکی از مزایای کدهای متن‌باز، رایگان و دردسترس بودن آنها می‌باشد (Plimpton and Gale, 2013).

۱-۵- اهداف تحقیق

اهداف اصلی انجام این تحقیق عبارتند از:

- ✓ مطالعه موضوع،
- ✓ آشنایی با روش اجزای گسسته و یادگیری نرم‌افزار لایتز،
- ✓ انتخاب مشخصات و ابعاد یک سرند مقیاس آزمایشگاهی،
- ✓ طراحی هندسه سرند با استفاده از نرم‌افزار سالی‌دورکس،
- ✓ شبیه‌سازی حرکت ذرات روی سرند، بهبود عملکرد سرند با تغییر پارامترهای مختلف و یافتن مقادیر بهینه،
- ✓ اعتبارسنجی شبیه‌سازی،
- ✓ تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده.

فصل دوم: روش اجزای گسته (DEM)

۱-۲- مقدمه

روش اجزای گسسته یک مدل عددی با توانایی تحلیل رفتار مکانیکی گروه از ذرات است. این روش بر اساس استفاده از یک رویه عددی صریح است که اثر متقابل بین ذرات از طریق تماس و حرکت ذرات را ذره به ذره (شکل ۱-۲) بررسی می‌کند. توانایی مدل DEM این اجازه را به کاربر می‌دهد تا حرکت ذرات را به صورت جرم نقطه‌ای در حال حرکت در نظر بگیرد که شکل و حجم ذرات را شامل می‌شود (Dong et al., 2009). با استفاده از قانون دوم نیوتون، معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت ذرات به صورت معادلات (۱-۲) و (۲-۲) می‌باشند (Jahani et al., 2016).

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_{drag} + \vec{F}_{pressure} + \vec{F}_{virtual_mass} + \vec{F}_{gravitation} + \vec{F}_{other} \quad (1-2)$$

\vec{F}_{drag} : نیروی پسا یا نیروی مقاومت شاره

$\vec{F}_{pressure}$: نیروی فشار

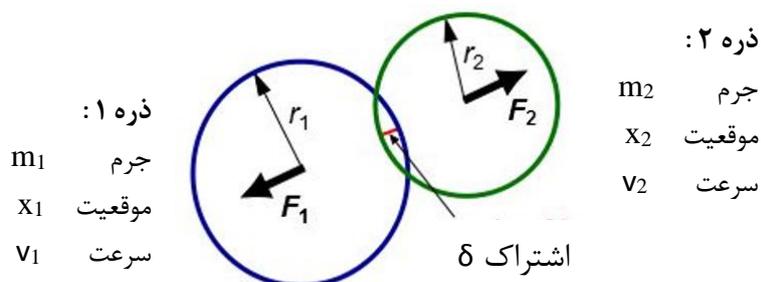
$\vec{F}_{virtual_mass}$: نیروی جرم افزوده

$\vec{F}_{gravitation}$: نیروی گرانش

\vec{F}_{other} : سایر نیروها

$$\frac{dx}{dt} = \vec{v} \quad (2-2)$$

پایه‌سازی روش DEM بر اساس نیروهایی است که در اثر برخورد ذرات ایجاد می‌شود. نیروهای ایجاد شده بر اثر برخورد ذرات (شکل ۱-۲) و بر اساس تغییر شکل ذرات تعریف می‌شود که با اندازه‌گیری همپوشانی



شکل ۱-۲- همپوشانی دو ذره با جرم و شعاع‌های مختلف.

بین جفت کره‌ها (شکل ۱-۲) یا بین کره و دیواره بدست می‌آید. از معادله (۱-۲) انتگرال‌گیری در طول زمان می‌شود تا بر هم‌کنش ذرات بدست آید (Jahani et al., 2016).

اندازه ثابت فنر نیروی تماسی نرمال برای برخورد یک جفت ذره از معادله (۳-۲) به دست می‌آید:

$$k = \frac{\pi v^2}{3\epsilon_D^2} = D\rho \quad (3-2)$$

در رابطه (۳-۲)، k ثابت فنر، D قطر ذره (ρ نماینده مجموعه ذرات)، چگالی ذره، v سرعت نسبی بین دو ذره برخوردکننده و ϵ_D نسبت قطر برای همپوشانی مجاز است. زمان برخورد از رابطه (۴-۲) بدست می‌آید.

$$t = \pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4-2)$$

در این پژوهش سه قانون برخورد بررسی خواهد شد که عبارتند از:

- ✓ قانون برخورد فنری،
- ✓ قانون برخورد فنر-دمپری،
- ✓ قانون برخورد اصطکاکی.

۲-۲- قانون برخورد فنری^۱

برای قانون برخورد فنر خطی، \vec{e}_{12} بردار واحد از ذره ۱ به ذره ۲ به صورت رابطه (۵-۲) تعریف می‌شود:

$$\vec{e}_{12} = (x_2 - x_1) \div |x_2 - x_1| \quad (5-2)$$

در رابطه (۵-۲) به ترتیب x_1 و x_2 مکان ذرات ۱ و ۲ است. همپوشانی δ که در حین برخورد کمتر از

صفر است به صورت رابطه (۶-۲) تعریف می‌شود (Jahani et al., 2016).

$$\delta = |x_2 - x_1| - (r_1 - r_2) \quad (6-2)$$

که r_1 و r_2 به ترتیب شعاع ذرات ۱ و ۲ هستند. نیرویی که به ذره ۱ وارد می‌شود از رابطه (۷-۲) محاسبه می‌شود (Jahani et al., 2016).

$$\vec{F}_1 = k\delta\vec{e}_{12} \quad (7-2)$$

طبق قانون سوم نیوتون نیروی وارد شده به ذره ۲ برابر خواهد بود با (رابطه (۸-۲)) (Jahani et al., 2016).

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1 \quad (8-2)$$

۲-۳- قانون برخورد فنر-میراگر^۱

برای قانون برخورد فنر-دمپر، یک ضریب فنر همانطور که قبلا اشاره شد، بعلاوه یک ضریب ارتجاعی برای فاکتور میرایی تعریف می‌شود: ($0 < \eta < 1$)

نیرویی که در این حالت به ذره ۱ وارد می‌شود به صورت رابطه (۹-۲) تعریف می‌شود:

$$\vec{F}_1 = (K\delta + \gamma(\vec{v}_{12} \cdot \vec{e}_{12}))\vec{e}_{12} \quad (9-2)$$

در رابطه (۹-۲)، \vec{v}_{12} سرعت نسبی دو ذره است و γ ضریب میرایی می‌باشد که از رابطه (۱۰-۲) بدست می‌آید:

$$\gamma = -2 \frac{m_{12} \ln \eta}{t_{coll}} \quad (10-2)$$

در رابطه (۱۰-۲)، m_{12} جرم کاهش یافته که از رابطه (۱۱-۲) محاسبه می‌شود و t_{coll} مقیاس زمان برخورد می‌باشد. نیروی وارد شده به جسم دوم نیز همانند رابطه (۸-۲) خواهد بود.

$$m_{12} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (11-2)$$

۲-۴- قانون برخورد اصطکاکی^۱

قانون برخورد اصطکاکی بر اساس معادله اصطکاک کولمب می‌باشد که به صورت رابطه (۲-۱۲) تعریف می‌شود (Jahani et al., 2016).

$$F_{\text{friction}} = \mu F_{\text{normal}} \quad (2-12)$$

که ضریب اصطکاک و اندازه نیروی نرمال در راستای مرکز دو ذره است. جهت نیروی اصطکاکی در خلاف حرکت مماس نسبی است و ممکن است نیروی اصطکاکی به دو دلیل مانع از به حساب آوردن حرکت مماس نسبی بین دو ذره شود: ۱- اندازه مومنتوم مماسی ۲- اندازه سایر نیروهای مماسی (همانند مولفه‌های مماسی نیروی درگ^۲ و گرانشی).

ضریب اصطکاک تابع اندازه سرعت مماس نسبی ذرات است (روابط ۲-۱۳):

$$v_r \leq v_{\text{glide}} :$$

$$\mu(v_r) = \mu_{\text{stick}} + (\mu_{\text{stick}} - \mu_{\text{glide}}) \left(\frac{v_r}{v_{\text{glide}}} - 2.0 \right) \left(\frac{v_r}{v_{\text{glide}}} \right)$$

$$v_{\text{glide}} < v_r \leq v_{\text{limit}} :$$

$$\mu(v_r) = \mu_{\text{glide}}$$

$$v_r > v_{\text{limit}}$$

$$v_{\text{ratio}} = \frac{(v_r - v_{\text{limit}})}{\text{slope}_{\text{limit}}} \quad (2-13)$$

$$\mu_{\text{ratio}} = \frac{\mu_{\text{glide}}}{\mu_{\text{limit}}}$$

$$\mu(v_r) = \mu_{\text{glide}} \frac{1 + v_{\text{ratio}}}{1 + \mu_{\text{ratio}} v_{\text{ratio}}}$$

در روابط (۲-۱۳)، ضریب اصطکاک چسبندگی، μ_{glide} ضریب اصطکاک لغزشی، μ_{limit} ضریب

اصطکاک حد سرعت بالا، v_{glide} سرعت لغزشی و v_{limit} حد سرعت ذره می‌باشد که برای سرعت‌های بالا

1- Friction Collision Law

2- Drag

$\mu(V_r)$ به μ_{limit} نزدیک می‌شود و در نهایت $slope_{limit}$ پارامتری است که تعیین می‌کند با چه سرعتی به μ_{limit} نزدیک می‌شود (Cundall et al., 1979).

مدل برخورد دانه‌ای هرتز-میندلین^۱ جدید در لایتز پیاده‌سازی شده است. در این مدل برخورد، اندرکنش‌ها میان ذرات و ذره-دیوار بر طبق یک مدل فنر-کمک فنر در جهات عمود و مماس بر خطوط مراکزشان هستند (Chand et al., 2012). این مدل دانه‌ای از فرمول نیروی اصطکاکی بین دو ذره دانه‌ای استفاده می‌کند، هنگامی که فاصله r بین دو ذره با شعاع‌های R_i و R_j کمتر از فاصله تماس‌شان ($d = R_i + R_j$) است. هنگامی که $r > d$ ، هیچ نیرویی بین این ذرات وجود ندارد (Jahani et al., 2016).

$$F = (k_n \delta n_{ij} - \gamma_n v n_{ij}) + (k_t \delta t_{ij} - \gamma_t v t_{ij}) \quad (14-2)$$

کمیت‌ها در معادله (۱۴-۲) به صورت زیر هستند:

k_n : ثابت الاستیک برای برخورد عمود.

$d - r = \delta n_{ij}$: همپوشانی عمود (فاصله همپوشانی دو ذره).

γ_n : ثابت میرایی ویسکوالاستیک برای برخورد عمود.

$v n_{ij}$: سرعت عمود نسبی (مؤلفه قائم سرعت نسبی دو ذره).

k_t : ثابت الاستیک برای برخورد مماسی.

δt_{ij} : همپوشانی مماسی (بردار جابجایی مماسی بین دو ذره کروی که برای برآورده کردن یک معیار تسلیم اصطکاکی کوتاه شده است).

γ_t : ثابت میرایی ویسکوالاستیک برای برخورد مماسی.

$v t_{ij}$: سرعت مماسی نسبی (مؤلفه مماسی سرعت نسبی دو ذره).

جمله اول سمت راست معادله (۲-۱۴) نیروی عمود (F_n) بین دو ذره است و جمله دوم سمت راست این معادله نیروی مماسی (F_t) است.

با توجه به اینکه مدول برشی (G) می‌تواند از روی مدول یانگ^۱ و نسبت پواسون^۲ محاسبه شود، مدل برخورد هرتز-میندلین به پارامترهای مواد زیر بستگی دارد (Just et al., 2013):

- ✓ ضریب استرداد e
- ✓ مدول یانگ Y
- ✓ نسبت پواسون ν
- ✓ ضریب اصطکاک استاتیکی μ_s
- ✓ ضریب اصطکاک غلتشی μ_r

۲-۵- جمع‌بندی

در این فصل روش اجزای گسسته، قوانین فیزیکی و پارامترهای تأثیرگذار فرمول‌های عددی آن بررسی شدند. از بین مدل‌های برخورد، مدل برخورد دانه‌ای هرتز-میندلین به عنوان کامل‌ترین مدل معرفی و پارامترهای تأثیرگذار آن ارائه شدند.

1- Young Modulus
2- Poisson's Ratio

فصل سوم: معرفی نرم افزار و روش تهیه سازی

سرند سه صفحه ای

۳-۱ مقدمه

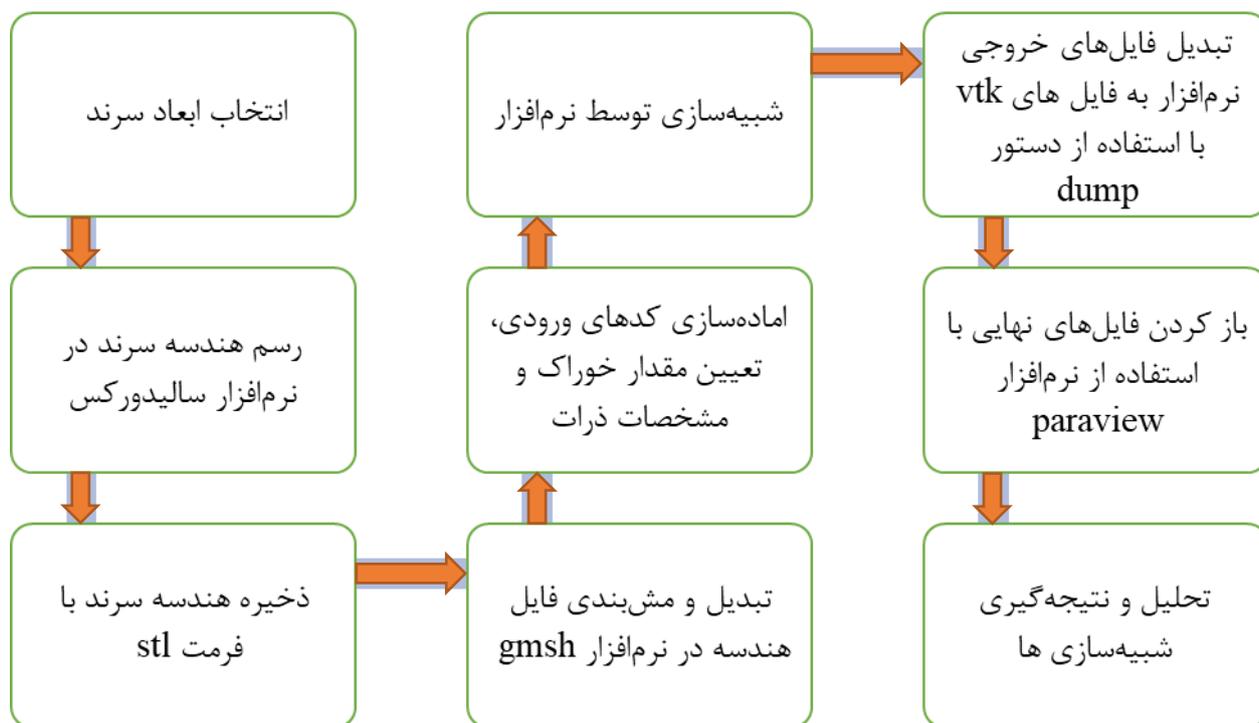
امروزه یکی از ابزارهای رایج در طراحی و بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی به ویژه خطوط فرآوری مواد معدنی شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های عددی می‌باشد (Cleary et al., 2008). پیشرفت کامپیوترها منجر به افزایش قدرت محاسباتی و در نتیجه پیاده‌سازی روش‌های عددی پیشرفته‌ای شده است که می‌تواند رفتار هر ذره را به صورت جداگانه بررسی و ثبت نماید (Kozicki and Donzé., 2009). نخستین بار روش اجزای گسسته را برای تحلیل مکانیک سنگ پیشنهاد دادند (Tavarez and Plesha., 2007). یکی از نرم‌افزارهایی که برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی ذرات به وسیله روش اجزای گسسته مورد استفاده قرار می‌گیرد، نرم‌افزار لایتز می‌باشد. لایتز نسخه به روز و توسعه‌یافته لمپس^۱ است (Goni et al., 2012). لمپس یک مجموعه دینامیک مولکولی کلاسیک متن‌باز^۲ برای شبیه‌سازی دینامیک اتم‌های در حال اندرکنش است. همچنین لمپس ذرات دانه درشت و پتانسیل‌های اندرکنش را بررسی و اندازه‌گیری می‌کند، همچنین قادر به مدل‌سازی و شبیه‌سازی ذرات در مقیاس ریز نیز می‌باشد (FrantzDale et al., 2011). کدهای متن‌باز یک جایگزین کارآمد برای نرم‌افزارهای تجاری موجود ارائه می‌کنند (Kloss and Goniva., 2011).

سرند آزمایشگاهی یک سرند ارتعاشی که در آن شیب پنل‌های سرند از شیب دار در ورودی خوراک تا مسطح در خروجی خوراک به منظور حفظ کردن یک ضخامت بستر ثابت تغییر می‌کنند. این امر معمولاً به وسیله ترکیبی از چند پنل که زوایای شیب مختلفی دارند محقق می‌شود (Dong et al., 2009).

۳-۲- مراحل انجام شبیه‌سازی

با توجه به موارد ذکر شده، می‌توان مراحل انجام شبیه‌سازی را در شکل (۳-۱) خلاصه نمود:

1- LAMMPS
2- Open Source



شکل ۳-۱- فلوچارت مراحل انجام شبیه سازی.

۳-۲-۱- انتخاب ابعاد سرند

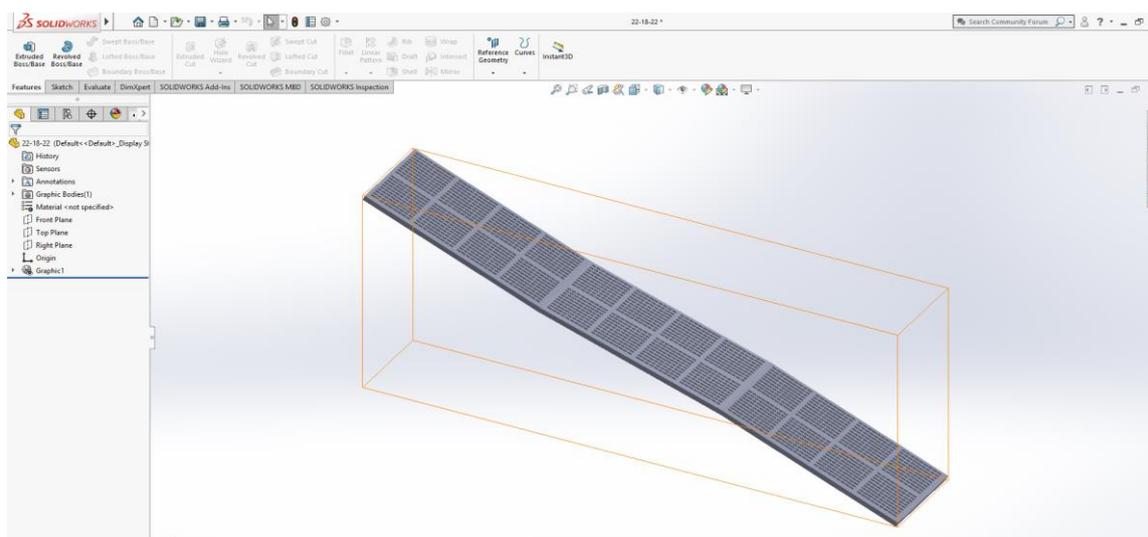
سرند مورد استفاده در شبیه سازی، سرند سه صفحه ای آزمایشگاهی یک طبقه دارای سه پنل با شیب های متغییر است. شکل روزنه سرند در این شبیه سازی مربعی و مستطیلی است. مشخصات و ابعاد سرند در جدول (۳-۱) قابل مشاهده می باشد.

جدول ۳-۱- مشخصات پنل های سرند.

۹۰۰	طول پنل (میلی متر)
۴۵۰	عرض پنل (میلی متر)
۵۰	ضخامت پنل (میلی متر)
۲۰	قطر روزنه، مش (میلی متر)
۳۹/۷۶	سطح باز سرند (درصد)
مربعی و مستطیلی	شکل روزنه های پنل
۲۵ و ۲۲، ۱۸	زاویه پنل ها (درجه)

۳-۲-۲- رسم هندسه سرند در نرم افزار سالیدورکس

به منظور طراحی کلی پنل های سرند از نرم افزار سالیدورکس^۱ نسخه ۲۰۱۸ ۶۴ بیتی استفاده شده است. سالیدورکس نرم افزاری بسیار پیشرفته به منظور طراحی سازه های صنعتی به صورت سه بعدی (شکل ۳-۲ و شکل ۳-۳) می باشد. از قابلیت های این نرم افزار می توان به طراحی و ایجاد مراجع هندسی، منحنی ها، پلان ها و ... اشاره نمود. این نرم افزار قادر به طراحی سرند با تمامی قسمت ها و جزئیات می باشد. به طور کلی مراحل طراحی با استفاده از نرم افزار سالیدورکس به سه بخش طراحی دو بعدی^۲، حجم دادن^۳ و کاهش حجم^۴ تقسیم می شود.



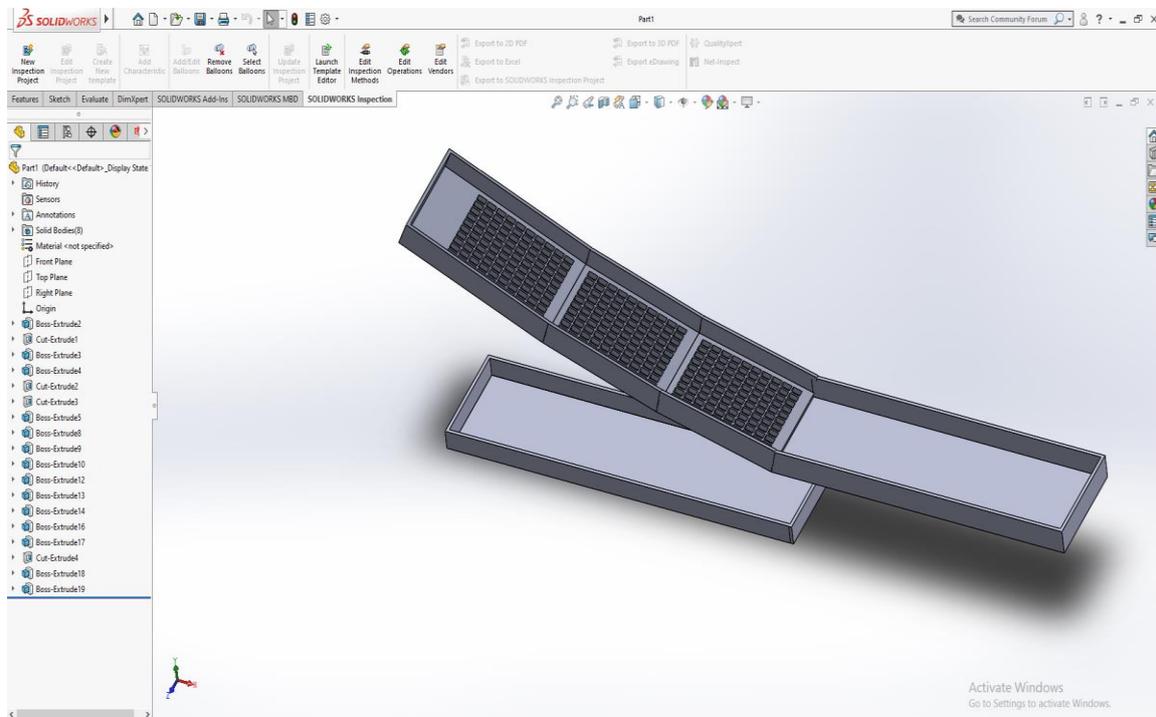
شکل ۳-۲- طراحی هندسه سرند با استفاده از سالیدورکس.

۳-۲-۳- ذخیره هندسه سرند با فرمت stl

به منظور مش بندی و آماده سازی فایل ورودی نرم افزار لایتز، لازم است فایل خروجی نرم افزار سالیدورکس را به صورت stl ذخیره کرده، همچنین می توان آن ها را به صورت فایل step ذخیره (شکل ۳-۴)

- 1- SOLIDWORKS
- 2- Sketch
- 3- Extruded boss/base
- 4- Extruded cut

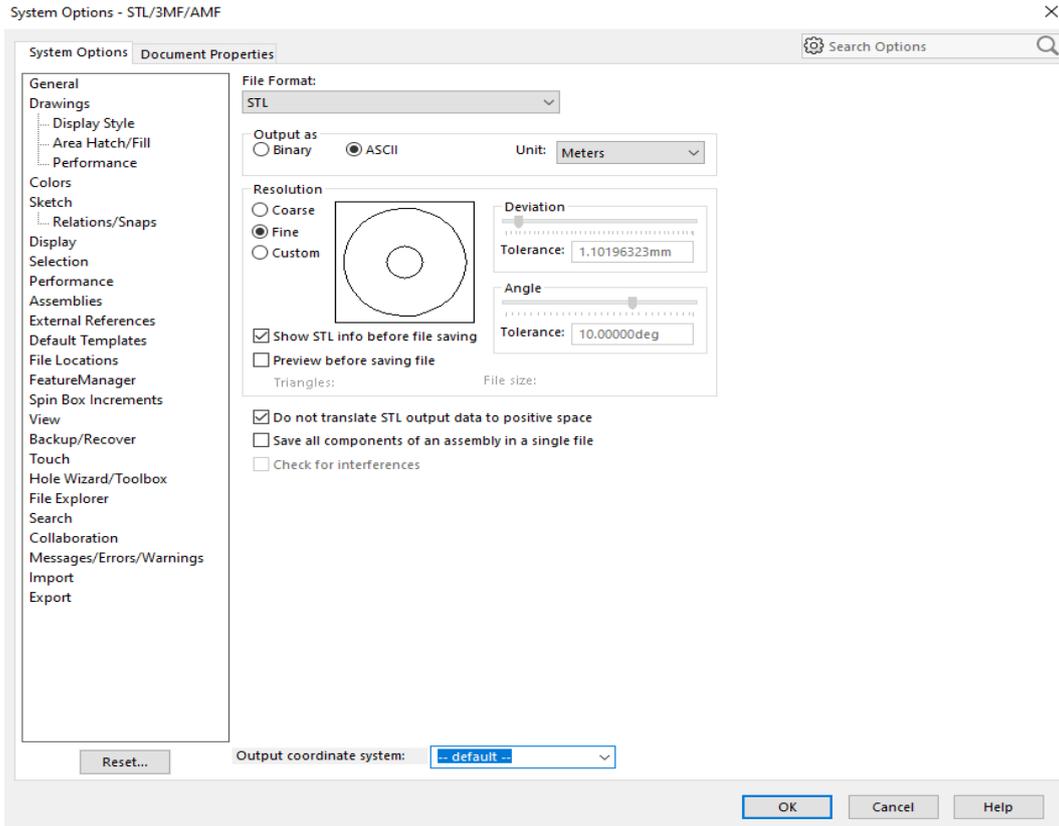
و با استفاده از نرم‌افزار Gmsh به فایل stl تبدیل نمود این کار تا حدودی حجم فایل‌های ورودی را کاهش و به فرآیند شبیه‌سازی سرعت می‌بخشد.



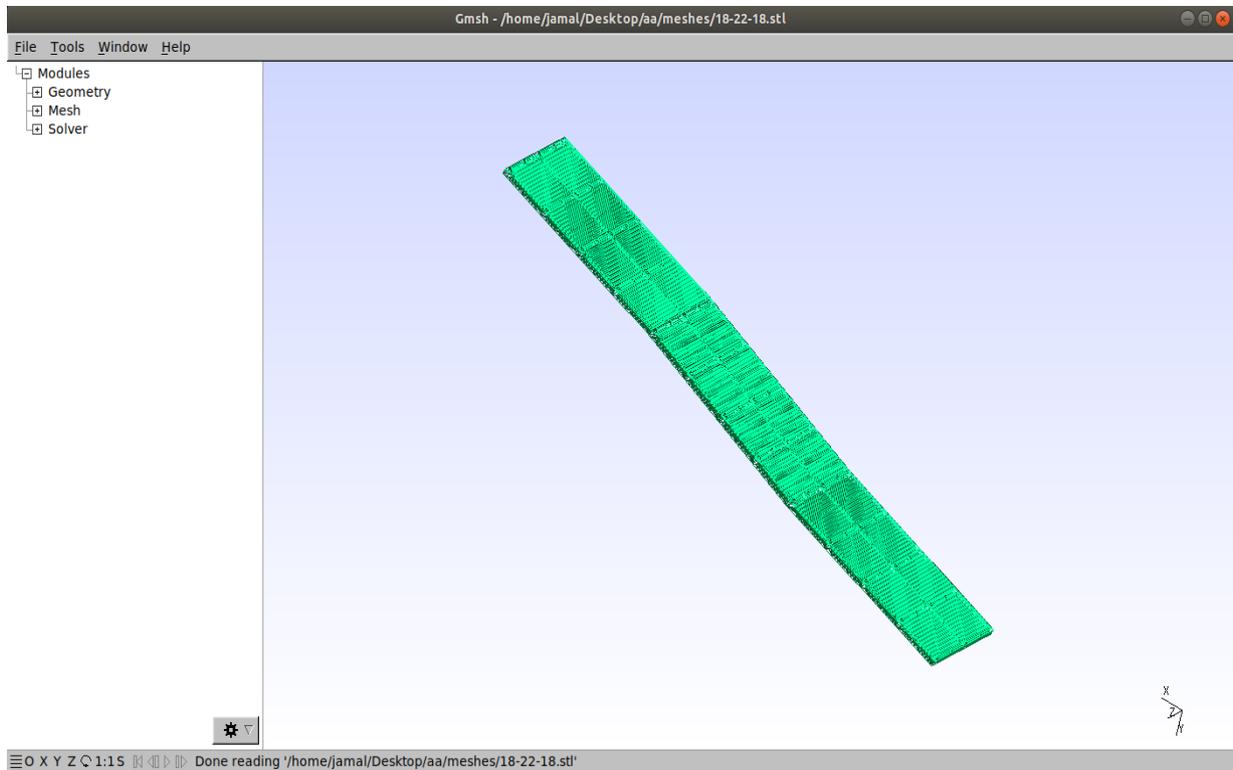
شکل ۳-۳- طراحی هندسه سرند با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکس.

۳-۲-۴- تبدیل و مش‌بندی فایل هندسه با استفاده از نرم‌افزار Gmsh

به منظور تبدیل و مش‌بندی کامل فایل‌های خروجی سالیدورکس و آماده‌سازی ورودی نرم‌افزار لایتر لازم است از نرم‌افزار Gmsh استفاده شود. این نرم‌افزار تحت سیستم عامل لینوکس بوده و هدف طراحی آن ارائه یک ابزار مش‌بک سریع، سبک و کاربرپسند با ورودی پارامتریک و قابلیت تجسم پیشرفته است (شکل ۵-۳). Gmsh در حدود سه ماژول ساخته شده است: هندسه، مش، و پردازش پست. مشخصات هر ورودی به این ماژول‌ها به صورت تعاملی با استفاده از رابط کاربری گرافیکی امکاناتی نظیر مش‌بندی دوبعدی و سه‌بعدی برای کاربر فراهم می‌کند. همچنین از این نرم‌افزار برای تبدیل صفحات نامریی که با استفاده از نرم‌افزار پاراوو ایجاد می‌شوند به فایل‌های ورودی نرم‌افزار لایتر و ادغام آن‌ها نیز استفاده می‌شود.



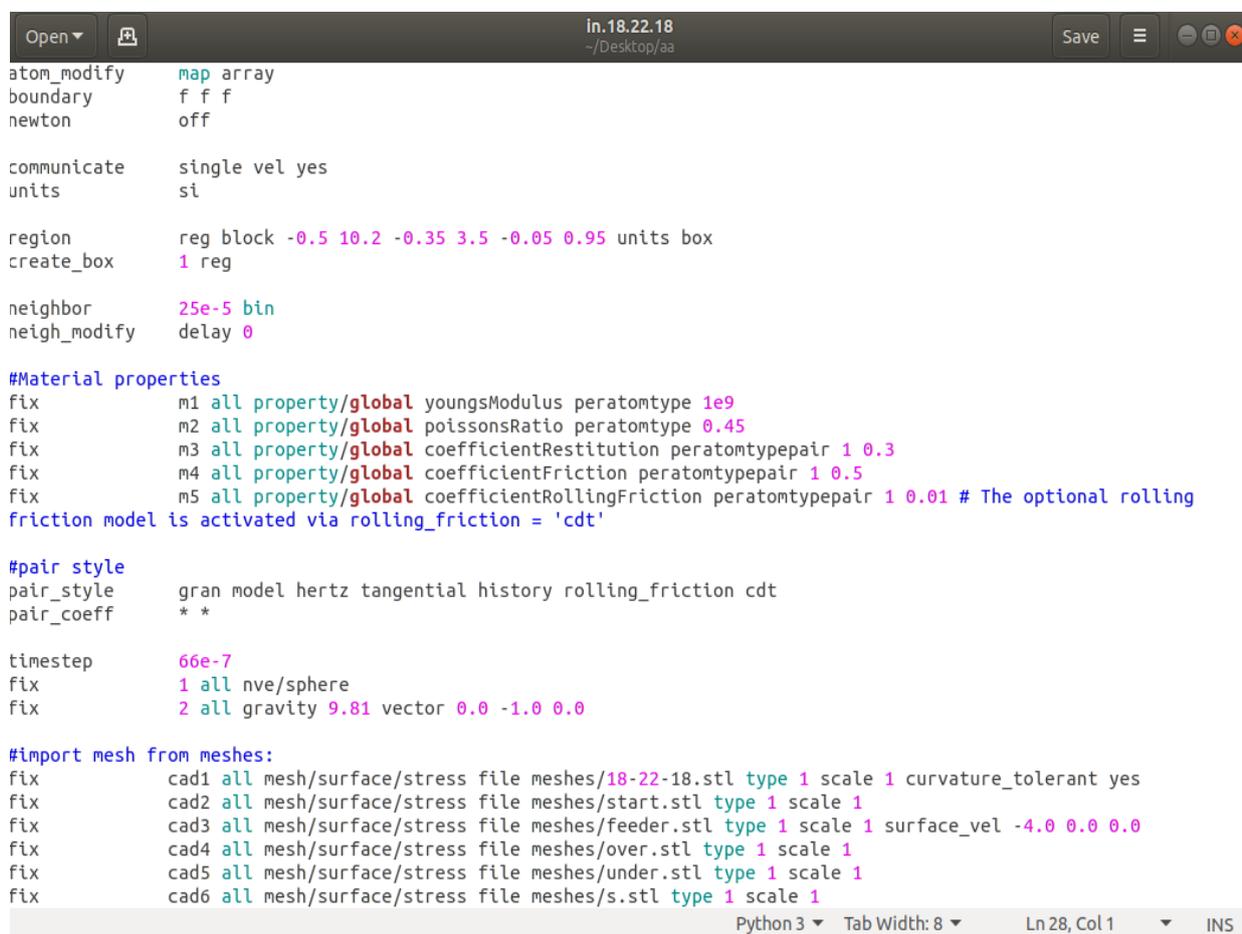
شکل ۳-۴- ذخیره‌سازی طرح اولیه سرند در نرم‌افزار سالی‌دورکس.



شکل ۳-۵- محیط کار نرم‌افزار Gmsh.

۳-۲-۵- آماده سازی کدهای ورودی، تعیین مقدار خوراک و مشخصات ذرات

نرم افزار لایتز همانند بسیاری از نرم افزارهای متن باز دارای یک فایل ورودی^۱ (شکل ۳-۶) می باشد که تمامی اطلاعات اعم از مشخصات ذرات، هندسه ورودی، قوانین موجود در هندسه (قانون نیوتون، اصطحاک و ...) در این فایل قرار دارند. به منظور شبیه سازی هرچه نزدیکتر به واقعیت باید مشخصات و پارامترهای مربوط به شکل و نوع حرکت ذرات به طور دقیق اندازه گیری و قرار داده شوند. هرگونه ایراد یا تفاوتی در پارامترها باعث افزایش زمان شبیه سازی یا رخداد خطا در آن می شود.



```
atom_modify      map array
boundary         f f f
newton           off

communicate      single vel yes
units            si

region           reg block -0.5 10.2 -0.35 3.5 -0.05 0.95 units box
create_box       1 reg

neighbor         25e-5 bin
neigh_modify     delay 0

#Material properties
fix              m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1e9
fix              m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix              m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix              m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix              m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 1 0.01 # The optional rolling
friction model is activated via rolling_friction = 'cdt'

#pair style
pair_style       gran model hertz tangential history rolling_friction cdt
pair_coeff        * *

timestep         66e-7
fix              1 all nve/sphere
fix              2 all gravity 9.81 vector 0.0 -1.0 0.0

#import mesh from meshes:
fix              cad1 all mesh/surface/stress file meshes/18-22-18.stl type 1 scale 1 curvature_tolerant yes
fix              cad2 all mesh/surface/stress file meshes/start.stl type 1 scale 1
fix              cad3 all mesh/surface/stress file meshes/feeder.stl type 1 scale 1 surface_vel -4.0 0.0 0.0
fix              cad4 all mesh/surface/stress file meshes/over.stl type 1 scale 1
fix              cad5 all mesh/surface/stress file meshes/under.stl type 1 scale 1
fix              cad6 all mesh/surface/stress file meshes/s.stl type 1 scale 1
```

شکل ۳-۶- کدهای ورودی نرم افزار لایتز.

پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۳-۲) نشان داده شده است:

جدول ۳-۲- مشخصات ذرات و پارامترهای ارتعاشی سرند.

۱۰	۱۶	۲۰	۴۰	۶۰	ابعاد ذرات، قطر (میلی متر)	
۷۶۵/۳۷۵	۷۴۷/۴۵	۷۱۷/۵۵	۱۹۴/۳۲۵	۷۵/۳	خوراک ۱	نرخ خوراک (تعداد بر ثانیه)
۱۱۳۲/۷۵۵	۱۱۰۶/۲۲۶	۱۰۶۱/۹۷۴	۲۸۷/۶۰۱	۱۱۱/۴۴۴	خوراک ۲	
۲	۸	۱۵	۳۲/۵	۴۲/۵	توزیع اندازه خوراک (درصد)	
۲۸۰/۵۲۶۷					خوراک ۱	وزن خوراک (کیلوگرم)
۴۱۵/۱۷۹۵					خوراک ۲	
۱۴/۹۳					بسامد ارتعاش، f (هرتز)	
۵و۲					دامنه ارتعاش (میلی متر)	
خطی، ۹۰ درجه					نوع حرکت ارتعاشی	
۱۴۰۰					چگالی ذرات (kg/m^3)	
$1e^{+5}$					مدول یانگ (N/m^2)	
۰/۴۵					نسبت پوآسون	
۰/۳					ضریب استرداد	
۰/۵					ضریب اصطکاک لغزشی	
۰/۰۱					ضریب اصطکاک غلتشی	

۳-۲-۶- تبدیل فایل‌های خروجی نرم‌افزار به فایل‌های vtk با استفاده از

دستور دامپ^۱

فایل‌های خروجی نرم‌افزار لایتز درون فایل‌های ذخیره می‌شوند. برای نمایش این فایل‌ها در نرم‌افزار پاراوو^۲،

باید ابتدا با استفاده از دستور دامپ به فرمت vtk تبدیل شوند. برای این منظور از دستور زیر به صورت مستقیم

در ترمینال محل فایل‌ها که در شکل (۳-۷) نشان داده شده است استفاده می‌شود:

pizza

```
vtk(dump("dump*")).manyGran("D")
```

1- Dump

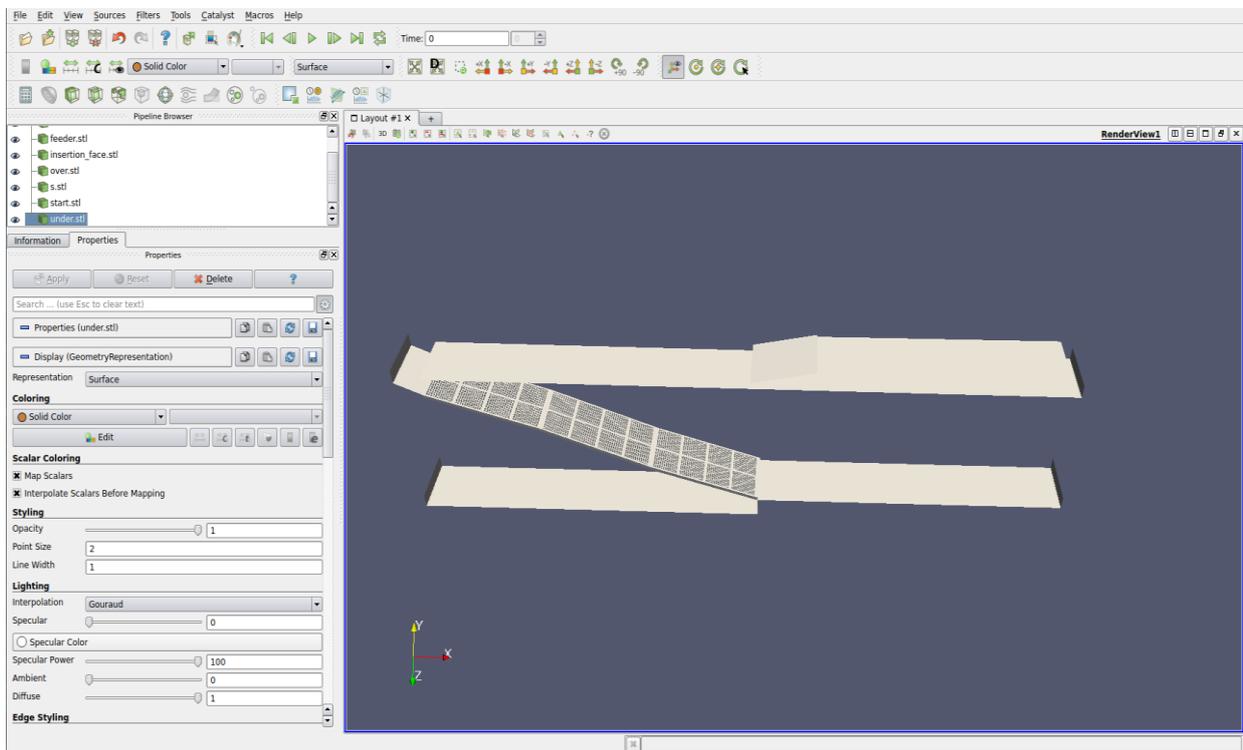
2- Paraview

```
jamal@jamal-Lenovo-Y50-70: ~/Desktop/pl
File Edit View Search Terminal Help
jamal@jamal-Lenovo-Y50-70:~/Desktop/pl$ pizza
Pizza.py (LPP 1.0 based on pizza - 7 Oct 2011), a toolkit written in Python
type ? for help, CTRL-D to quit
Loading tools ...
image tool did not load:
  No module named ImageTk
pexpect from http://pypi.python.org/pypi/pexpect is required for vmd tool
vmd tool did not load:
  No module named pexpect
animate tool did not load:
  No module named ImageTk
No handlers could be found for logger "OpenGL.Tk"
gl tool did not load:
  can't find package Togl
> vtk(dump("dump*")).manyGran("D")
```

شکل ۷-۳- تبدیل به فرمت `vtk` با استفاده از دستور `dump` و `pizza`.

۷-۲-۳- نمایش فایل‌های نهایی با استفاده از نرم‌افزار پاراوئو

به منظور نمایش فایل‌های شبیه‌سازی باید از یک نرم‌افزار کمکی مانند پاراوئو استفاده کرد. پاراوئو یک نرم‌افزار متن‌باز که برای تجزیه و تحلیل داده‌ها است. کاربران آن می‌توانند به سرعت تجسماتی را برای تجزیه و تحلیل داده‌های خود با استفاده از تکنیک‌های کمی و کیفی ایجاد کنند. کاوش داده‌ها می‌تواند به صورت تعاملی در قالب سه‌بعدی یا به صورت برنامه‌ای با استفاده از قابلیت‌های پردازش دسته‌ای آن انجام شود. نرم‌افزار پاراوئو گام‌های زمانی شبیه‌سازی را به صورت یک چرخه‌ی پیوسته نمایش می‌دهد (شکل ۸-۳) که به درک بهتر آن کمک زیادی می‌کند. همچنین این نرم‌افزار امکان جداسازی ذرات را با توجه به پارامترهای مختلفی چون: سرعت، ابعاد و ... برای کاربر فراهم می‌کند.



شکل ۳-۸- محیط کار نرم افزار پارابو جهت نمایش فایل های نهایی.

۳-۳- جمع بندی

در این فصل مراحل مختلف شبیه سازی سرند سه صفحه ای که شامل انتخاب ابعاد متناسب با سرند آزمایشگاهی مورد نظر، رسم هندسه سرند سه صفحه ای با استفاده از نرم افزار سالیدورکس، تبدیل و مش بندی فایل خروجی نرم افزار سالیدورکس با استفاده از نرم افزار Gmsh، آماده سازی کدهای ورودی، تعیین پارامترهای خوراک ورودی سرند و نمایش نهایی فایل ها با استفاده از نرم افزار پارابو بررسی شدند.

فصل چهارم: شیشه‌سازی

۴-۱- مقدمه

در این پژوهش، به طور کلی ۹۶ شبیه‌سازی انجام شد. مدت زمان هر شبیه‌سازی به وسیله لپتاپ با مشخصات: رم ۱۶ گیگابایت ddr4 و سی پی یو Intel core i7-4710 HQ، ۱۵ ساعت بود که در این شبیه‌سازی‌ها، دامنه ارتعاش، نرخ خوراک، زاویه پنل‌ها و شکل روزنه‌ی سرند مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور شبیه‌سازی هرچه نزدیک‌تر به واقعیت از پارامترهای نزدیک به مقادیر نسبتاً واقعی استفاده شده است. بازدهی سرند به وسیله فرمول (۴-۱) محاسبه و در جدول (۴-۵) نشان داده شده است.

$$E\% = \frac{100(e-v)}{e(100-v)} \times 100 \quad (4-1)$$

E: بازدهی سرند (درصد).

e: درصد ذرات ریزتر از روزنه سرند در خوراک ورودی.

v: درصد ذرات ریزتر از روزنه سرند مانده روی سرند.

۴-۲- اعتبارسنجی شبیه‌سازی

به طور واقعی اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های روش اجزای گسسته بسیار دشوار است. این شبیه‌سازی می‌تواند شامل برخوردهای ذرات، ذرات با برخوردهای طولانی و یا هر دو باشند. تلاش‌ها برای به طور کمی اعتبارسنجی کردن شبیه‌سازی‌های اجزای گسسته با مقایسه با داده‌های تجربی اغلب بوسیله عدم قطعیت‌ها بر حسب داده‌های تجربی و این حقیقت که غالباً ذرات شبیه‌سازی شده کروی هستند و ذرات تجربی غیرکروی هستند، منتفی هستند (Thornton et al., 2011). در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی از تست ابعاد سرندهی آزمایشگاهی استفاده شده است. در این تست، شش نوع گلوله با چگالی و قطرهای مختلف استفاده شده است (جدول ۴-۱). گلوله‌ها توسط ۵ سرند با سایزهای مختلف مطابق شکل‌های (۴-۲ تا ۴-۷) مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج تست ابعاد سرندهی شبیه‌سازی (شکل ۴-۱) و آزمایشگاهی در جدول (۴-۲)

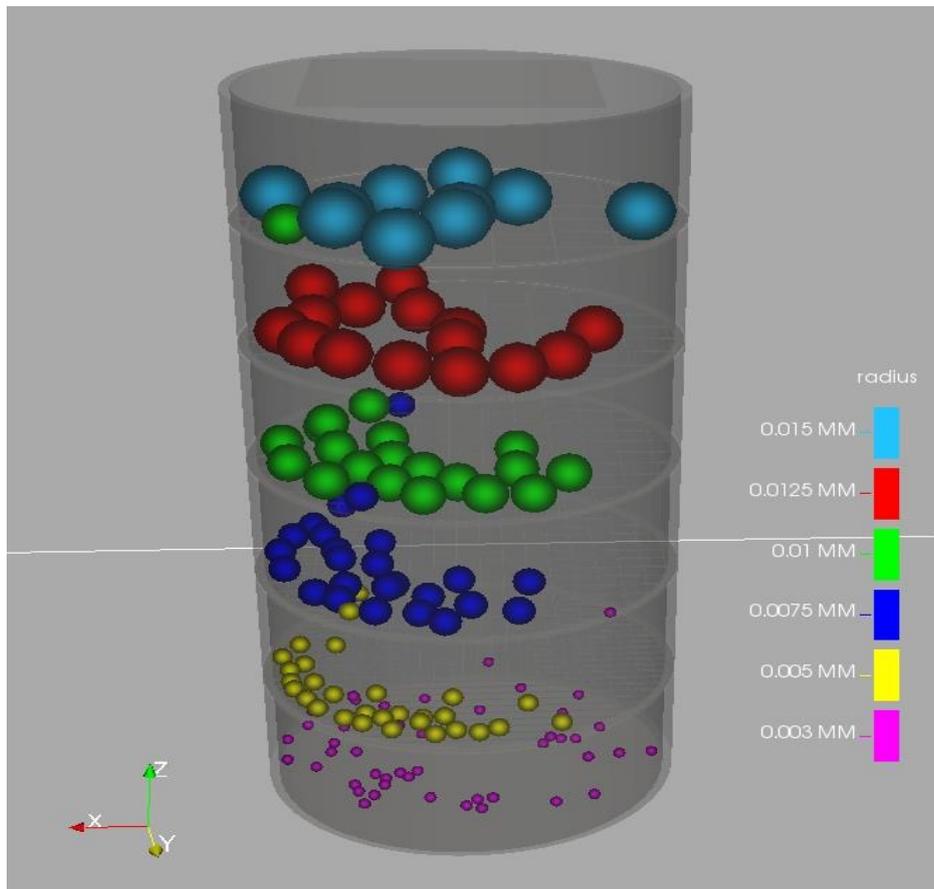
و جدول (۳-۴) نشان داده شده است. همچنین در جدول (۴-۴) نتایج تست ابعاد سرندهای شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

جدول ۴-۱- مشخصات گلوله‌ها و سرندهای مورد استفاده در تست ابعاد سرندهی.

سایز روزنه‌ی سرنده	تعداد گلوله‌ها	چگالی گلوله (kg/m ³)	قطر گلوله (میلی متر)
۲۸ میلی‌متر	۱۰	۷۰۰۰ (فولادی)	۳۰
۲۵/۴ میلی‌متر	۱۵	۷۰۰۰ (فولادی)	۲۵
۱۹ میلی‌متر	۲۰	۷۰۰۰ (فولادی)	۲۰
۱۴ میلی‌متر	۲۵	۱۴۰۰ (پلاستیک PVC)	۱۵
۷/۴ میلی‌متر	۳۰	۱۴۰۰ (پلاستیک PVC)	۱۰
	۵۰	۱۴۰۰ (پلاستیک PVC)	۶

جدول ۴-۲- نتایج شبیه‌سازی تست ابعاد سرندهی بعد از ۱۰ ثانیه.

پن	سرنده ۵	سرنده ۴	سرنده ۳	سرنده ۲	سرنده ۱	درصد مانده روی سرنده	قطر گلوله‌ها (میلی متر)
۷/۴ میلی‌متر <	۷/۴ میلی‌متر	۱۴ میلی‌متر	۱۹ میلی‌متر	۲۵/۴ میلی‌متر	۲۸ میلی‌متر		
۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۳۰	
۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۲۵	
۰	۰	۰	۹۵	۰	۵	۲۰	
۰	۰	۹۶	۴	۰	۰	۱۵	
۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	
۹۴	۶	۰	۰	۰	۰	۶	



شکل ۴-۱- شبیه سازی تست ابعاد سرندهی بعد از ۸ ثانیه.

جدول ۴-۳- نتایج آزمایشگاهی تست ابعاد سرندهی بعد از ۱۰ ثانیه.

پن ۷/۴ میلی متر <	سرنده ۵ ۷/۴ میلی متر	سرنده ۴ ۱۴ میلی متر	سرنده ۳ ۱۹ میلی متر	سرنده ۲ ۲۵/۴ میلی متر	سرنده ۱ ۲۸ میلی متر	درصد مانده روی سرنده	قطر کلوردها (میلی متر)
.	.	.	.	.	۱۰۰	۳۰
.	.	.	.	۹۳/۳۳۳	۶/۶۶۷	۲۵	
.	.	.	۱۰۰	.	.	۲۰	
.	.	۹۶	۴	.	.	۱۵	
.	۹۶/۶۶۷	۳/۳۳۳	.	.	.	۱۰	
۹۰	۱۰	.	.	.	.	۶



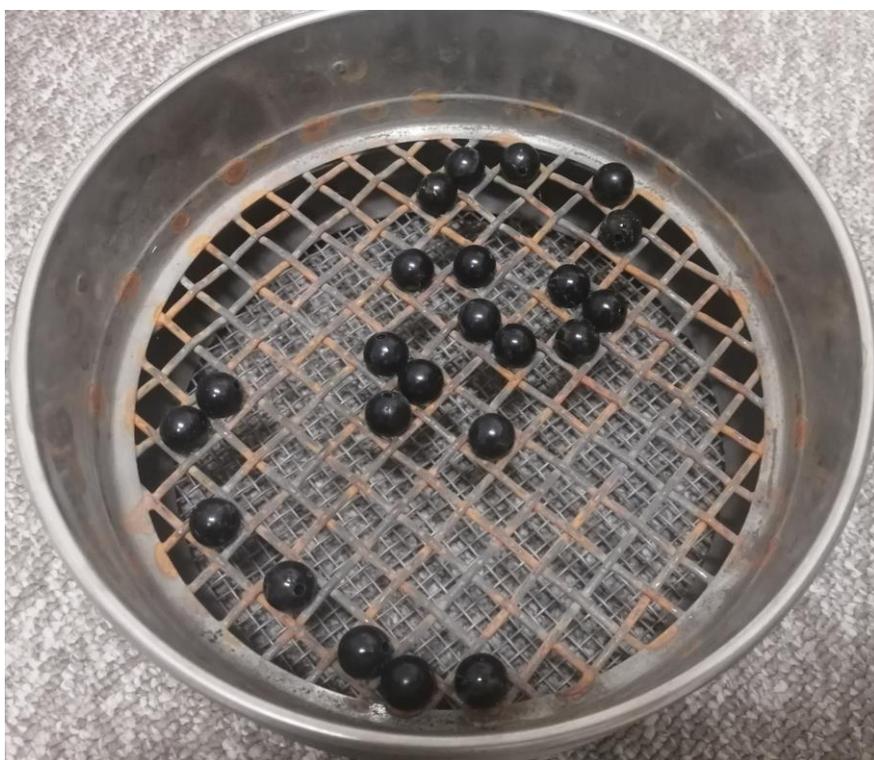
شکل ۴-۲- نتایج پنل اول تست ابعاد سرندی آزمایشگاهی.



شکل ۴-۳- نتایج پنل دوم تست ابعاد سرندی آزمایشگاهی.



شکل ۴-۴- نتایج پنل سوم تست ابعاد سردی آزمایشگاهی.



شکل ۴-۵- نتایج پنل چهارم تست ابعاد سردی آزمایشگاهی.



شکل ۴-۶- نتایج پنل پنجم تست ابعاد سرنندی آزمایشگاهی.



شکل ۴-۷- نتایج پنل ششم تست ابعاد سرنندی آزمایشگاهی.

جدول ۴-۴ - مقایسه نتایج تست ابعاد سرندهی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی.

خطا (%)	بازدهی (%)	نحوی اندازه‌گیری	شماره سرنده
۱/۶۷۷	۹۵/۶۳۴	شبیه‌سازی	سرنده ۱ ۲۸ میلی‌متر
	۹۳/۹۵۷	آزمایشگاهی	
۰	۱۰۰	شبیه‌سازی	سرنده ۲ ۲۵/۴ میلی‌متر
	۱۰۰	آزمایشگاهی	
۳/۳۹۸	۹۶/۶۴۳	شبیه‌سازی	سرنده ۳ ۱۹ میلی‌متر
	۹۳/۲۴۵	آزمایشگاهی	
۲/۶۸۶	۹۷/۳۱۴	شبیه‌سازی	سرنده ۴ ۱۴ میلی‌متر
	۱۰۰	آزمایشگاهی	
۲/۸۱۹	۹۵/۹۱۸	شبیه‌سازی	سرنده ۵ ۷/۴ میلی‌متر
	۹۳/۰۹۹	آزمایشگاهی	
۰	۱۰۰	شبیه‌سازی	سرنده ۶ ۷/۴ میلی‌متر <
	۱۰۰	آزمایشگاهی	

با توجه به اختلاف کم بین بازدهی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی و همچنین مقادیر پایین خطا (کمتر از

۱۰ درصد) می‌توان نتیجه گرفت که نتایج شبیه‌سازی درست و قابل اعتماد می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده و تأثیر پارامترهای مختلف بر بازدهی سرنده در جدول (۴-۵) نشان

داده شده است.

جدول ۴-۵- پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی و تأثیرات آن ها بر بازدهی سرند.

بازدهی سرند (%)	ذرات عبوری (%)					بسامد ارتعاش (Hz)	دامنه ارتعاش (mm)	زاویه هر پنل (درجه)			نرخ خوراک (kg)	شکل روزنه	شماره شبیه سازی
	قطر ذرات (mm)							پنل ۱	پنل ۲	پنل ۳			
	۱۰	۱۶	۲۰	۴۰	۶۰								
۹۷.۷۹۸	۹۹.۸۱۷	۹۹.۳۱۸	۹۴.۰۶۱	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۲	۱۸	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۱
۹۶.۸۳۰	۹۹.۹۴۸	۹۹.۱۰۴	۹۱.۱۳۳	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۲	۱۸	۲۸۰.۵۳	مربعی	۲
۹۹.۲۳۰	۹۹.۹۳۸	۹۹.۹۶۳	۹۷.۹۹۴	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۲	۱۸	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۳
۹۸.۹۶۱	۹۹.۹۲۱	۹۹.۷۱۱	۹۷.۱۵۶	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۲	۱۸	۴۱۵.۱۸	مربعی	۴
۹۷.۹۲۸	۹۹.۹۸۷	۹۹.۴۵۲	۹۴.۱۴۵	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۲	۱۸	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۵
۹۵.۲۶۰	۹۹.۹۴۸	۹۹.۰۹۰	۸۶.۲۶۸	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۲	۱۸	۲۸۰.۵۳	مربعی	۶
۹۹.۳۳۰	۹۹.۹۶۵	۹۹.۷۸۳	۹۸.۱۸۲	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۲	۱۸	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۷
۹۸.۲۲۸	۹۹.۹۷۴	۹۹.۵۹۳	۹۴.۹۴۳	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۲	۱۸	۴۱۵.۱۸	مربعی	۸
۹۶.۲۱۶	۹۹.۷۶۵	۹۸.۵۵۵	۸۹.۹۹۰	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۲۲	۱۸	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۹
۹۵.۱۹۸	۱۰۰	۹۸.۶۲۲	۸۶.۵۰۵	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۲۲	۱۸	۲۸۰.۵۳	مربعی	۱۰
۹۷.۹۷۰	۹۹.۷۹۷	۹۹.۲۱۴	۹۴.۷۲۶	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۲۲	۱۸	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۱۱
۹۶.۱۷۷	۹۹.۹۲۱	۹۹.۰۱۵	۸۹.۲۲۶	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۲۲	۱۸	۴۱۵.۱۸	مربعی	۱۲
۹۶.۳۳۷	۹۹.۹۰۹	۹۸.۷۵۶	۹۰.۰۰۴	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۲۲	۱۸	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۱۳
۹۵.۱۹۸	۱۰۰	۹۸.۶۲۲	۸۶.۵۰۵	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۲۲	۱۸	۲۸۰.۵۳	مربعی	۱۴
۹۸.۱۳۴	۹۹.۹۳۸	۹۹.۳۶۷	۹۴.۹۲۴	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۲۲	۱۸	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۱۵
۹۴.۸۴۹	۹۹.۹۵۶	۹۸.۶۴۴	۸۵.۴۴۹	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۲۲	۱۸	۴۱۵.۱۸	مربعی	۱۶
۹۷.۱۹۳	۹۹.۸۳۰	۹۹.۰۵۰	۹۲.۴۴۴	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۵	۱۸	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۱۷
۹۵.۶۷۰	۹۹.۹۶۱	۹۸.۶۲۲	۸۸.۱۰۸	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۵	۱۸	۲۸۰.۵۳	مربعی	۱۸
۹۸.۸۳۴	۹۹.۹۰۳	۹۹.۵۷۵	۹۶.۹۲۰	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۵	۱۸	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۱۹
۹۸.۴۸۸	۹۹.۹۴۷	۹۹.۵۷۵	۹۵.۸۰۰	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۵	۱۸	۴۱۵.۱۸	مربعی	۲۰
۹۶.۸۹۷	۹۹.۹۴۸	۹۸.۹۸۳	۹۱.۴۶۸	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۵	۱۸	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۲۱
۹۳.۸۷۱	۹۹.۹۳۵	۹۸.۶۸۹	۸۲.۳۷۸	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۵	۱۸	۲۸۰.۵۳	مربعی	۲۲

ادامه جدول ۴-۵.

بازدهی سرند (%)	ذرات عبوری (%)					بسامد ارتعاش (Hz)	دامنه ارتعاش (mm)	زاویه هر پنل (درجه)			نرخ خوراک (kg)	شکل روزنه	شماره شبیه‌سازی
	قطر ذرات (mm)							پنل ۱	پنل ۲	پنل ۳			
	۱۰	۱۶	۲۰	۴۰	۶۰								
۹۸.۸۲۴	۹۹.۹۸۲	۹۹.۵۴۸	۹۶.۸۳۶	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۵	۱۸	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۲۳
۹۷.۸۰۳	۹۹.۹۴۷	۹۹.۴۶۷	۹۳.۷۸۴	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۵	۱۸	۴۱۵.۱۸	مربعی	۲۴
۹۵.۸۹۳	۹۹.۸۰۴	۹۸.۳۱۵	۸۹.۱۹۶	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۲۵	۱۸	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۲۵
۹۴.۰۶۳	۹۹.۸۸۲	۹۷.۶۴۶	۸۴.۱۲۱	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۲۵	۱۸	۲۸۰.۵۳	مربعی	۲۶
۹۷.۵۷۶	۹۹.۸۰۶	۹۸.۸۹۷	۹۳.۸۲۲	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۲۵	۱۸	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۲۷
۹۵.۰۶۲	۹۹.۹۲۹	۹۸.۳۵۵	۸۶.۴۳۸	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۲۵	۱۸	۴۱۵.۱۸	مربعی	۲۸
۹۵.۸۹۳	۹۹.۸۰۴	۹۸.۳۱۵	۸۹.۱۹۶	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۲۵	۱۸	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۲۹
۹۲.۴۹۴	۹۹.۹۳۵	۹۷.۶۸۶	۷۹.۱۴۴	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۲۵	۱۸	۲۸۰.۵۳	مربعی	۳۰
۹۷.۶۴۹	۹۹.۹۲۹	۹۹.۲۵۹	۹۳.۵۳۹	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۲۵	۱۸	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۳۱
۹۲.۹۸۳	۹۹.۹۲۹	۹۸.۰۲۰	۸۳.۴۳۴	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۲۵	۱۸	۴۱۵.۱۸	مربعی	۳۲
۹۶.۳۸۱	۹۹.۸۳۰	۹۸.۷۵۶	۹۰.۲۲۷	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۱۸	۲۲	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۳۳
۹۵.۴۹۸	۹۹.۸۹۵	۹۸.۹۵۷	۸۷.۲۰۲	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۱۸	۲۲	۲۸۰.۵۳	مربعی	۳۴
۹۸.۹۶۱	۹۹.۹۲۱	۹۹.۵۸۴	۹۷.۲۸۸	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۱۸	۲۲	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۳۵
۹۸.۵۰۰	۹۹.۹۷۴	۹۹.۵۷۵	۹۵.۸۰۹	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۱۸	۲۲	۴۱۵.۱۸	مربعی	۳۶
۹۶.۷۹۰	۹۹.۹۰۹	۹۸.۹۷۰	۹۱.۷۸۹	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۱۸	۲۲	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۳۷
۹۱.۱۱۲	۹۹.۹۴۸	۹۸.۰۴۷	۷۴.۴۶۰	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۱۸	۲۲	۲۸۰.۵۳	مربعی	۳۸
۹۸.۸۷۰	۹۹.۹۲۱	۹۹.۶۲۹	۹۶.۹۵۸	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۱۸	۲۲	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۳۹
۹۷.۶۷۱	۹۹.۹۶۵	۹۹.۵۴۸	۹۳.۲۶۶	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۱۸	۲۲	۴۱۵.۱۸	مربعی	۴۰
۹۵.۸۴۸	۹۹.۸۱۷	۹۸.۲۶۱	۸۹.۰۹۸	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۱۸	۲۲	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۴۱
۹۵.۱۵۳	۹۹.۹۰۹	۹۸.۶۸۹	۸۶.۳۹۳	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۱۸	۲۲	۲۸۰.۵۳	مربعی	۴۲
۹۸.۴۹۴	۹۹.۸۸۵	۹۹.۳۹۴	۹۶.۰۷۳	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۱۸	۲۲	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۴۳
۹۸.۲۴۹	۹۹.۹۹۱	۹۹.۵۳۹	۹۵.۰۴۶	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۱۸	۲۲	۴۱۵.۱۸	مربعی	۴۴

ادامه جدول ۴-۵.

بازدهی سرند (%)	ذرات عبوری (%)					بسامد ارتعاش (Hz)	دامنه ارتعاش (mm)	زاویه هر پنل (درجه)			نرخ خوراک (kg)	شکل روزنه	شماره شبیه‌سازی
	قطر ذرات (mm)							پنل ۱	پنل ۲	پنل ۳			
	۱۰	۱۶	۲۰	۴۰	۶۰								
۹۵.۷۵۴	۹۹.۹۰۹	۹۸.۷۵۶	۸۸.۱۹۲	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۱۸	۲۲	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۴۵
۹۱.۸۷۱	۹۹.۸۹۵	۹۷.۸۴۶	۷۷.۰۸۱	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۱۸	۲۲	۲۸۰.۵۳	مربعی	۴۶
۹۸.۶۵۲	۹۹.۹۴۷	۹۹.۵۲۱	۹۶.۳۶۵	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۱۸	۲۲	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۴۷
۹۷.۵۸۸	۹۹.۹۳۸	۹۹.۵۰۳	۹۳.۰۸۷	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۱۸	۲۲	۴۱۵.۱۸	مربعی	۴۸
۹۰.۸۱۲	۹۹.۷۲۶	۹۵.۹۰۷	۷۵.۹۹۳	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۵	۲۲	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۴۹
۹۱.۱۳۵	۹۹.۸۹۵	۹۷.۵۳۹	۷۵.۱۱۵	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۵	۲۲	۲۸۰.۵۳	مربعی	۵۰
۹۴.۸۸۰	۹۹.۸۰۶	۹۸.۴۸۱	۸۵.۸۷۳	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۵	۲۲	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۵۱
۹۷.۶۶۱	۹۹.۹۳۸	۹۹.۳۴۰	۹۳.۴۸۳	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۵	۲۲	۴۱۵.۱۸	مربعی	۵۲
۹۱.۰۰۵	۹۹.۸۳۰	۹۶.۲۹۵	۷۶.۰۷۷	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۵	۲۲	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۵۳
۸۶.۲۱۶	۹۹.۸۹۵	۹۵.۶۸۰	۶۱.۵۷۹	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۵	۲۲	۲۸۰.۵۳	مربعی	۵۴
۹۶.۰۸۳	۹۹.۹۶۵	۹۹.۱۹۵	۸۸.۶۹۸	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۵	۲۲	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۵۵
۹۴.۲۴۷	۹۹.۸۴۱	۹۸.۰۵۶	۸۴.۳۱۰	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۵	۲۲	۴۱۵.۱۸	مربعی	۵۶
۹۰.۹۹۶	۹۹.۷۱۳	۹۶.۳۳۵	۷۶.۱۳۳	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۲۵	۲۲	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۵۷
۷۷.۸۴۴	۹۹.۸۰۴	۸۹.۰۸۵	۴۲.۷۰۲	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۲۵	۲۲	۲۸۰.۵۳	مربعی	۵۸
۹۴.۷۴۷	۹۹.۷۶۲	۹۸.۴۰۹	۸۵.۵۸۱	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۲۵	۲۲	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۵۹
۸۷.۰۶۳	۹۹.۹۳۸	۹۵.۸۷۸	۶۴.۱۴۶	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۲۵	۲۲	۴۱۵.۱۸	مربعی	۶۰
۹۰.۷۴۵	۹۹.۸۰۴	۹۵.۹۲۰	۷۵.۶۸۷	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۲۵	۲۲	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۶۱
۷۳.۸۴۵	۹۹.۸۸۲	۸۵.۹۴۲	۳۳.۴۵۹	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۲۵	۲۲	۲۸۰.۵۳	مربعی	۶۲
۹۴.۲۷۴	۹۹.۸۳۲	۹۸.۰۶۵	۸۴.۳۹۴	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۲۵	۲۲	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۶۳
۸۲.۵۲۱	۹۹.۸۴۱	۹۳.۶۹۰	۵۲.۴۱۱	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۲۵	۲۲	۴۱۵.۱۸	مربعی	۶۴
۹۴.۲۲۰	۹۹.۸۸۲	۹۸.۱۱۴	۸۴.۱۲۱	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۱۸	۲۵	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۶۵
۹۱.۳۹۹	۹۹.۹۰۹	۹۶.۹۲۳	۷۶.۵۶۵	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۱۸	۲۵	۲۸۰.۵۳	مربعی	۶۶

ادامه جدول ۴-۵.

بازدهی سرند (%)	ذرات عبوری (%)					بسامد ارتعاش (Hz)	دامنه ارتعاش (mm)	زاویه هر پنل (درجه)			نرخ خوراک (kg)	شکل روزنه	شماره شبه‌سازی
	قطر ذرات (mm)							پنل ۱	پنل ۲	پنل ۳			
	۱۰	۱۶	۲۰	۴۰	۶۰								
۹۸.۰۷۹	۹۹.۹۰۳	۹۹.۲۶۸	۹۴.۸۹۵	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۱۸	۲۵	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۶۷
۹۷.۹۲۲	۹۹.۹۱۲	۹۹.۲۹۵	۹۴.۳۶۸	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۲	۱۸	۲۵	۴۱۵.۱۸	مربعی	۶۸
۹۴.۵۴۸	۹۹.۸۸۲	۹۸.۳۰۱	۸۴.۹۴۴	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۱۸	۲۵	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۶۹
۸۵.۳۹۶	۹۹.۸۶۹	۹۴.۸۱۰	۶۰.۱۴۲	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۱۸	۲۵	۲۸۰.۵۳	مربعی	۷۰
۹۸.۰۰۶	۹۹.۹۲۱	۹۹.۲۵۹	۹۴.۶۶۰	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۱۸	۲۵	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۷۱
۹۶.۳۶۴	۹۹.۹۵۶	۹۹.۲۷۷	۸۹.۴۹۹	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۲	۱۸	۲۵	۴۱۵.۱۸	مربعی	۷۲
۹۳.۰۷۷	۹۹.۷۳۹	۹۱.۲۰۴	۸۱.۶۶۷	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۱۸	۲۵	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۷۳
۸۸.۹۸۳	۹۹.۷۷۸	۹۵.۷۸۷	۷۰.۳۷۵	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۱۸	۲۵	۲۸۰.۵۳	مربعی	۷۴
۹۷.۴۵۵	۹۹.۸۷۶	۹۹.۱۳۲	۹۳.۱۲۵	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۱۸	۲۵	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۷۵
۹۷.۴۳۱	۹۹.۹۰۳	۹۹.۱۹۵	۹۲.۹۵۵	.	.	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۱۸	۲۵	۴۱۵.۱۸	مربعی	۷۶
۹۳.۵۶۶	۹۹.۹۰۹	۹۷.۷۸۰	۸۲.۴۰۶	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۱۸	۲۵	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۷۷
۸۲.۷۶۸	۹۹.۸۶۹	۹۲.۶۴۳	۵۴.۲۳۱	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۱۸	۲۵	۲۸۰.۵۳	مربعی	۷۸
۹۷.۲۷۰	۹۹.۹۰۳	۹۹.۰۶۰	۹۲.۵۹۷	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۱۸	۲۵	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۷۹
۹۵.۵۱۳	۹۹.۹۷۴	۹۸.۷۵۲	۸۷.۳۸۰	.	.	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۱۸	۲۵	۴۱۵.۱۸	مربعی	۸۰
۹۵.۲۸۳	۹۹.۷۷۸	۹۸.۲۲۱	۸۷.۴۲۵	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۲	۲۵	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۸۱
۹۲.۸۰۳	۹۹.۸۱۷	۹۷.۶۰۶	۸۰.۳۱۵	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۲	۲۵	۲۸۰.۵۳	مربعی	۸۲
۹۸.۱۳۷	۹۹.۹۰۳	۹۹.۳۱۳	۹۵.۰۲۷	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۲	۲۵	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۸۳
۹۸.۱۲۸	۹۹.۹۲۱	۹۹.۴۸۵	۹۴.۸۰۱	.	.	۱۴.۹۳	۲	۱۸	۲۲	۲۵	۴۱۵.۱۸	مربعی	۸۴
۹۴.۹۰۶	۹۹.۸۹۵	۹۸.۳۵۵	۸۵.۹۸۹	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۲	۲۵	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۸۵
۸۷.۲۴۳	۹۹.۹۳۵	۹۵.۲۸۵	۶۵.۲۱۷	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۲	۲۵	۲۸۰.۵۳	مربعی	۸۶
۹۶.۶۴۶	۹۹.۹۴۷	۹۹.۰۱۵	۹۰.۶۵۷	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۲	۲۵	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۸۷
۹۸.۱۳۴	۹۹.۹۳۸	۹۹.۴۴۹	۹۴.۸۳۹	.	.	۱۴.۹۳	۵	۱۸	۲۲	۲۵	۴۱۵.۱۸	مربعی	۸۸

ادامه جدول ۴-۵.

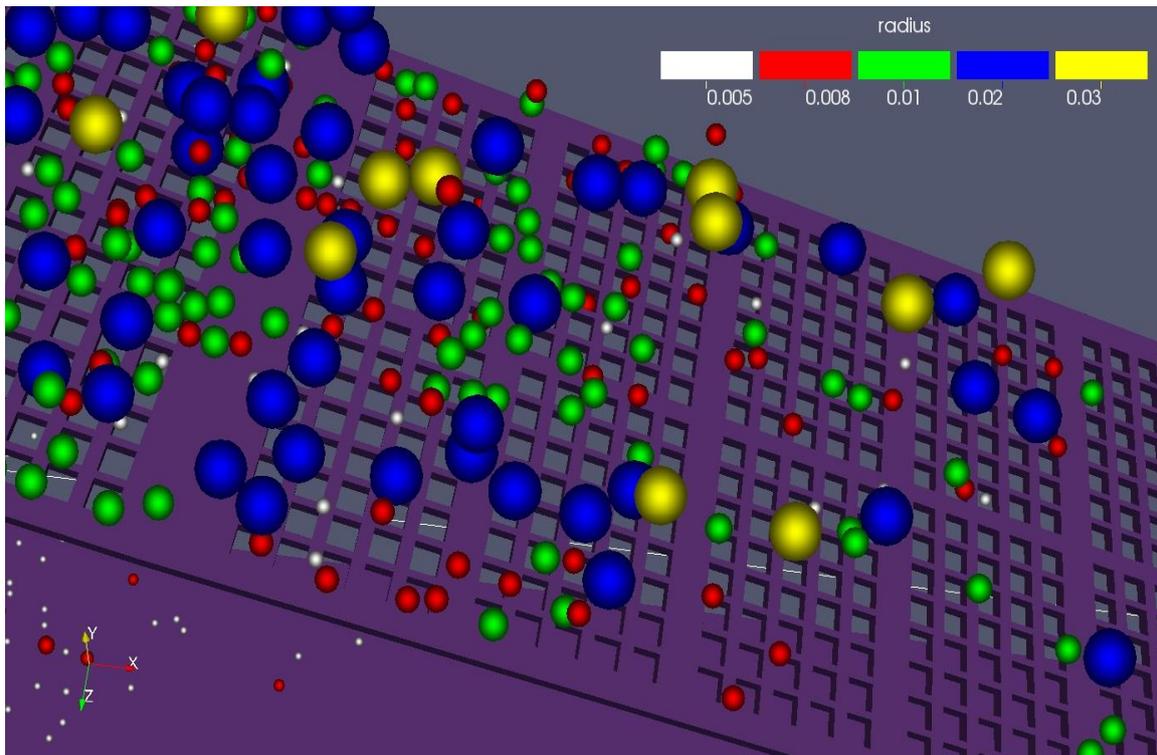
بازدهی سرنده (%)	ذرات عبوری (%)					بسامد ارتعاش (Hz)	دامنه ارتعاش (mm)	زاویه هر پنل (درجه)			نرخ خوراک (kg)	شکل روزنه	شماره شبیه‌سازی
	قطر ذرات (mm)							پنل ۱	پنل ۲	پنل ۳			
	۱۰	۱۶	۲۰	۴۰	۶۰								
۸۷.۵۱۷	۹۹.۵۶۹	۹۴.۳۹۵	۶۷.۴۸۹	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۲۲	۲۵	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۸۹
۷۰.۰۸۷	۹۹.۵۶۹	۸۰.۹۲۶	۲۷.۳۳۹	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۲۲	۲۵	۲۸۰.۵۳	مربعی	۹۰
۹۱.۰۵۹	۹۹.۶۴۷	۹۶.۵۳۸	۷۶.۱۹۱	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۲۲	۲۵	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۹۱
۷۴.۴۸۴	۹۹.۷۹۷	۸۶.۵۶۷	۳۴.۸۹۴	۰	۰	۱۴.۹۳	۲	۲۵	۲۲	۲۵	۴۱۵.۱۸	مربعی	۹۲
۸۸.۰۳۲	۹۹.۷۳۹	۹۵.۰۲۴	۶۸.۲۵۶	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۲۲	۲۵	۲۸۰.۵۳	مستطیل	۹۳
۶۷.۱۶۷	۹۹.۷۱۲	۷۶.۳۳۸	۲۲.۸۹۱	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۲۲	۲۵	۲۸۰.۵۳	مربعی	۹۴
۹۱.۰۷۷	۹۹.۸۲۳	۹۶.۸۲۷	۷۵.۷۵۸	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۲۲	۲۵	۴۱۵.۱۸	مستطیل	۹۵
۷۱.۶۶۳	۹۹.۷۱۷	۸۳.۶۲۹	۲۹.۲۷۱	۰	۰	۱۴.۹۳	۵	۲۵	۲۲	۲۵	۴۱۵.۱۸	مربعی	۹۶

۴-۳- تأثیر شکل روزنه بر بازدهی سرنده

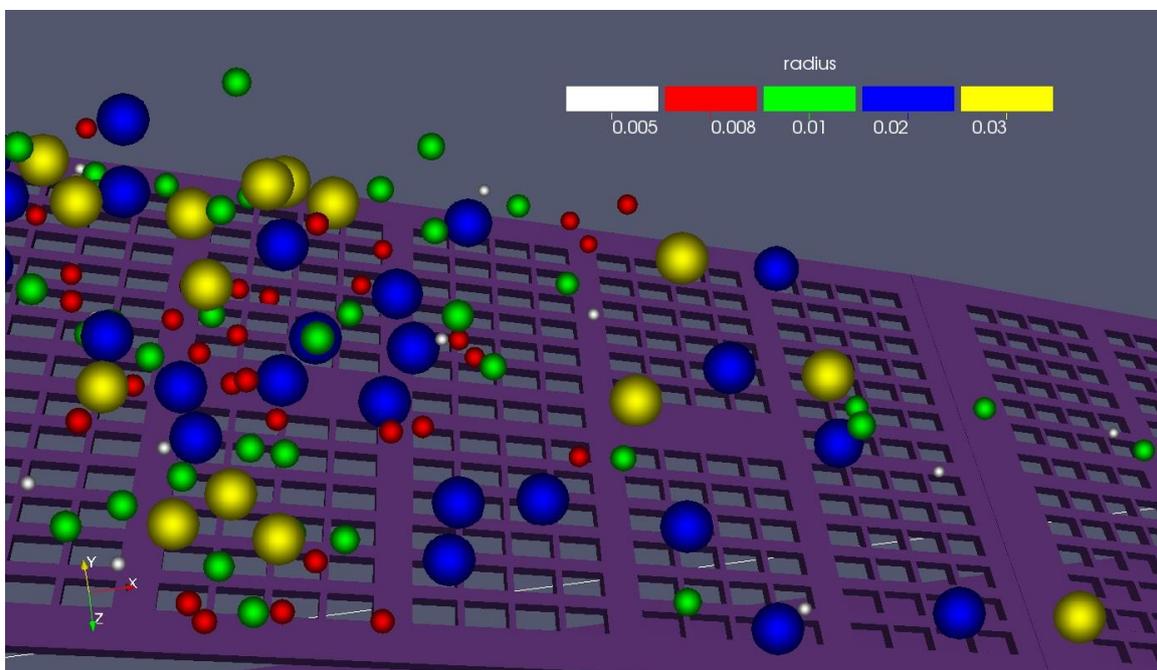
شکل روزنه‌ی سرنده یکی از عوامل تأثیرگذار بر بازدهی سرنده و سرعت عملیات سرنده‌کنی می‌باشد. در صنعت بیشتر از سرنده‌هایی با روزنه‌های مربعی و مستطیلی استفاده می‌شود. در این پژوهش روزنه مربعی و مستطیلی با ابعاد جدول (۴-۶) در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن‌ها به صورت نمودار (شکل ۴-۸ تا شکل ۴-۱۹) نشان داده شده است.

جدول ۴-۶- شکل و ابعاد روزنه سرنده.

ابعاد روزنه (میلی‌متر)	شکل روزنه
۲۰ × ۲۰	مربع (شکل ۴-۸)
۳۰ × ۲۰	مستطیل (شکل ۴-۹)

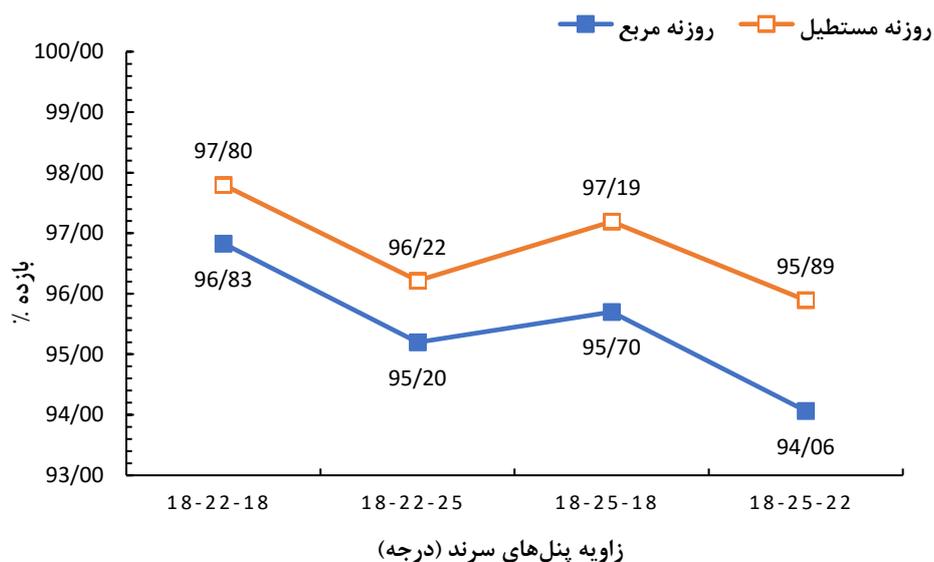


شکل ۴-۸- سرند با شکل روزنه مربعی

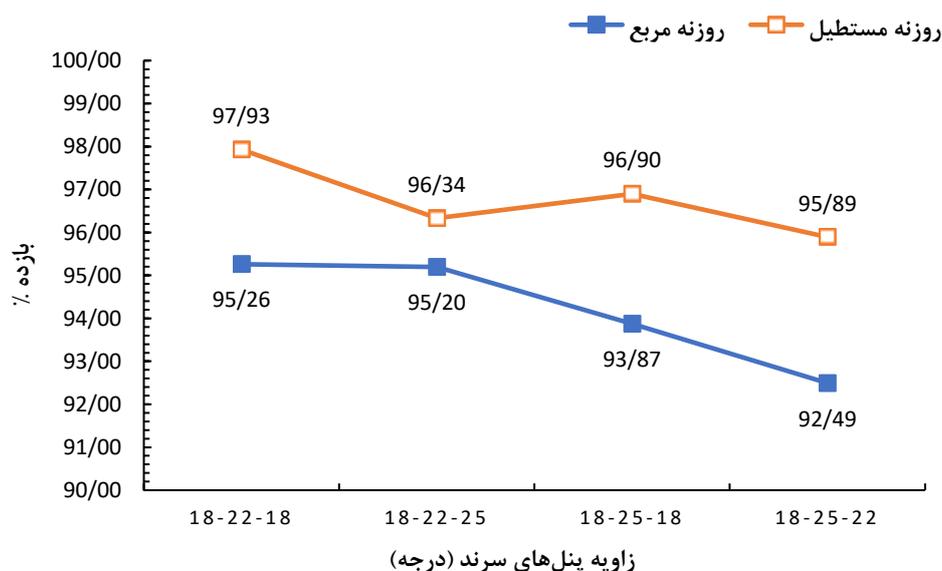


شکل ۴-۹- سرند با شکل روزنه مستطیلی

با توجه به شکل (۴-۱۰) و شکل (۴-۱۱) در زاویه‌های کم پنل‌های سرند بازدهی روزنه مستطیلی بیشتر از روزنه مربعی است. در دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر اختلاف بازدهی سرند با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی به صورت یکنواخت بوده و با افزایش زاویه پنل‌های سرند کمتر می‌شود. با افزایش دامنه ارتعاش از ۲ میلی‌متر

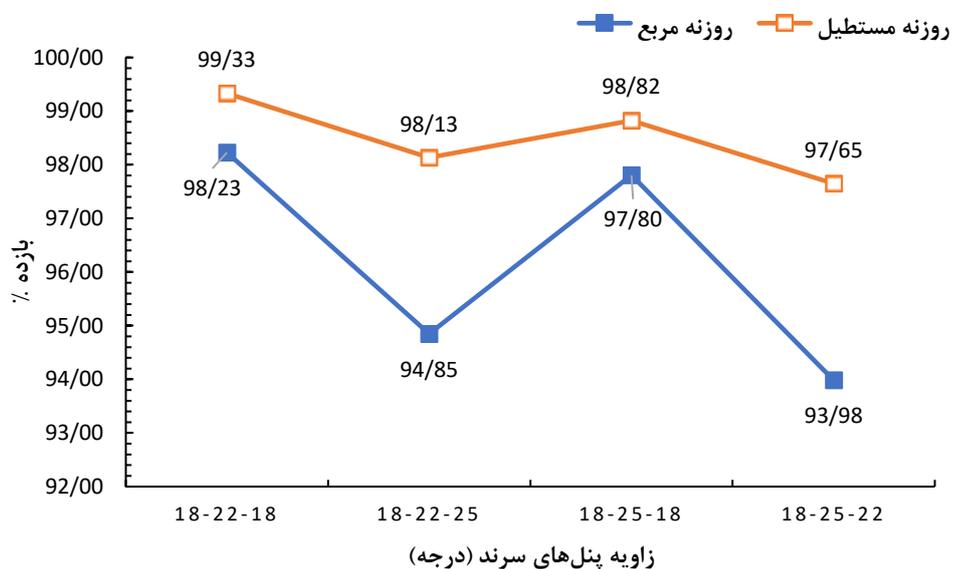


شکل ۴-۱۰- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سرند (زاویه پنل اول ۱۸ درجه، خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر).



شکل ۴-۱۱- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سرند (زاویه پنل اول ۱۸ درجه، خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر).

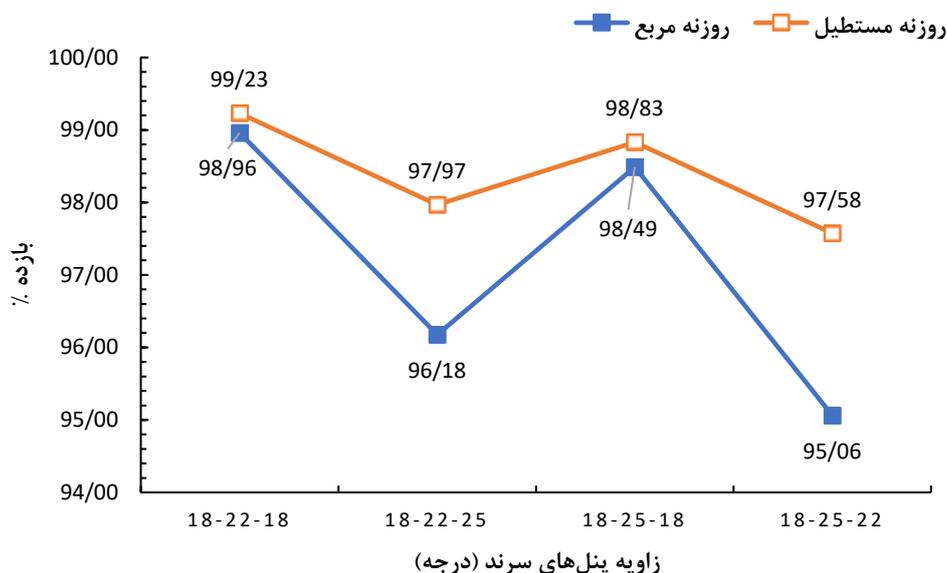
به ۵ میلی‌متر بازدهی سرد با روزنه مربعی به طور کلی کاهش می‌یابد که این نشان از تأثیر منفی افزایش دامنه، بر بازدهی سرد با روزنه مربعی در زاویه‌های پایین پنل‌های سرد دارد (شکل ۴-۱۲). افزایش دامنه از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر باعث افزایش بازدهی در سرد با روزنه مستطیلی در پنل‌های سرد با زاویه ۱۸-۲۲ شده است ولی با افزایش زاویه پنل‌های سرد بازدهی روزنه مستطیلی نیز کاهش یافته است. مقادیر کاهش بازدهی در سرد با روزنه مستطیلی نسبت به سرد مربعی بسیار کم و مقادیر کاهش بازدهی در سرد با روزنه مربعی در حد ۲ درصد می‌باشد.



شکل ۴-۱۲- تأثیر شکل روزنه بر بازدهی سرد (زاویه پنل اول ۱۸ درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر).

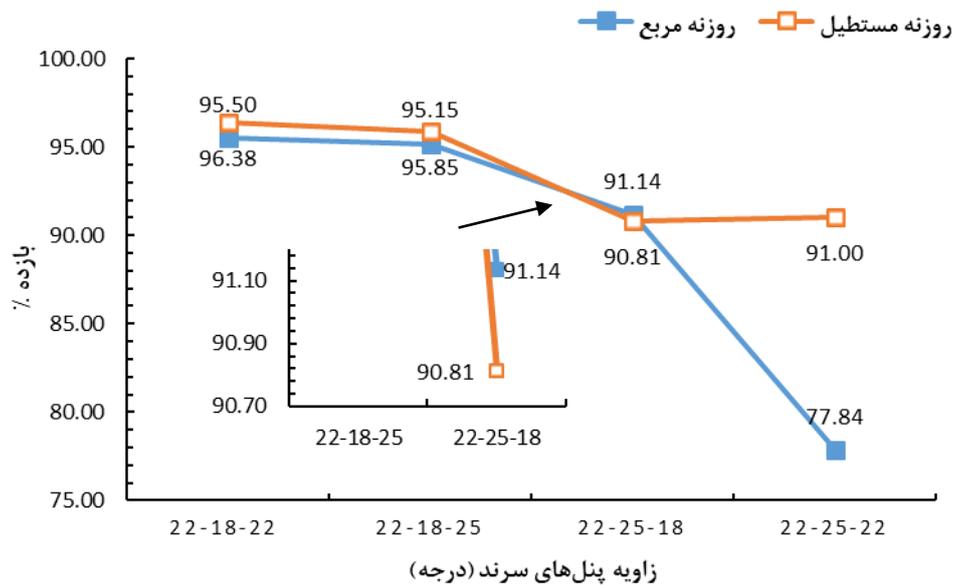
با افزایش خوراک ورودی سرد بازدهی سرد با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی افزایش پیدا کرده که نشان دهنده ظرفیت بیشتر سرد نسبت به خوراک ورودی سرد دارد (شکل ۴-۱۳). در سرد با روزنه مستطیلی با افزایش خوراک، بازدهی سرد ۱/۵ درصد افزایش پیدا کرده است. در سرد با روزنه مربعی با افزایش خوراک مقادیر بازدهی سرد در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۱۸ و ۱۸-۲۵-۱۸ افزایش قابل توجهی داشته و در پنل‌های ۱۸-۲۲-۲۵ بازدهی کاهش پیدا کرده است. افزایش خوراک ورودی باعث افزایش کلی بازدهی در سرد با روزنه مستطیلی شده و در سرد با روزنه مربعی در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۱۸ و ۱۸-

۱۸-۲۵ تأثیر مثبت و در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۲۵ تأثیر منفی داشته و باعث کاهش ۱/۲ درصدی بازدهی شده است.

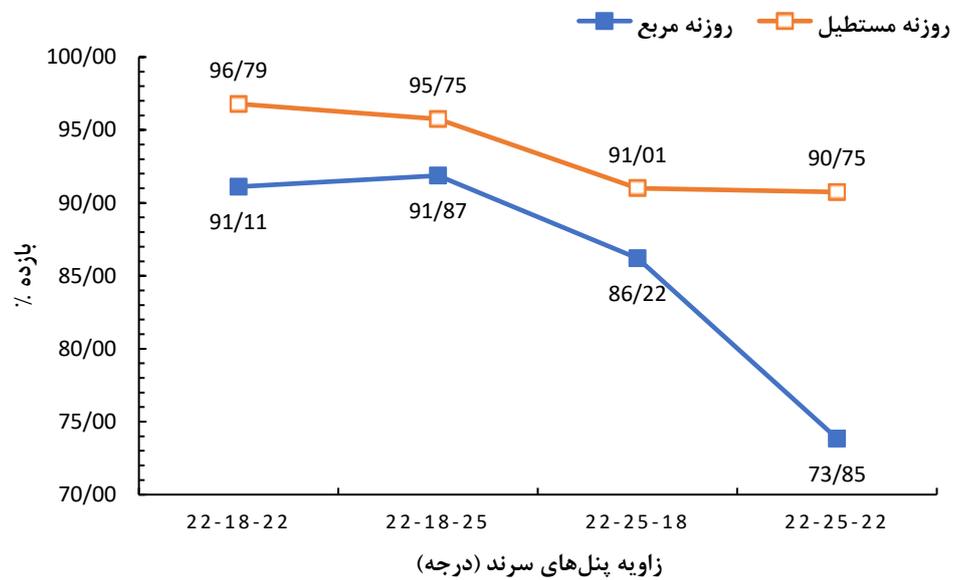


شکل ۴-۱۳- تأثیر شکل روزنه بر بازدهی سرد (زاویه پنل اول ۱۸ درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر).

با افزایش همزمان خوراک ورودی سرد و دامنه ارتعاش سرد از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر در سرد با روزنه مستطیلی، بازدهی کاهش جزئی داشته است این کاهش بازدهی در سرد با پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۲۵-۲۵ بیشتر از بقیه است. افزایش همزمان خوراک ورودی سرد و دامنه ارتعاش سرد از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر در بازدهی سرد با روزنه مربعی تأثیر مثبتی داشته به طوری که در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۱۸ و ۱۸-۲۵-۲۵-۱۸ بازدهی ۰/۷ درصد افزایش یافته و در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۱۸ و ۲۵-۲۲-۱۸ و ۲۲-۲۵-۱۸ بازدهی ۱/۱ درصد افزایش یافته است (شکل ۴-۱۴). با افزایش همزمان خوراک ورودی سرد و دامنه ارتعاش سرد از ۲ به ۵ میلی‌متر اختلاف بازدهی سرد با روزنه مربعی و مستطیلی کاهش یافته و در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۱۸ و ۱۸-۲۵-۱۸ تقریباً برابر می‌باشد. به طور کلی افزایش همزمان خوراک ورودی سرد و دامنه ارتعاش سرد از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر تأثیری بر بازدهی سرد با روزنه مستطیلی نداشته و با افزایش زاویه پنل‌های سرد بازدهی کاهش می‌یابد و در سرد با روزنه مربعی در بعضی از پنل‌ها تأثیر مثبت داشته است (۴-۱۵).



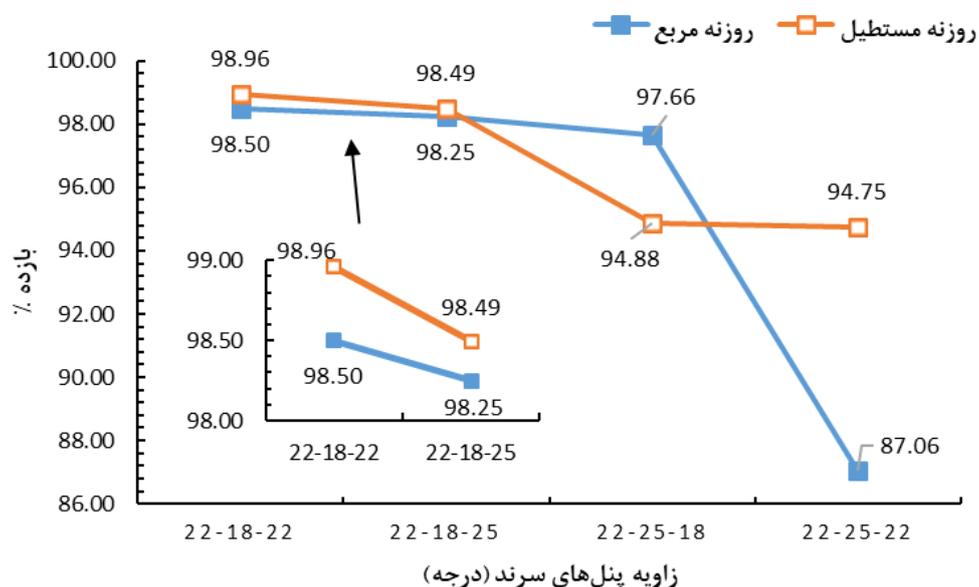
شکل ۴-۱۴- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سرند (زاویه پنل اول ۲۲ درجه، خوراک او دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر).



شکل ۴-۱۵- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سرند (زاویه پنل اول ۲۲ درجه، خوراک او دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر).

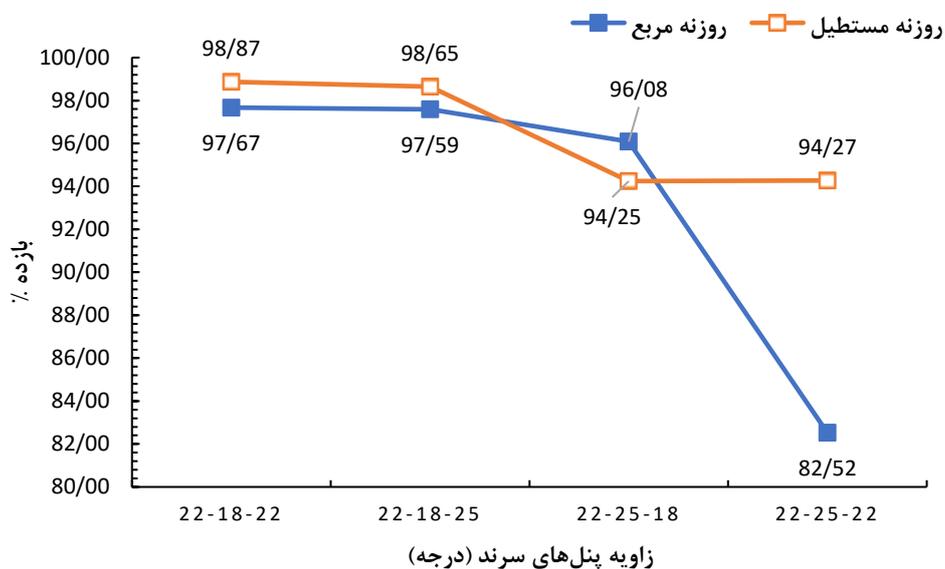
با افزایش زاویه پنل اول سرد از ۱۸ به ۲۲ درجه، بازدهی سرد با روزنه مستطیلی کاهش پیدا کرده که در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۵-۲۲ و ۲۲-۲۵-۲۲، میزان کاهش ۶ درصد می‌باشد (شکل ۴-۱۶). در سرد با روزنه مربعی افزایش زاویه پنل اول سرد بجز در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۱۸-۲۵، تأثیر منفی بر بازدهی سرد داشته است. کاهش در بازدهی سرد در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۲۵-۲۲، ۱۷ درصد می‌باشد. در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۵-۲۲، بازدهی سرد با روزنه مربعی از روزنه مستطیلی بیشتر است.

با افزایش دامنه ارتعاش سرد از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر، بازدهی سرد با روزنه مستطیلی در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۱۸-۲۲ و ۲۵-۱۸-۲۲ افزایش و در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۵-۲۲ و ۲۲-۲۵-۲۲ کاهش پیدا کرده است (شکل ۴-۱۷). در سرد با روزنه مربعی با افزایش دامنه ارتعاش سرد از ۲ به ۵ میلی‌متر بازدهی سرد به طور کلی ۵ درصد کاهش پیدا کرده است. با افزایش دامنه ارتعاش سرد از ۲ به ۵ میلی‌متر، اختلاف بازدهی بین سرد با روزنه مستطیلی و سرد با روزنه مربعی افزایش پیدا کرده.



شکل ۴-۱۶- تأثیر شکل روزنه بر بازدهی سرد (زاویه پنل اول ۲۲ درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر).

افزایش خوراک ورودی سرندها در پنل اول با زاویه ۲۲ درجه، باعث افزایش بازدهی سرندها با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی شده است و اختلاف بازدهی بین روزنه مربعی و مستطیلی در پنلهایی با زاویه ۲۲-۱۸-۲۵-۲۲ و ۲۲-۱۸-۲۵ بسیار کم می‌باشد. در پنلهایی با زاویه ۲۲-۲۵-۱۸، بازدهی سرندها با روزنه مستطیلی کاهش ۴ درصدی داشته و برای سرندها با روزنه مربعی مقدار کاهش زیاد نبوده و بازدهی سرندها با روزنه مربعی از سرندها با روزنه مستطیلی بیشتر شده است. در پنلهایی با زاویه ۲۲-۲۵-۲۲، بازدهی سرندها با روزنه مستطیلی تقریباً ثابت بوده و برای سرندها با روزنه مربعی بازدهی ۱۰ درصد کاهش پیدا کرده است.

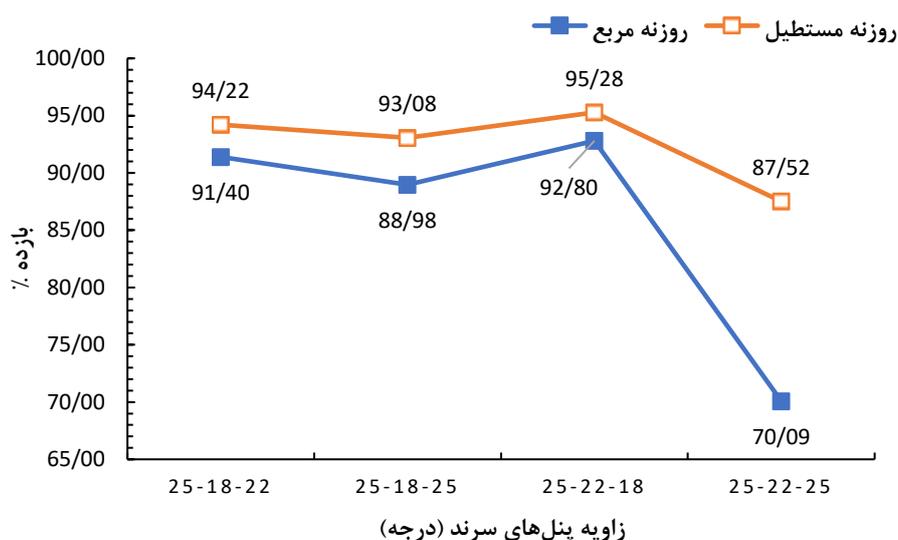


شکل ۴-۱۷- تاثیر شکل روزنه بر بازدهی سرندها (زاویه پنل اول ۲۲ درجه، خوراک ۲ دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر).

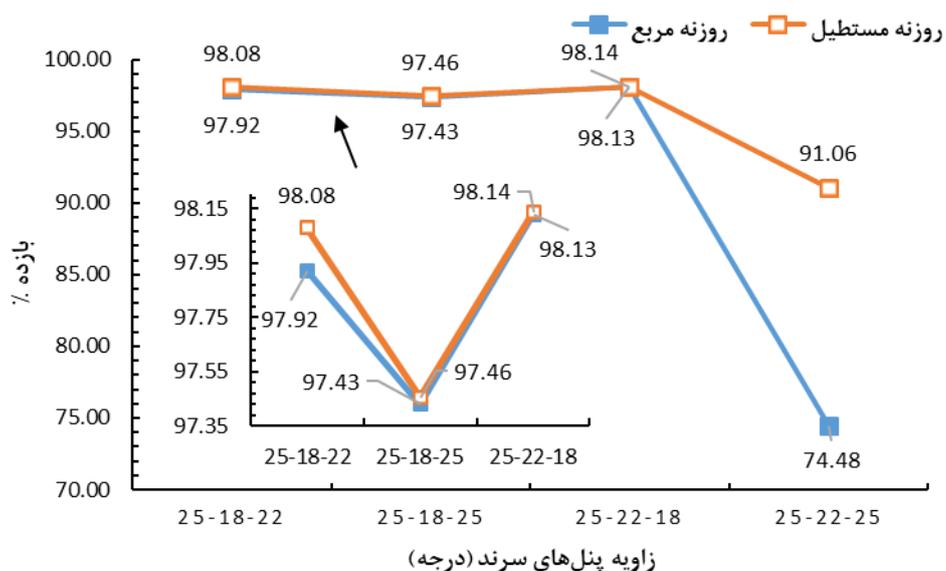
افزایش همزمان خوراک ورودی و دامنه ارتعاش سرندها از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر باعث افزایش بازدهی سرندها با روزنه مستطیلی در پنلهایی با زاویه ۲۲-۱۸-۲۵ و ۲۲-۱۸-۲۵ و کاهش بازدهی سرندها با روزنه مستطیلی در پنلهایی با زاویه ۲۲-۲۵-۱۸ و ۲۲-۲۵-۲۲ شده است.

در سرندها با روزنه مربعی، افزایش همزمان خوراک ورودی و دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر باعث کاهش بازدهی شده است همچنین افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر باعث افزایش اختلاف بین بازدهی

سرندها با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی شده است که این اختلاف در کمترین حالت ۲ درصد می‌باشد (شکل ۱۸-۴ و ۱۹-۴). بیشترین تأثیر افزایش دامنه ارتعاش سرندها از ۲ به ۵ میلی‌متر بر بازدهی سرندها با روزنه مربعی و پنلهایی با زاویه ۲۲-۲۵-۲۲ و کمترین تأثیر افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر بر بازدهی سرندها با روزنه مستطیلی و پنلهایی با زاویه ۲۲-۱۸-۲۲ می‌باشد.



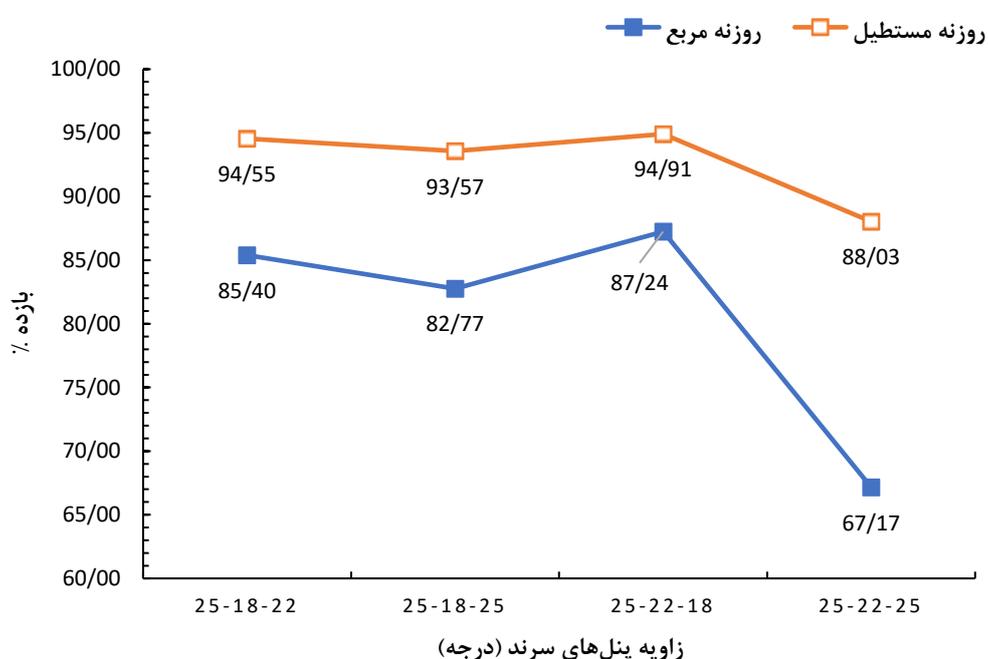
شکل ۱۸-۴- تأثیر شکل روزنه بر بازدهی سرندها (زاویه پنل اول ۲۵ درجه، خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر).



شکل ۱۹-۴- تأثیر شکل روزنه بر بازدهی سرندها (زاویه پنل اول ۲۵ درجه، خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر).

با افزایش زاویه پنل اول به ۲۵ درجه، بازدهی سرد با روزنه مستطیلی به جز در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-
 ۱۸-۲۲، کاهش می‌یابد. بازدهی سرد با روزنه مستطیلی در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۱۸، افزایش یافته و در
 سرد با روزنه مربعی کاهش یافته است همچنین افزایش زاویه پنل اول به ۲۵ درجه باعث افزایش اختلاف
 بازدهی بین سرد با روزنه مربعی و مستطیلی شده است. اختلاف بازدهی سرد با روزنه مستطیلی و مربعی در
 پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۲۵ به بیشترین حد (۱۷ درصد) رسیده است که تأثیر منفی افزایش زاویه پنل‌های
 سرد از ۲۲ به ۲۵ درجه در سرد با روزنه مربعی را نشان می‌دهد (شکل ۴-۲۰).

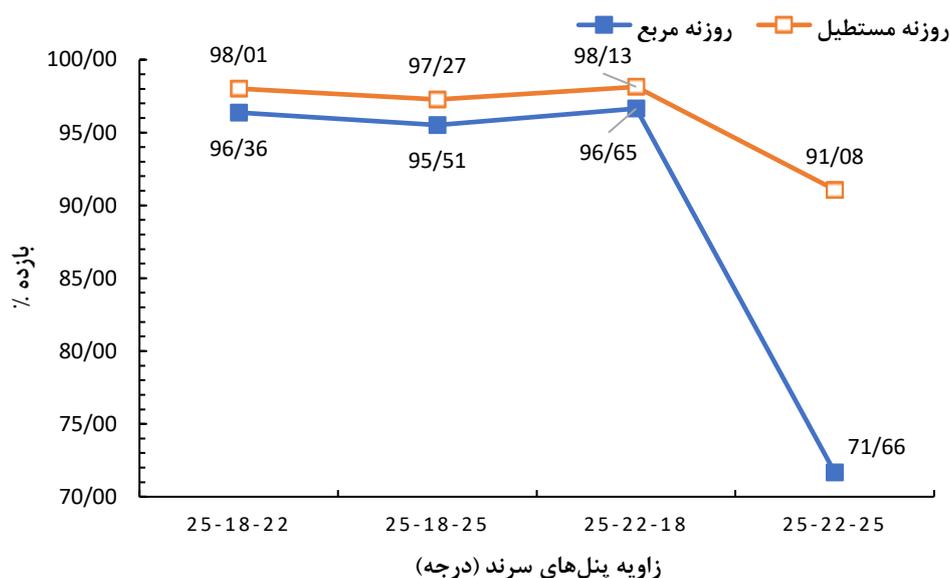
افزایش دامنه ارتعاش سرد از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر باعث افزایش بازدهی سرد با روزنه مربعی و
 مستطیلی شده همچنین اختلاف بازدهی سرد با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی به در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-
 ۱۸-۲۲، ۲۵-۱۸-۲۵ و ۲۵-۲۲-۱۸ بسیار کم شده و تقریباً برابر می‌باشد (شکل ۴-۲۱). بیشترین اختلاف
 بازدهی بین سرد با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۲۵ می‌باشد. افزایش دامنه



شکل ۴-۲۰- تأثیر شکل روزنه بر بازدهی سرد (زاویه پنل اول ۲۵ درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر).

ارتعاش سردند از ۲ به ۵ میلی‌متر باعث کاهش تأثیر زاویه پنل‌های سردند شده به طوری که اختلاف بازدهی پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۱۸-۲۲، ۲۵-۲۵-۱۸ و ۲۵-۲۲-۱۸ در سردند با روزنه مستطیلی و مربعی بسیار جزئی می‌باشد (شکل ۴-۲۱).

افزایش خوراک ورودی در سردند با روزنه مستطیلی بجز در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۱۸، باعث افزایش ۰/۵ درصدی در بازدهی شده و در سردند با روزنه مربعی افزایش خوراک ورودی باعث کاهش ۵ درصدی در بازدهی سردند شده است همچنین افزایش خوراک ورودی سردند باعث افزایش اختلاف بازدهی بین سردند با روزنه مربعی و سردند با روزنه مستطیلی شده است که کمترین اختلاف بازدهی بین روزنه مستطیلی و روزنه ربعی، ۷/۵ درصد و بیشترین اختلاف بازدهی در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۲۵ بوده که مقدار آن ۲۱ درصد می‌باشد.



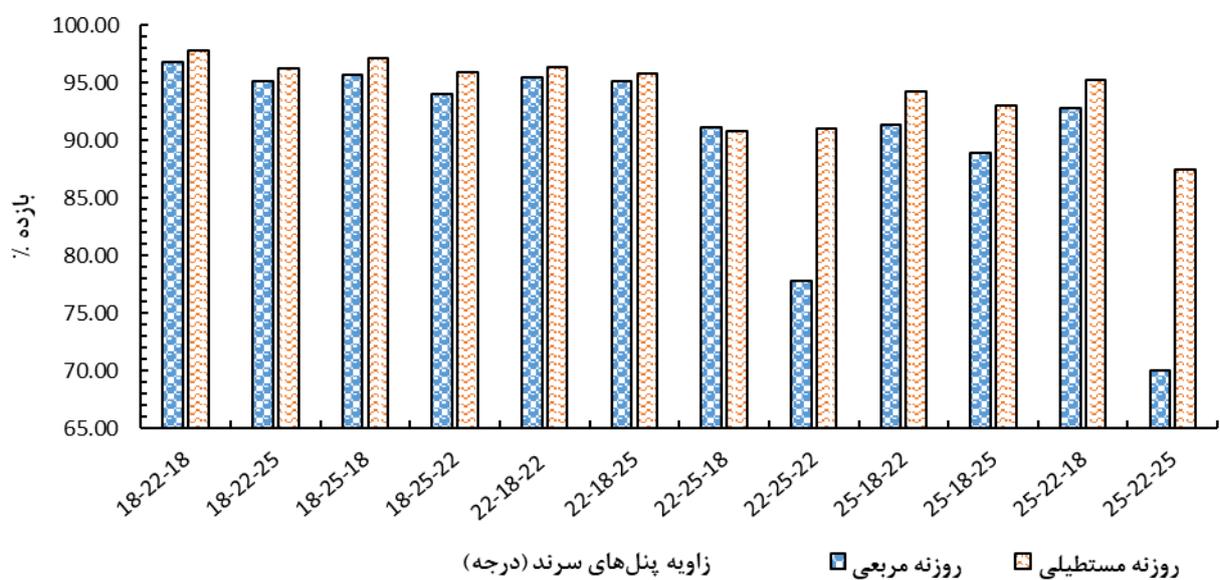
شکل ۴-۲۱- تأثیر شکل روزنه بر بازدهی سردند (زاویه پنل اول ۲۵ درجه، خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر).

افزایش دامنه ارتعاش سردند از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر باعث افزایش بازدهی سردند با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی شده است. در سردند با روزنه مستطیلی با افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر، بازدهی سردند به طور متوسط ۴ درصد افزایش یافته همچنین در سردند با روزنه مربعی با افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به

۵ میلی‌متر، بازدهی سرد به طور متوسط ۱۰ درصد افزایش یافته است. افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر باعث کاهش اختلاف بازدهی سرد با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی به‌ویژه در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۱۸، ۲۲-۱۸، ۲۵-۱۸-۲۵ و ۱۸-۲۲-۲۵ شده است. کمترین اختلاف بازدهی سرد با روزنه مستطیلی و روزنه مربعی در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۲۵ و بیشترین اختلاف بازدهی سرد با روزنه مستطیلی و روزنه مربعی در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۲۵ می‌باشد. افزایش زاویه پنل‌های سرد در روزنه مستطیلی تأثیر کمتری داشته به طوری که اختلاف بین بازدهی در حد ۵ درصد است ولی در سرد با روزنه مربعی این اختلاف ۲۳ درصد است.

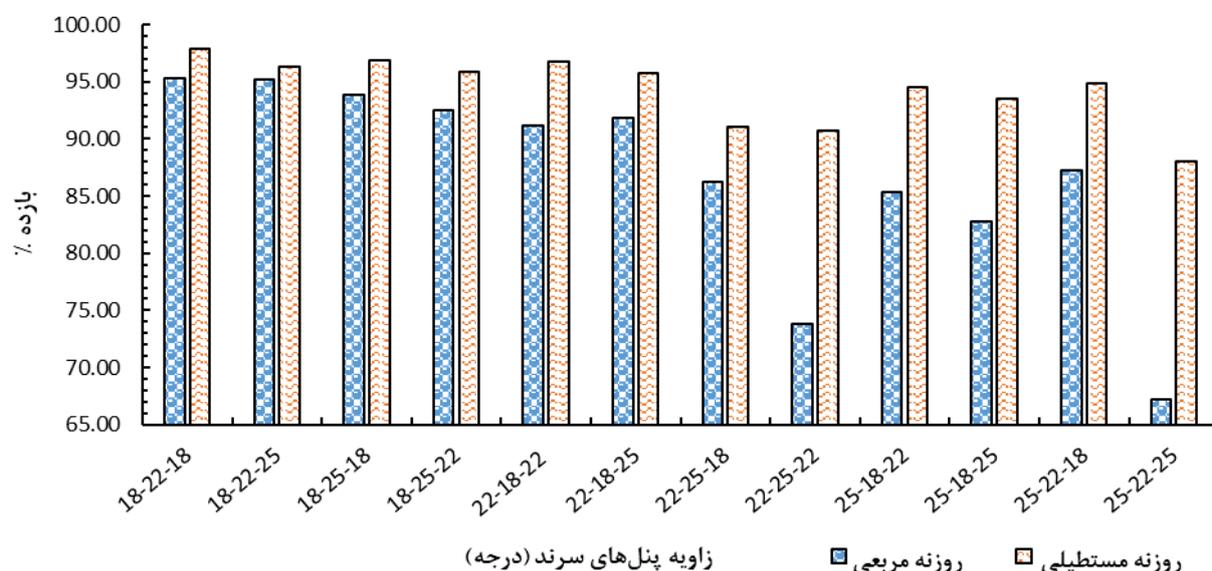
۴-۴- تأثیر زاویه پنل‌ها بر بازدهی سرد

زاویه پنل‌ها در سرد سه صفحه‌ای یکی از پارامترهای مهم تأثیر گذار بر بازدهی سرد و همچنین سرعت عملیات سردکنی می‌باشد. در صنعت معمولاً زاویه پنل‌های سرد صنعتی بین ۱۵ تا ۲۷ درجه است. در این پژوهش سه زاویه ۲۲، ۱۸ و ۲۵ درجه برای پنل‌های سرد (شکل ۴-۲۲ تا ۴-۲۵) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیرات متقابل افزایش خوراک و دامنه ارتعاش سرد نیز بررسی شد.



شکل ۴-۲۲- تأثیر زاویه پنل‌ها بر بازدهی سرد (خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر).

در سردند با روزنه مربعی با افزایش زاویه پنل‌های سردند، بازدهی کاهش پیدا کرده است. کمترین میزان بازدهی سردند با روزنه مربعی در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۲۵-۲۲ و ۲۵-۲۲-۲۵ می‌باشد (۴-۲۳). در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۱۸-۲۵ و ۲۵-۲۲-۱۸ بازدهی کاهش اندکی داشته است. در سردند با روزنه مستطیلی، با افزایش زاویه پنل‌های سردند بازدهی کاهش اندکی داشته است. کمترین میزان بازدهی سردند با روزنه مستطیلی در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۲۵ می‌باشد. اگرچه با افزایش زاویه پنل‌های سردند بازدهی سردند با روزنه مستطیلی

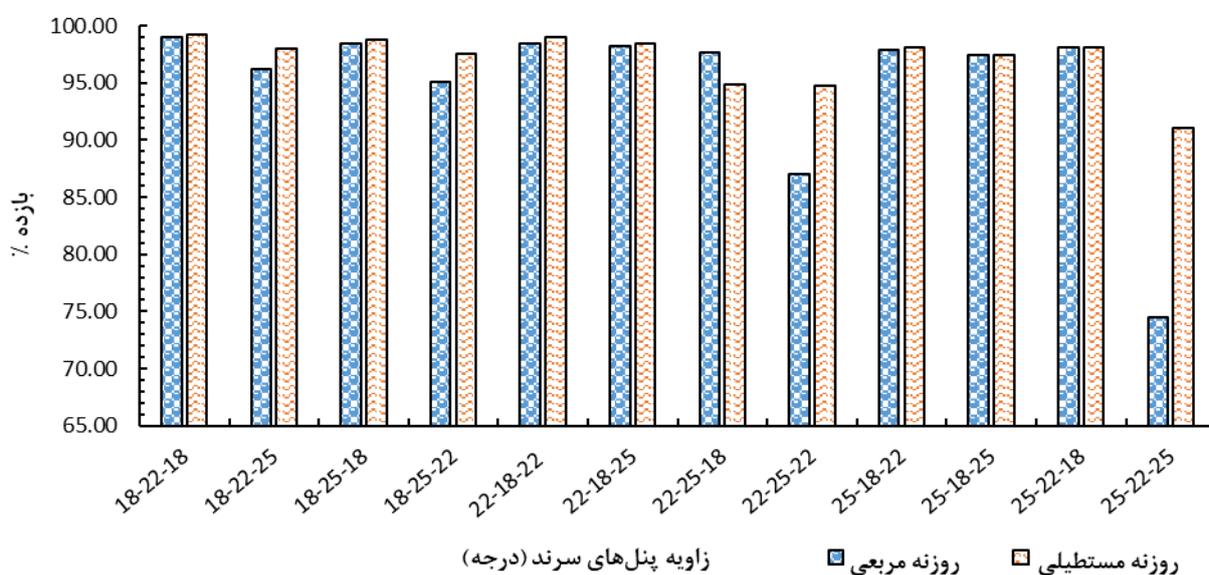


شکل ۴-۲۳- تاثیر زاویه پنل‌ها بر بازدهی سردند (خوراک ۱ و دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر).

کاهش پیدا کرده و همچنان بازدهی در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۱۸-۲۵ و ۲۵-۲۲-۱۸ مطلوب می‌باشد. بیشترین اختلاف بازدهی سردند با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۲۵-۲۲ و ۲۵-۲۲-۲۵ است. به طور کلی سردند با روزنه مستطیلی بازدهی بهتری نسبت به سردند با روزنه مربعی چه در پنل‌هایی با زاویه کم و چه با زاویه زیاد، داشته است. اختلاف زیاد بازدهی پنل‌های اول سردند با زاویه ۲۲ و ۲۵ درجه در سردند با روزنه مربعی نشان دهنده حساسیت بالای آن به افزایش زاویه پنل‌های سردند دارد.

با افزایش دامنه ارتعاش سردند از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر بازدهی سردند با روزنه مستطیلی به طور کلی افزایش پیدا کرده ولی در سردند با روزنه مربعی افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر تأثیر منفی بر بازدهی

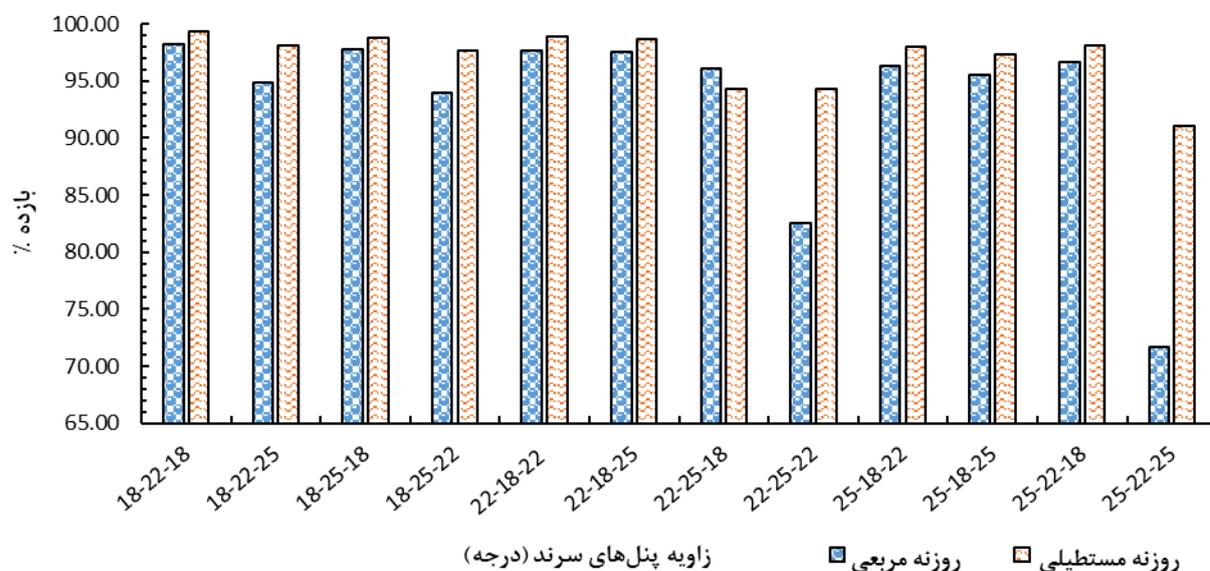
سرندها داشته است (شکل ۴-۲۴). همچنین با افزایش دامنه ارتعاش سرندها از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر اختلاف بازدهی سرندها با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی افزایش یافته است که در پنلهایی با زاویه ۲۵-۲۲-۲۵ بیشترین اختلاف در بازدهی (تقریباً ۳۰ درصد) را دارا می‌باشد. در سرندها با روزنه مربعی، افزایش دامنه سرندها از ۲ به ۵ میلی‌متر تأثیر بیشتری در پنلهای اول با زاویه ۲۲ و ۲۵ درجه نسبت به زاویه ۱۸ درجه داشته که این تأثیر به صورت کاهشی می‌باشد.



شکل ۴-۲۴- تأثیر زاویه پنل‌ها بر بازدهی سرندها (خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر).

افزایش خوراک ورودی سرندها باعث افزایش بازدهی سرندها با روزنه مربعی و مستطیلی شده است. افزایش بازدهی در سرندها با روزنه مربعی بیشتر بوده به طوری که اختلاف بازدهی سرندها با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی بسیار کاهش یافته و تقریباً برابر می‌باشند. در پنلهایی با زاویه ۱۸-۲۵-۲۲ و ۱۸-۲۲-۲۵، بازدهی سرندها با روزنه مربعی بیشتر از روزنه مستطیلی است. سرندها با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی در پنلهایی با زاویه ۲۲-۲۵ و ۲۲-۲۵ بیشترین اختلاف را دارا می‌باشند همچنین در این پنل‌ها مقادیر بازدهی سرندها با روزنه مربعی نسبت به بقیه زاویه‌ها، اختلاف زیادی دارد. با افزایش زاویه پنل‌های سرندها، تأثیر افزایش خوراک بر بازدهی بیشتر شده به طوری که در پنلهای اول با زاویه ۱۸ درجه، با افزایش خوراک در سرندها با روزنه

مستطیلی بازدهی ۴ درصد افزایش یافته ولی در پنل‌های اول با زاویه ۲۲ و ۲۵ درجه با افزایش خوراک، بازدهی ۸ تا ۱۲ درصد افزایش می‌یابد، در سردن با روزنه مربعی نیز در پنل‌های اول با زاویه ۱۸ درجه، با افزایش خوراک ورودی، بازدهی ۵ درصد افزایش یافته و در پنل‌های اول با زاویه ۲۲ و ۲۵ درجه با افزایش خوراک، بازدهی ۱۰ تا ۱۹ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۴-۲۵).



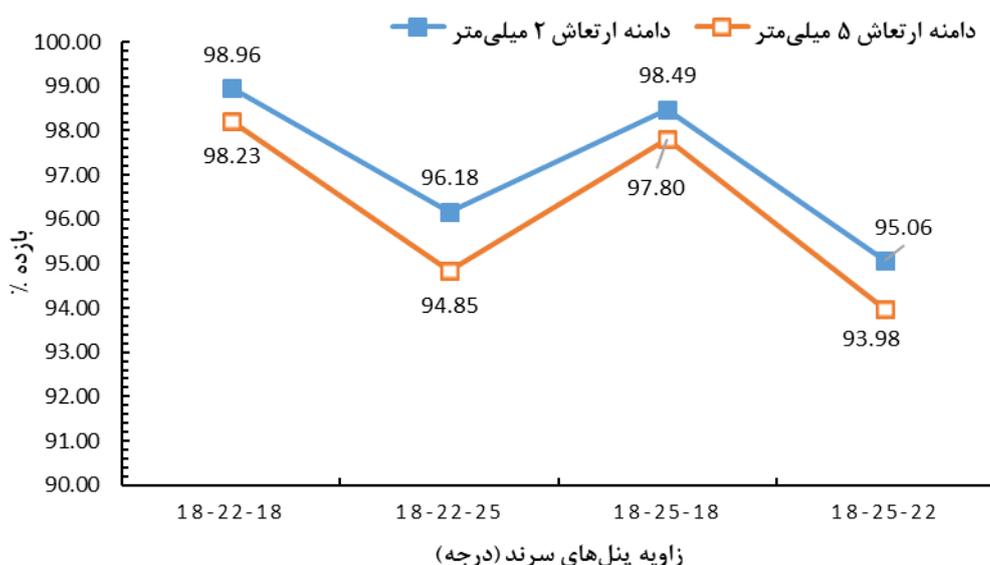
شکل ۴-۲۵- تاثیر زاویه پنل‌ها بر بازدهی سردن (خوراک ۲ و دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر).

افزایش همزمان دامنه ارتعاش از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر و خوراک ورودی سردن در سردن با روزنه مستطیلی باعث افزایش بازدهی سردن به خصوص در پنل‌های اول با زاویه ۲۲ و ۲۵ درجه شده است. در سردن با روزنه مربعی با افزایش همزمان دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر و خوراک ورودی، بازدهی سردن مقدار جزئی کاهش یافته، مقادیر بازدهی در پنل‌های اول با زاویه ۲۲ و ۲۵ درجه، کاهش بیشتری یافته است. با افزایش همزمان دامنه ارتعاش سردن از ۲ به ۵ میلی‌متر و خوراک ورودی سردن، اختلاف بازدهی سردن با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی بیشتر شده و بجز در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۲۵-۱۸ درجه، سردن با روزنه مستطیلی بازدهی بیشتری داشته است. اختلاف بازدهی بین سردن با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی بجز در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۲۵-۲۲ و ۲۵-۲۲-۲۵ درجه، بین ۰/۲ تا ۳ درصد می‌باشد. در پنل‌های اول با زاویه ۱۸ درجه

اختلاف بازدهی سرند با روزنه مستطیلی و روزنه مربعی نسبت به پنل‌های اول با زاویه ۲۲ درجه بیشتر می‌باشد.

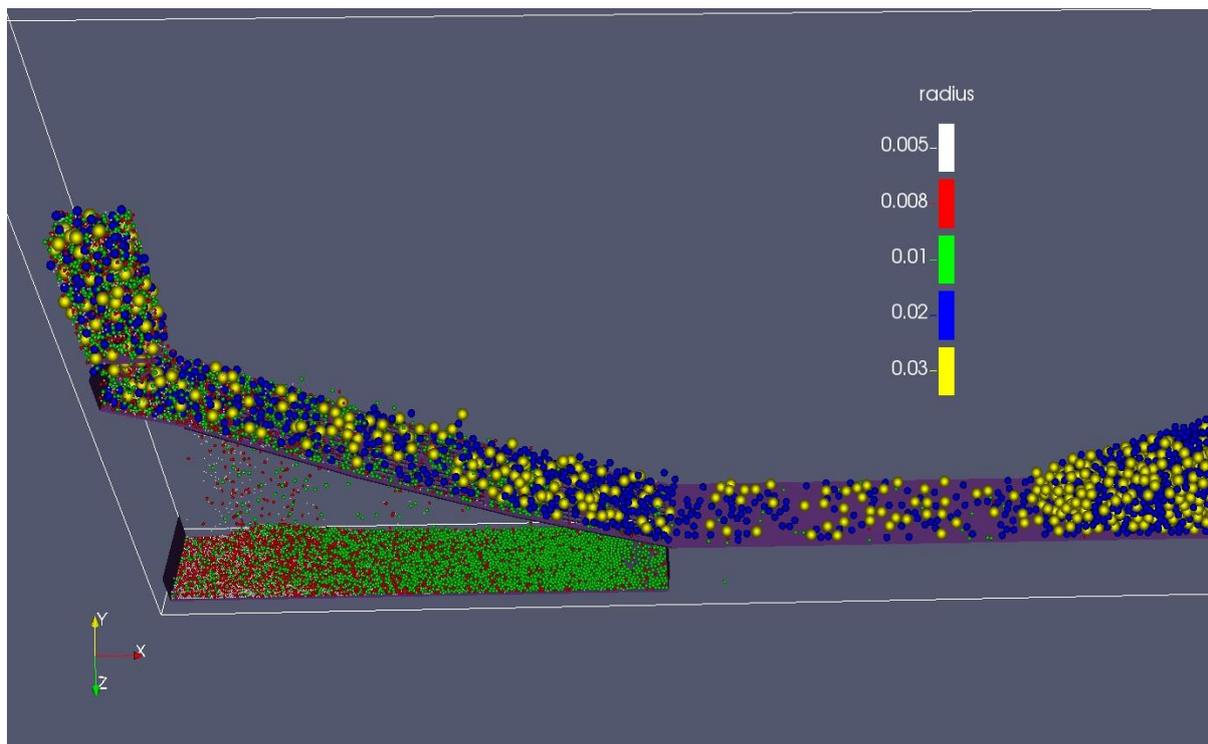
۴-۵- تأثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرند

در این پژوهش مقادیر ۲ (شکل ۴-۲۷) و ۵ میلی‌متر (شکل ۴-۲۸) برای دامنه ارتعاش سرند در نظر گرفته شد و تأثیر آن‌ها بر پنل‌های سرند با شیب‌های متغییر و شکل‌های مختلف روزنه سرند بررسی شد (شکل‌های ۴-۲۶ تا ۴-۳۹). همچنین تأثیرات متقابل افزایش خوراک ورودی و افزایش زاویه پنل‌های سرند با دامنه ارتعاش نیز بررسی شد.

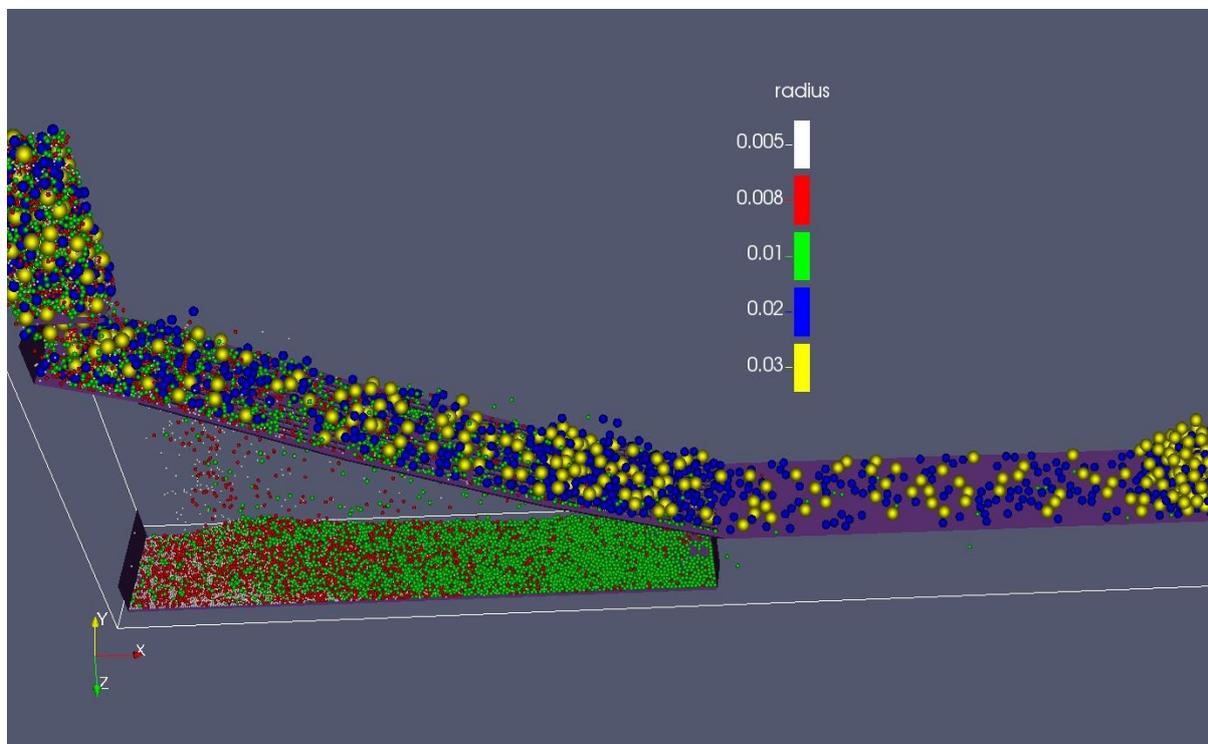


شکل ۴-۲۶- تأثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرند (خوراک ۱ و روزنه مربعی).

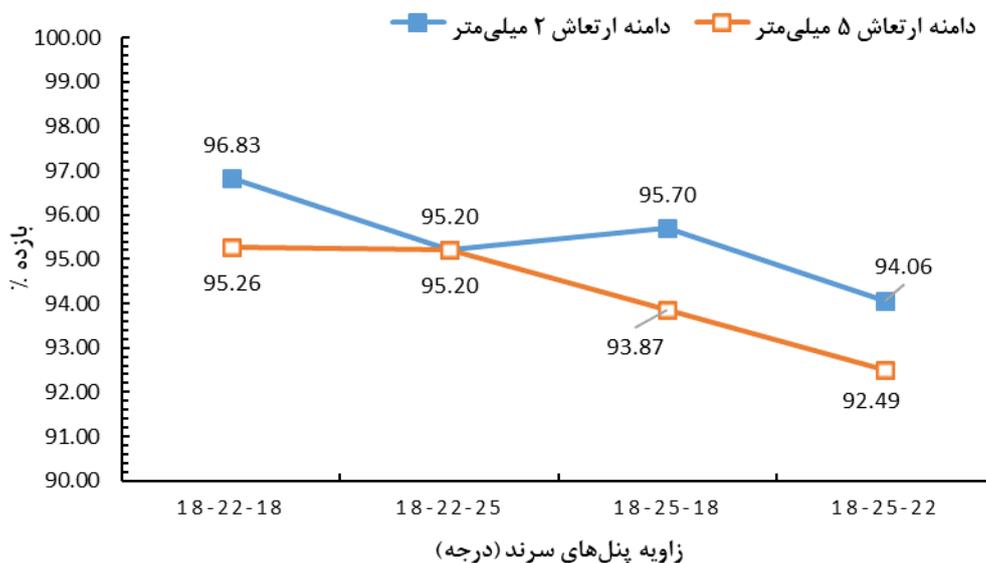
سرند با روزنه مربعی در دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر بازدهی بهتری نسبت به دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر داشته و افزایش دامنه ارتعاش سرند از ۲ به ۵ میلی‌متر باعث کاهش بازدهی در سرند با روزنه مربعی شده است (شکل ۴-۲۹). افزایش زاویه پنل‌های سرند از ۱۸-۲۲-۱۸ درجه به ۲۵-۲۲-۱۸ درجه، در دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر باعث کاهش بازدهی سرند شده و اختلاف بازدهی دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر افزایش پیدا کرده است. بهترین بازدهی سرند با روزنه مربعی در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۱۸، ۱۸-۲۵-۱۸ درجه و دامنه



شکل ۴-۲۷- شبیه‌سازی سرند سه صفحه‌ای با شکل روزنه مربعی و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر.



شکل ۴-۲۸- شبیه‌سازی سرند سه صفحه‌ای با شکل روزنه مربعی و دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر.

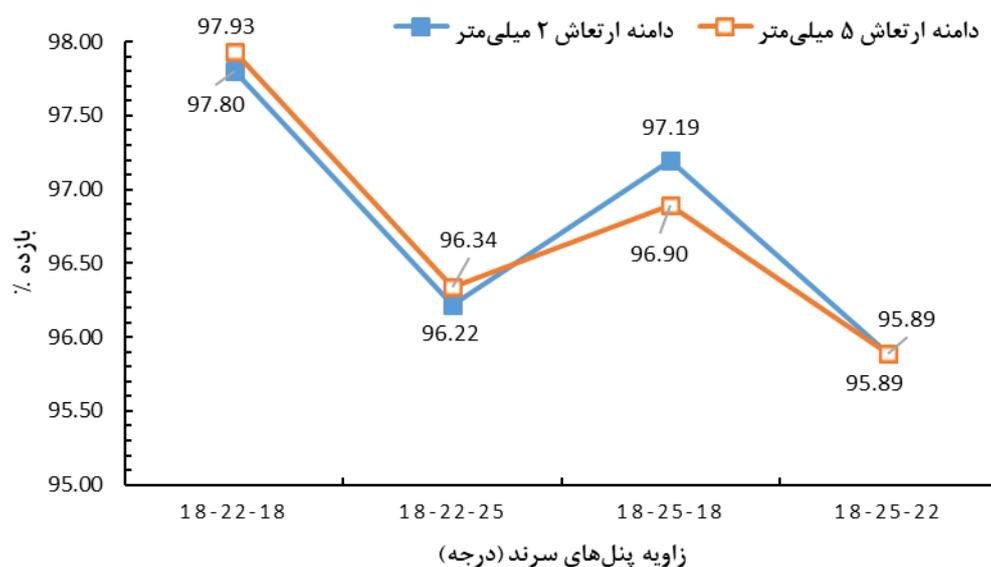


شکل ۴-۲۹- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرند (خوراک ۲ و روزنه مربعی).

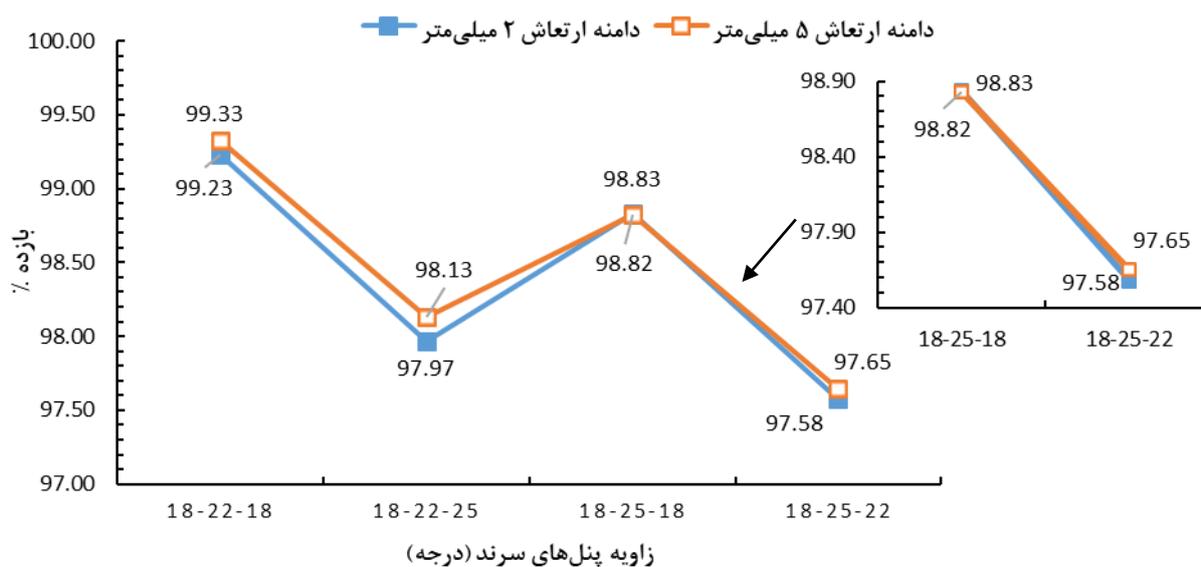
ارتعاش ۲ میلی‌متر می‌باشد. افزایش زاویه پنل‌های سرند از ۱۸-۲۵-۱۸ درجه به ۲۲-۲۵-۱۸ درجه باعث کاهش زیادی در بازدهی سرند در هر دو دامنه ارتعاش شده است. به طور کلی اختلاف بازدهی سرند در دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر، بین ۰/۷ تا ۲ درصد می‌باشد. پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۲۵-۱۸ درجه، کمترین بازدهی سرند در هر دو دامنه ارتعاش سرند داشته است.

با افزایش خوراک ورودی در سرند با روزنه مربعی بازدهی سرند در هر دو دامنه ارتعاش کاهش یافته و در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۱۸ درجه، بازدهی سرند در دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر برابر شده است. همچنین روند بازدهی در دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر تغییر کرده به طوری که با خوراک ورودی یک، افزایش زاویه پنل‌ها از ۱۸-۲۲-۱۸ به ۲۵-۲۲-۱۸ درجه باعث کاهش بازدهی سرند و از ۲۵-۲۲-۱۸ به ۱۸-۲۵-۱۸ درجه باعث افزایش بازدهی سرند شده است ولی خوراک ورودی دو، با افزایش زاویه پنل‌ها از ۱۸-۲۲-۱۸ به ۱۸-۲۲-۲۵ درجه، بازدهی سرند تقریباً ثابت مانده است و با تغییر زاویه پنل‌های سرند از ۲۵-۲۲-۱۸ به ۱۸-۲۵-۱۸ درجه، بازدهی سرند کاهش یافته است (شکل ۴-۳۰). با افزایش خوراک اختلاف بازدهی سرند در دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۱۸ و ۱۸-۲۵-۱۸ درجه افزایش پیدا کرده و به ۲ درصد رسیده است.

با افزایش خوراک ورودی سردند میزان اختلاف بازدهی در پنل‌ها با زاویه‌های مختلف در هر دو دامنه ارتعاش کم شده که این میزان اختلاف برای دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر، تقریباً ۳ درصد (۱/۵ درصد کاهش نسبت به خوراک یک) و برای دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر، ۲/۸ درصد (۱/۵ درصد کاهش نسبت به خوراک یک) می‌باشد (شکل ۴-۳۱).



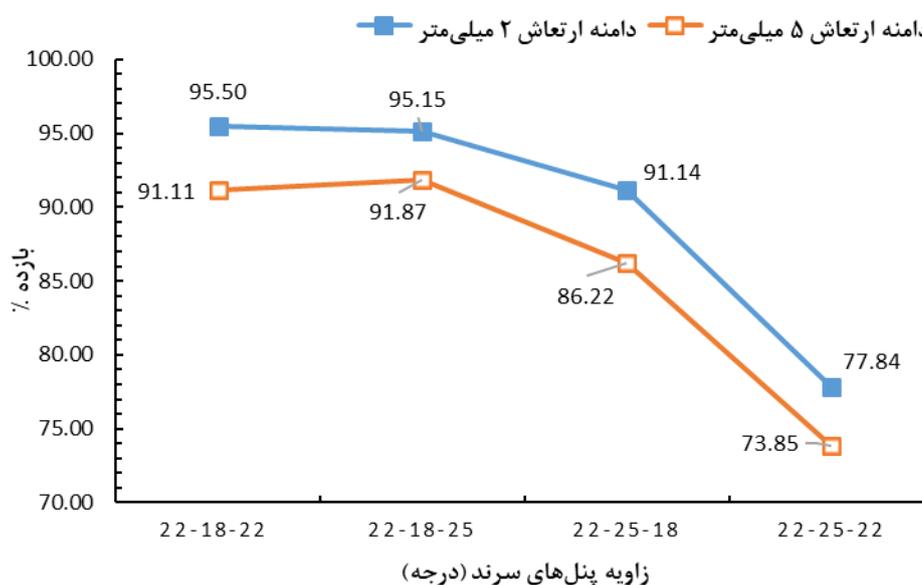
شکل ۴-۳۰- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۱ و روزنه مستطیلی).



شکل ۴-۳۱- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۲ و روزنه مستطیلی).

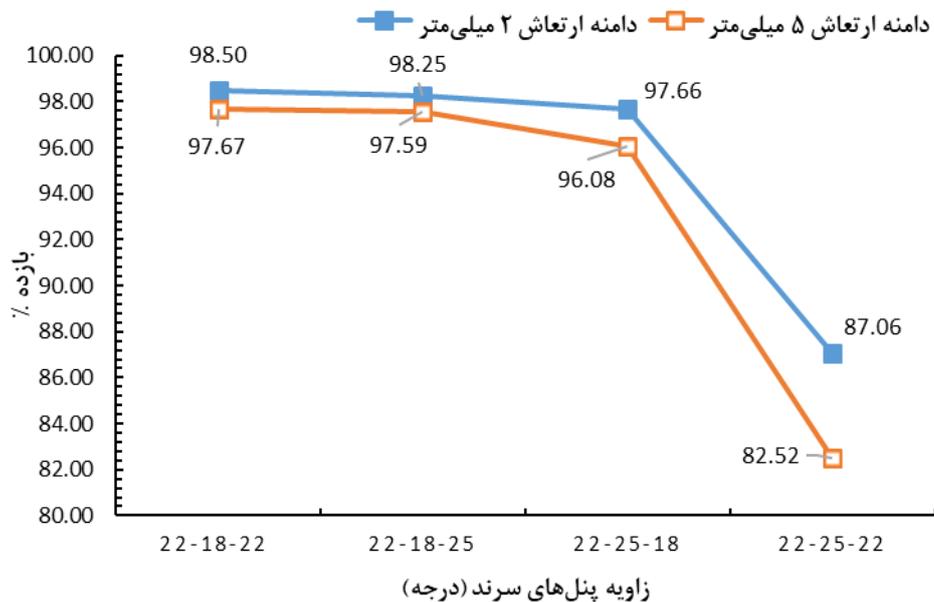
افزایش دامنه ارتعاش از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر در سردند با روزنه مستطیلی در پنل‌های اول با زاویه ۱۸ درجه بجز در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۵-۱۸ درجه، تأثیر چندانی نداشته و بازدهی سردند با دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر ۰/۱ درصد از سردند با دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر بیشتر است. در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۵-۱۸ درجه بازدهی دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر از ۵ میلی‌متر ۰/۳ درصد بیشتر است. به طور کلی با افزایش زاویه پنل‌های سردند بجز ۱۸-۲۵-۱۸ درجه، بازدهی سردند در هر دو دامنه ارتعاش کاهش یافته است (شکل ۴-۳۲).

با افزایش خوراک ورودی سردند بازدهی سردند در دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر، ۱/۲ تا ۲ درصد افزایش و اختلاف بازدهی بین دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر کاهش یافته است. با افزایش خوراک ورودی سردند در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۵-۱۸ درجه، بازدهی دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر افزایش یافته و تقریباً با بازدهی دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر برابر شده است (شکل ۴-۳۳).



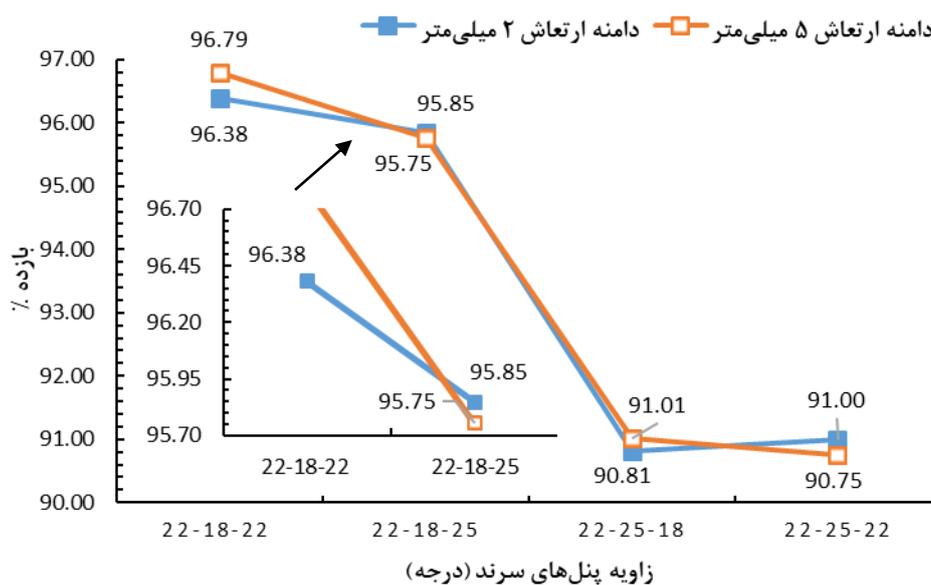
شکل ۴-۳۲- تأثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سردند (خوراک ۱ و روزنه مربعی).

افزایش زاویه پنل اول از ۱۸ به ۲۲ درجه باعث کاهش بازدهی سردند با روزنه مربعی در هر دو دامنه ارتعاش و افزایش اختلاف بازدهی بین دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر شده است (شکل ۴-۳۴). در این حالت



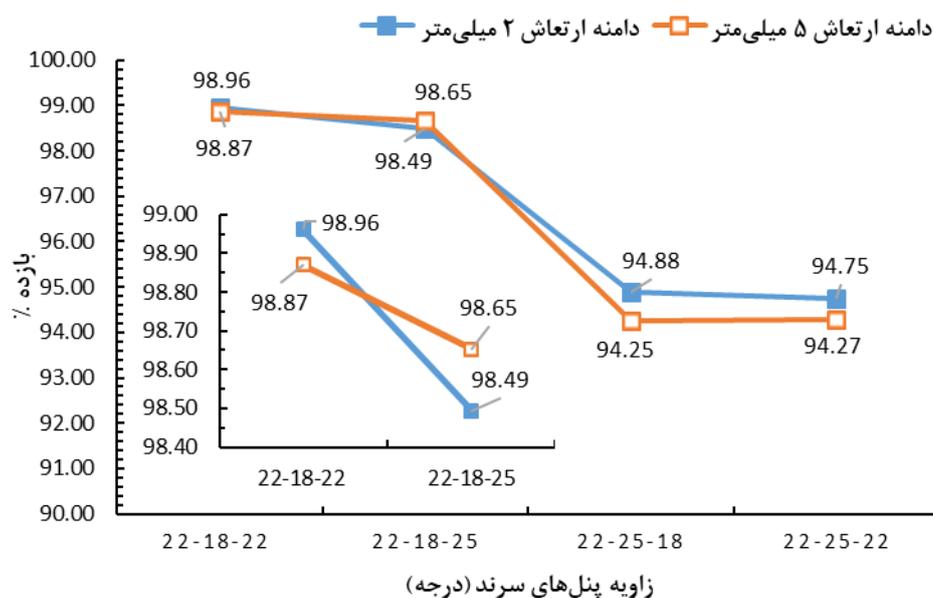
شکل ۴-۳۳- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرند (خوراک ۲ و روزنه مربعی).

بازدهی سرند با دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر به طور متوسط ۴ درصد بیشتر نسبت به دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر است. در دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر با تغییر زاویه پنل‌ها از ۲۲-۱۸-۲۲ درجه به ۲۵-۱۸-۲۲ درجه بازدهی سرند کاهش ولی در دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر با تغییر زاویه از ۲۲-۱۸-۲۲ درجه به ۲۵-۱۸-۲۲ درجه بازدهی سرند ۰/۷ درصد افزایش یافته است.



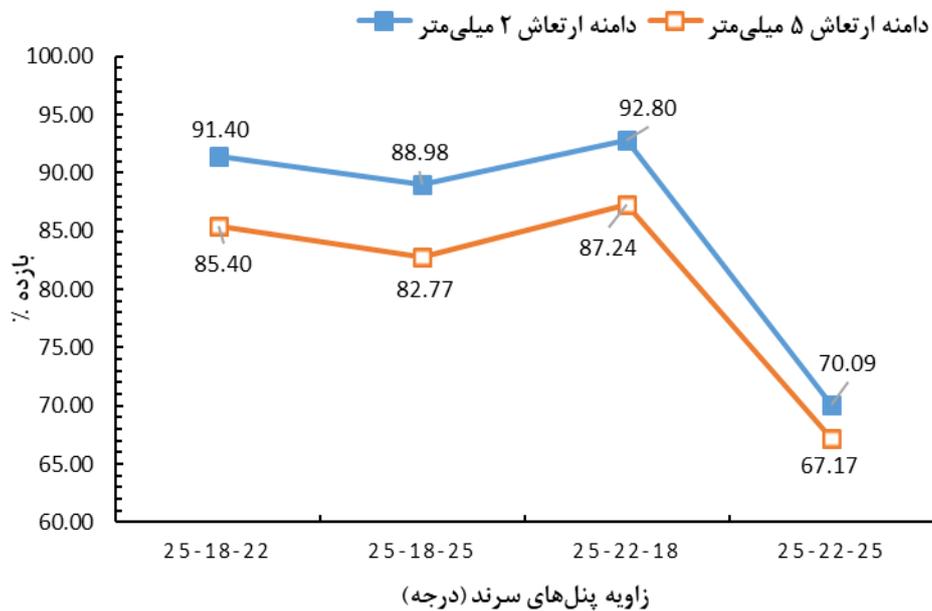
شکل ۴-۳۴- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرند (خوراک ۱ و روزنه مستطیلی).

با افزایش همزمان خوراک ورودی و زاویه پنل اول سرند، بازدهی در هر دو دامنه ارتعاش افزایش و اختلاف بازدهی بین دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر کاهش یافته است. با افزایش زاویه پنل‌های سرند، بازدهی روند نزولی داشته و در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۲۵-۲۲ درجه به حداقل خود می‌رسد. با افزایش زاویه پنل اول از ۱۸ درجه به ۲۲ درجه در سرند با روزنه مستطیلی، بازدهی در هر دو دامنه ارتعاش سرند کاهش یافته و اختلاف بازدهی بین دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر کم شده است. در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۱۸-۲۲ درجه و ۲۲-۲۵-۲۲ درجه، دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر بازدهی بهتری نسبت به دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر در سرند با روزنه مستطیلی داشته است (شکل ۴-۳۵).



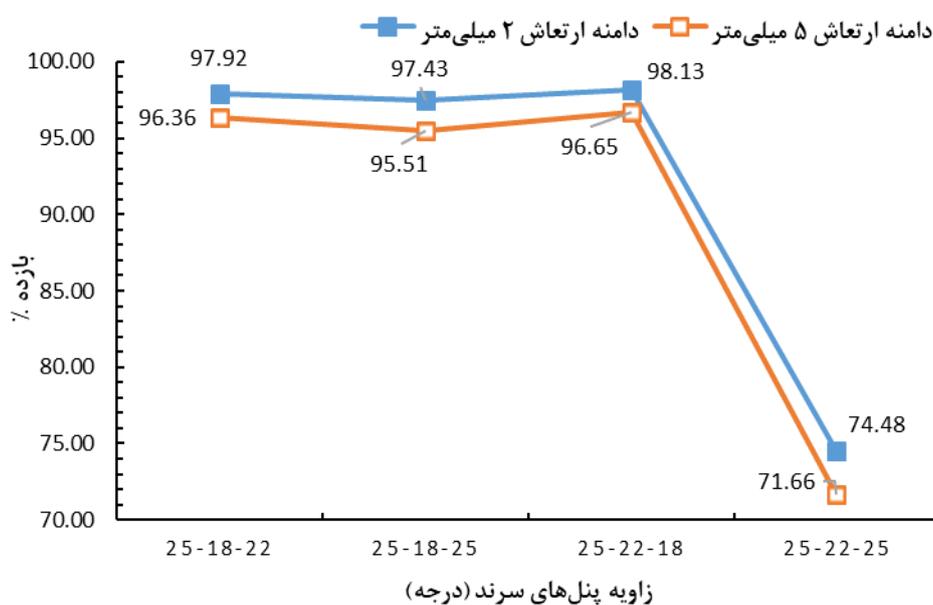
شکل ۴-۳۵- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرند (خوراک ۲ و روزنه مستطیلی).

افزایش همزمان خوراک ورودی باعث افزایش بازدهی سرند با روزنه مستطیلی در هر دو دامنه ارتعاش شده است. در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۱۸-۲۲ ، ۲۲-۲۵-۲۲ و ۱۸-۲۵-۲۲ درجه، دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر بازدهی بهتری نسبت به دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر داشته است (شکل ۴-۳۶). با افزایش خوراک ورودی سرند، اختلاف بازدهی بین دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر کاهش یافته و به طور متوسط ۰/۴ درصد می‌باشد.



شکل ۴-۳۶- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرند (خوراک ۱ و روزنه مربعی).

با افزایش زاویه پنل اول، بازدهی سرند با روزنه مربعی در هر دو دامنه ارتعاش کاهش و اختلاف بین بازدهی دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر به ۷ درصد رسیده است. در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۱۸ درجه، سرند در هر دو دامنه ارتعاش بیشترین بازدهی و در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۲۵ درجه، کمترین بازدهی را داشته است (شکل ۴-۳۷). در سرند با روزنه مربعی دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر بازدهی بهتری نسبت به دامنه ارتعاش



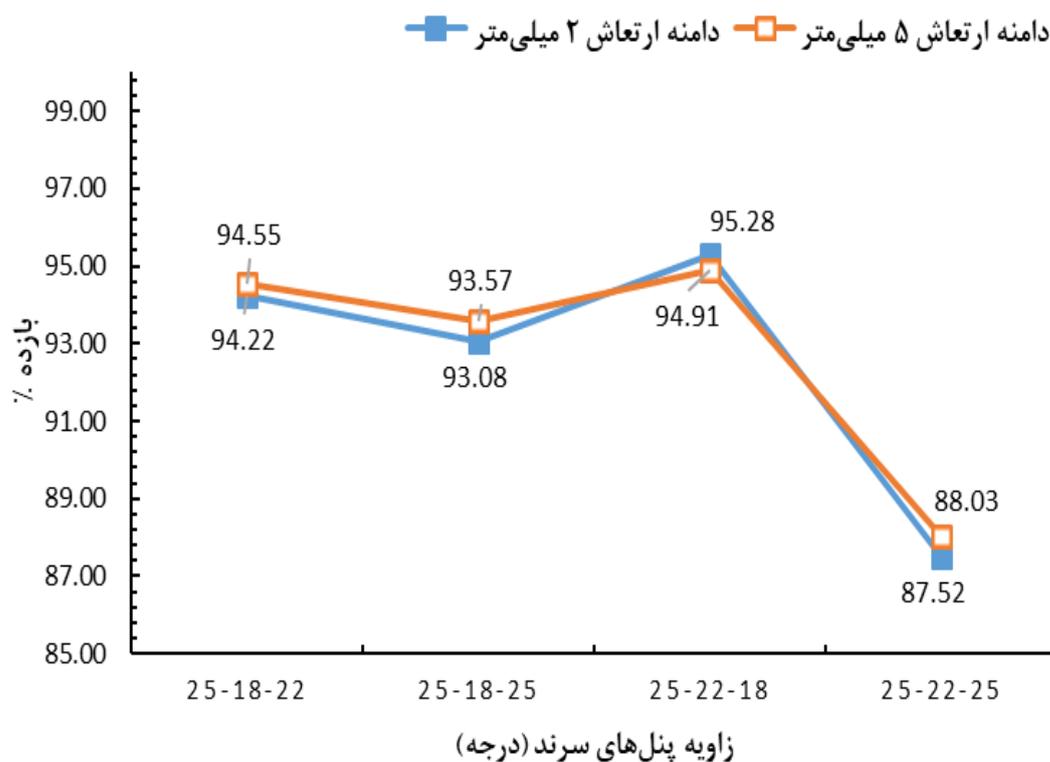
شکل ۴-۳۷- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرند (خوراک ۲ و روزنه مربعی).

۵ میلی‌متر داشته است. با افزایش زاویه پنل‌های سرد، بازدهی با دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر، حداکثر ۲۱ درصد و دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر ۱۸ درصد تغییرات داشته است.

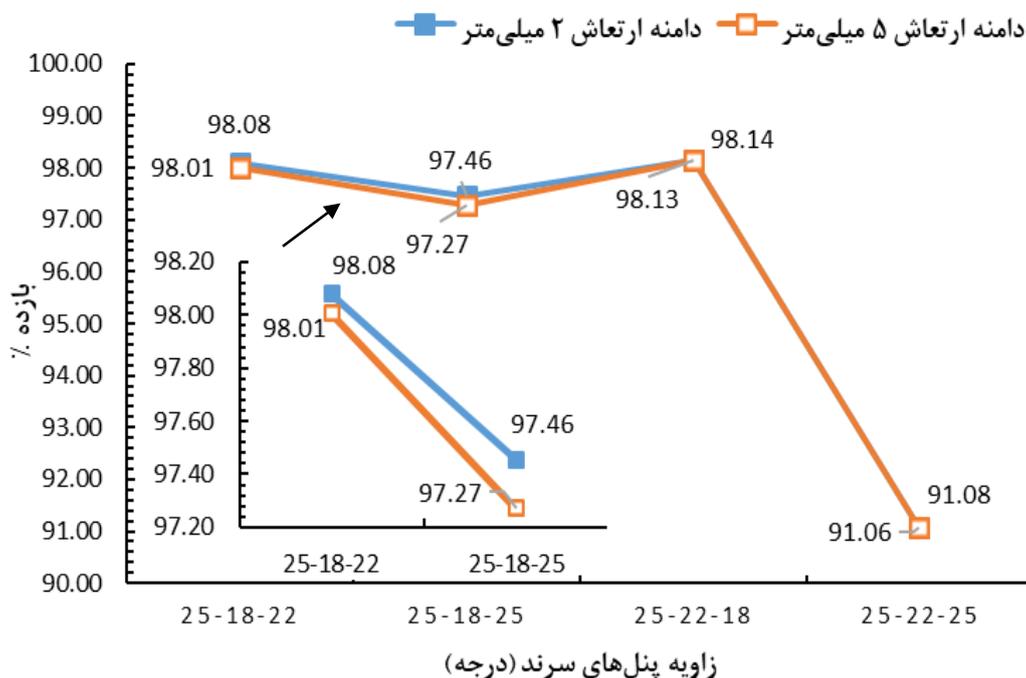
در پنل اول با زاویه ۲۵ درجه، افزایش خوراک ورودی باعث افزایش بازدهی سرد با روزنه مربعی در هر دو دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر شده است. دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر بازدهی بهتری نسبت به دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر داشته است و در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۱۸-۲۲ درجه، ۲۵-۱۸-۲۵ درجه و ۱۸-۲۲-۲۵ درجه دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر، ۲۵ درصد کاهش) داشته است. بیشترین بازدهی سرد با روزنه مربعی در دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر و پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۲۵ درجه است (شکل ۴-۳۸).

بازدهی سرد در هر دو دامنه ارتعاش، تقریباً برابر می‌باشد (شکل ۴-۳۹). در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-

۲۲-۲۵ درجه بازدهی سرد در هر دو دامنه ارتعاش کاهش شدید (دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر، ۲۳/۵ درصد



شکل ۴-۳۸- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرد (خوراک ۱ و روزنه مستطیلی).



شکل ۴-۳۹- تاثیر دامنه ارتعاش بر بازدهی سرند (خوراک ۲ و روزنه مستطیلی).

کاهش و افزایش زاویه پل اول از ۲۲ درجه به ۲۵ درجه در سرند با روزنه مستطیلی باعث کاهش بازدهی شده است. در سرند با روزنه مستطیلی دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر بجز در پل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۲۵ درجه، بازدهی بهتری نسبت به دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر داشته است. با افزایش همزمان خوراک ورودی و زاویه پل اول سرند با روزنه مستطیلی، دامنه ارتعاش ۲ و ۵ میلی‌متر بجز در پل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۵-۲۵ درجه، بازدهی یکسانی داشته است. افزایش زاویه پل‌های سرند با روزنه مستطیلی باعث کاهش بازدهی سرند (۶ درصد برای دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر و ۶/۷ درصد برای دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر) شده است. افزایش خوراک ورودی سرند با روزنه مستطیلی باعث افزایش بازدهی سرند با دامنه ۲ میلی‌متر نسبت به ۵ میلی‌متر در پل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۵-۲۵ درجه و کاهش بازدهی دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر نسبت به ۵ میلی‌متر در پل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۲۵ درجه شده است.

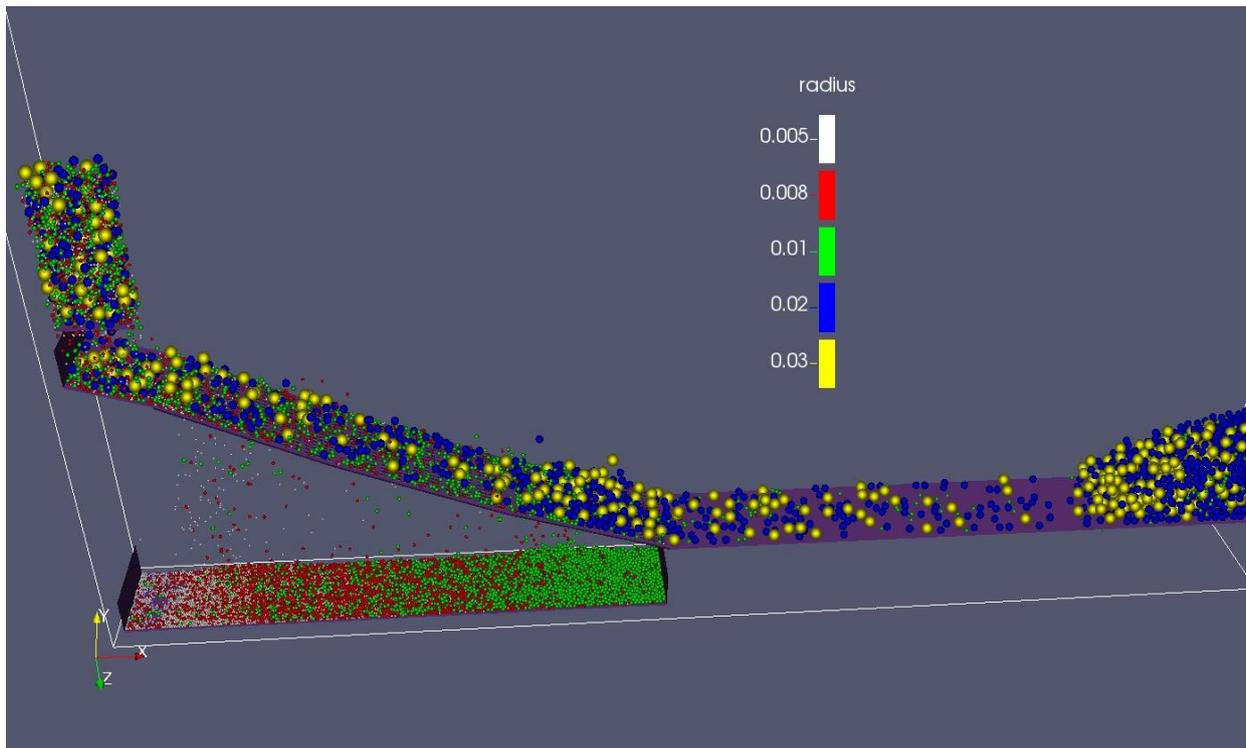
۴-۶- تأثیر خوراک ورودی بر بازدهی سرند

در این پژوهش به منظور مشخص نمودن تأثیر خوراک ورودی بر بازدهی سرند، دو نوع خوراک ورودی (شکل ۴-۴ و شکل ۴-۴۱) که هر کدام شامل پنج نوع گلوله با قطرهای مختلف و چگالی یکسان بودند، مورد بررسی قرار گرفت (شکل‌های ۴-۴۲ تا ۴-۴۵) که مشخصات آن‌ها در جدول (۴-۷) نشان داده شده است.

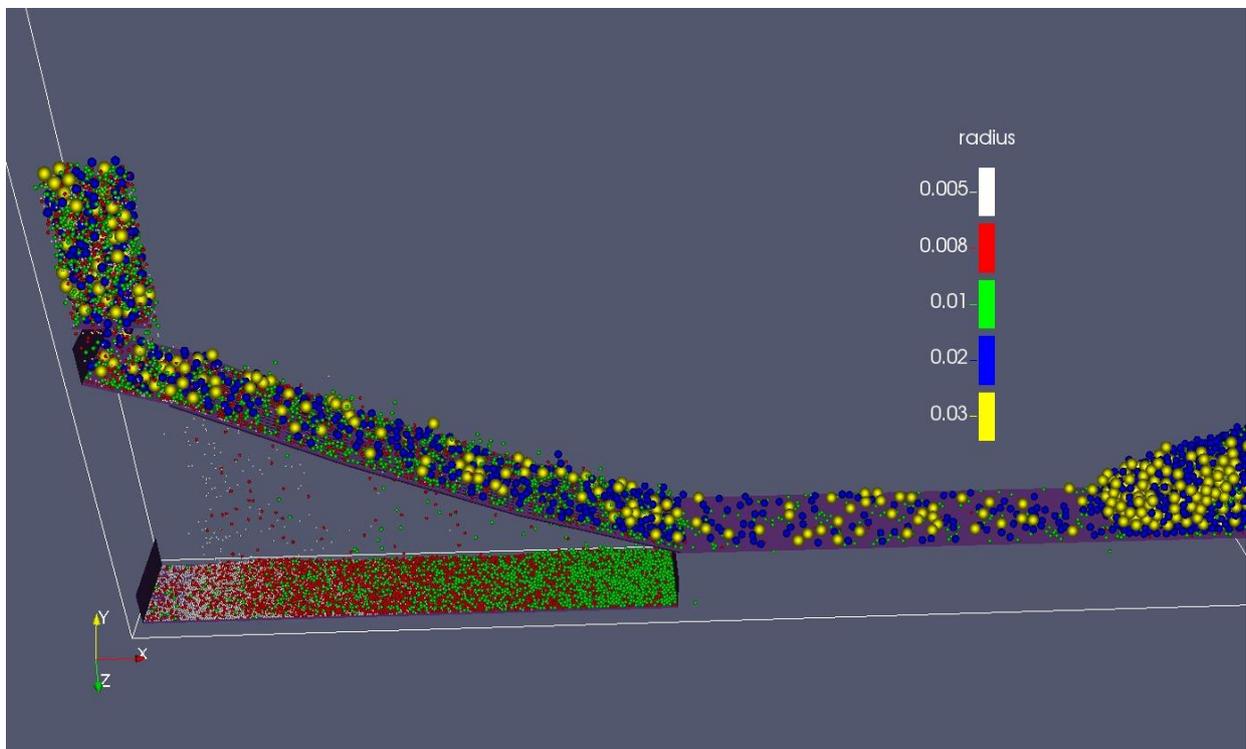
در سرند با روزنه مربعی و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر، افزایش خوراک ورودی سرند باعث افزایش بازدهی سرند شده است (شکل ۴-۴۳). اختلاف بازدهی خوراک یک (۲۸۰/۵۳ کیلوگرم) و خوراک دو (۴۱۵/۱۸ کیلوگرم) در پنل‌های اول با زاویه ۱۸ درجه، کم و با افزایش زاویه پنل اول به تدریج اختلاف بازدهی بین

جدول ۴-۷- مشخصات خوراک استفاده‌شده در شبیه‌سازی.

۱۰	۱۶	۲۰	۴۰	۶۰	ابعاد ذرات، قطر (میلی‌متر)	
۷۶۵/۳۷۵	۷۴۷/۴۵	۷۱۷/۵۵	۱۹۴/۳۲۵	۷۵/۳	خوراک ۱	نرخ خوراک (تعداد بر ثانیه)
۱۱۳۲/۷۵۵	۱۱۰۶/۲۲۶	۱۰۶۱/۹۷۴	۲۸۷/۶۰۱	۱۱۱/۴۴۴	خوراک ۲	
۲	۸	۱۵	۳۲/۵	۴۲/۵	توزیع اندازه خوراک (درصد)	
۲۸۰/۵۲۶۷					خوراک ۱	وزن خوراک (کیلوگرم)
۴۱۵/۱۷۹۵					خوراک ۲	
۱۴۰۰					چگالی ذرات (kg/m ³)	
۲۵۰۰۰				خوراک ۱	تعداد کل ذرات	
۳۷۰۰۰				خوراک ۲		

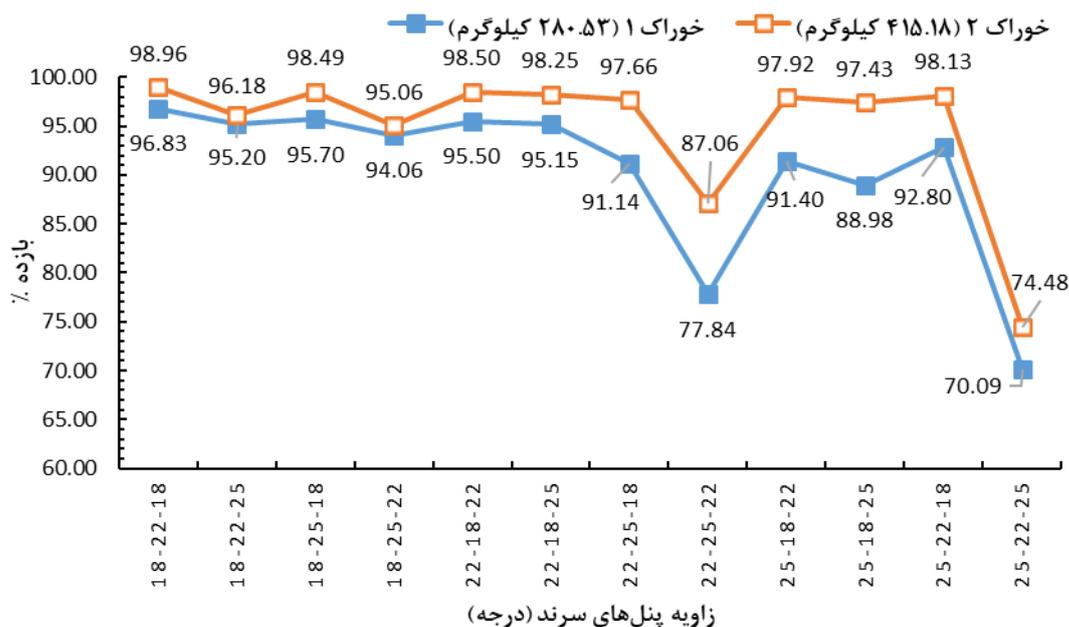


شکل ۴-۴۰- شبیه‌سازی سرند سه صفحه‌ای با روزنه مربعی و خوراک ورودی ۱.

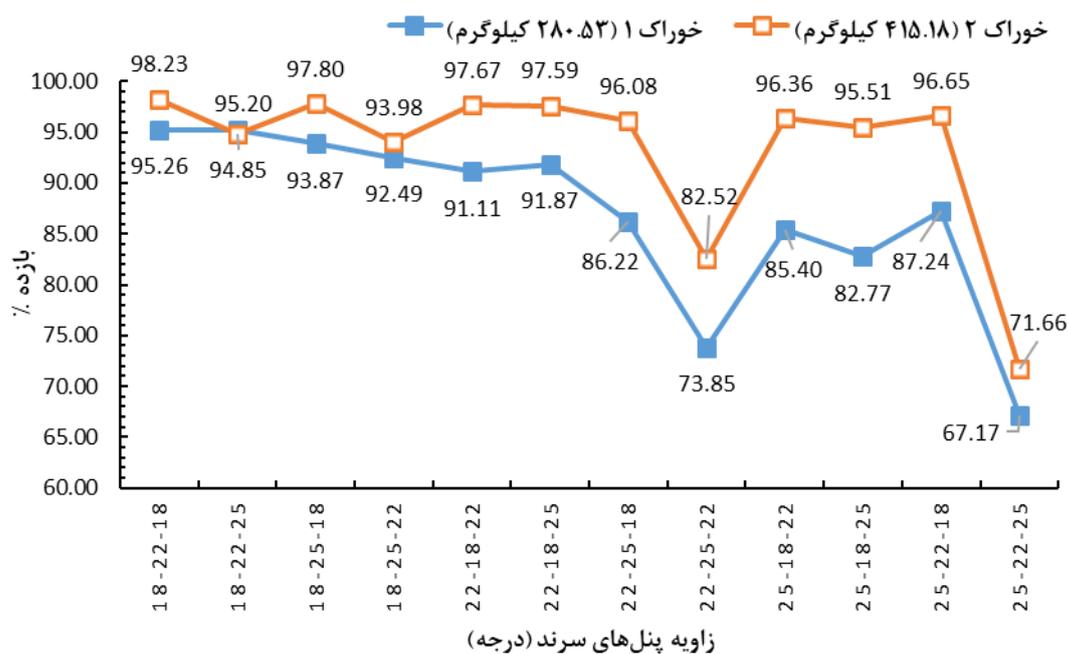


شکل ۴-۴۱- شبیه‌سازی سرند سه صفحه‌ای با روزنه مربعی و خوراک ورودی ۲.

خوراک یک و خوراک دو بیشتر می‌شود. در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۲۵ درجه و ۱۸-۲۵-۲۲ درجه در دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر، بازدهی هر دو خوراک تقریباً یکسان بوده و بیشترین اختلاف بازدهی بین دو خوراک، در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۲۵-۲۲ درجه می‌باشد (شکل ۴-۴۴). کمترین بازدهی سرند با روزنه مربعی و دامنه



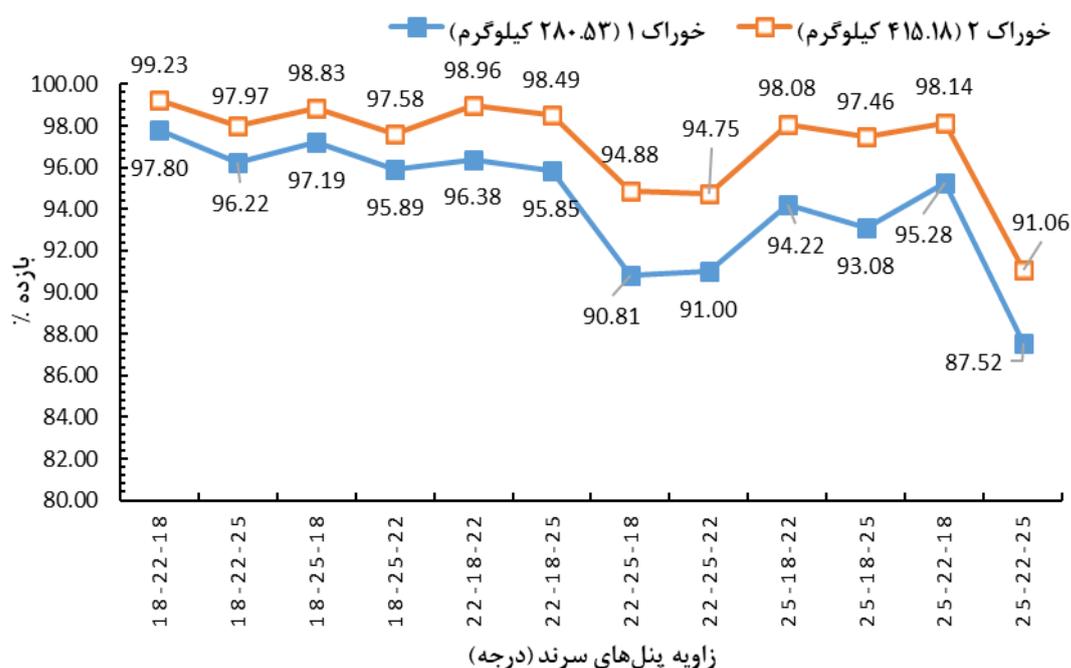
شکل ۴-۴۲- تاثیر خوراک ورودی بر بازدهی سرند با دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر و روزنه مربعی.



شکل ۴-۴۳- تاثیر خوراک ورودی بر بازدهی سرند با دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر و روزنه مربعی.

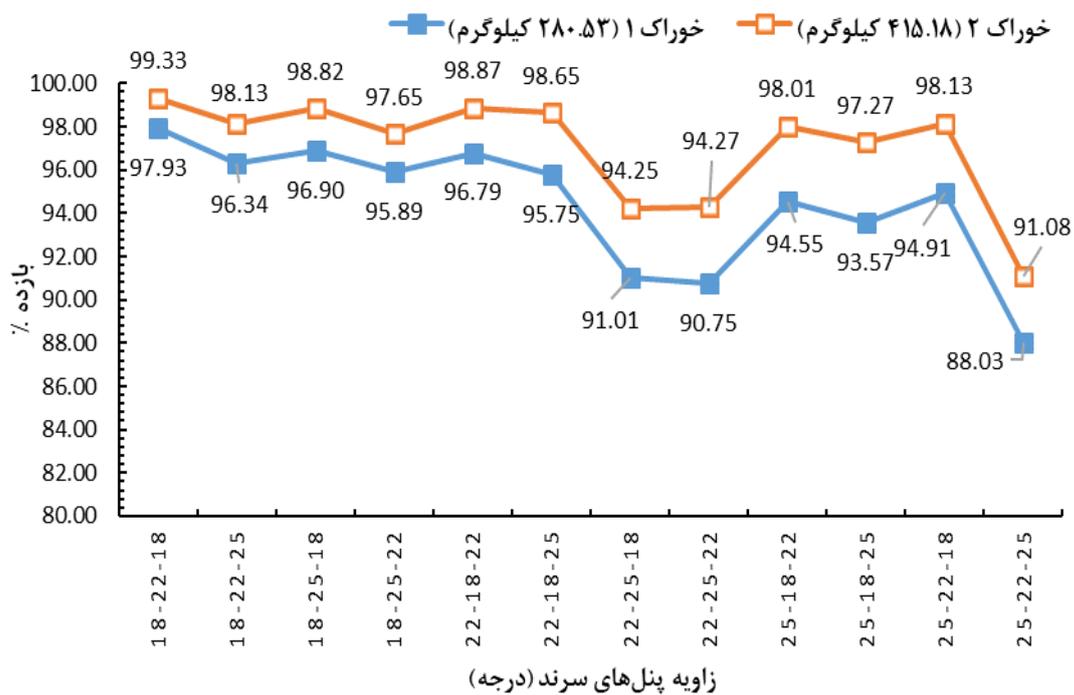
ارتعاش ۲ میلی‌متر در پنل‌هایی با زاویه ۲۵-۲۲-۲۵ درجه است که برای خوراک یک ۷۰ درصد و برای خوراک دو ۷۴/۴۸ درصد می‌باشد.

در سردن با روزنه مستطیلی افزایش و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر، افزایش خوراک ورودی باعث افزایش کارایی سردن شده است. اختلاف بازدهی خوراک یک و خوراک دو در سردن با روزنه مستطیلی و دامنه ارتعاش



شکل ۴-۴- تاثیر خوراک ورودی بر بازدهی سردن با دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر و روزنه مستطیلی.

۲ میلی‌متر نسبت به سردن با روزنه مربعی بیشتر بوده است. پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۲-۱۸ درجه، ۲۵-۲۲-۱۸ درجه، ۱۸-۲۵-۱۸ درجه و ۲۲-۲۵-۱۸ درجه کمترین اختلاف بازدهی را با افزایش خوراک ورودی و پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۵-۲۲ درجه، ۲۲-۲۵-۲۲ درجه و ۲۵-۲۲-۲۵ درجه بیشترین اختلاف بازدهی را با افزایش خوراک ورودی داشته‌اند. در پنل‌هایی با زاویه ۱۸-۲۵-۲۲ درجه، سردن با روزنه مستطیلی بازدهی بهتری در هر دو خوراک ورودی نسبت به سردن با روزنه مربعی داشته است (شکل ۴-۴). بر خلاف سردن با روزنه مربعی در سردن با روزنه مستطیلی با افزایش زاویه پنل اول به ۲۵ درجه، بازدهی سردن بجز در پنل‌هایی با زاویه ۲۲-۲۵-۱۸ درجه، ۲۲-۲۵-۲۲ درجه و ۲۵-۲۲-۲۵ درجه، تقریباً ثابت بوده است.



شکل ۴-۴۵- تاثیر خوراک ورودی بر بازدهی سرند با دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر و روزنه مستطیلی.

۴-۷- جمع‌بندی

در این فصل روش اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده و مقایسه نتایج آن‌ها با مقادیر آزمایشگاهی و پارامترهای فیزیکی خوراک ورودی سرند ارائه و همچنین تأثیر پارامترهای مختلفی مثل دامنه ارتعاش سرند، شکل روزنه سرند، خوراک ورودی سرند و زاویه پنل‌ها بر بازدهی سرند بررسی شد.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

روش مدل سازی اجزای گسسته در مورد فرآیند سردکنی توسط سرد سه صفحه ای با موفقیت اجرا شد. روابط و معادلات آن ارائه و مراحل شبیه سازی توضیح داده شدند همچنین تأثیر پارامترهای مختلفی مثل دامنه ارتعاش سرد، شکل روزنه سرد، خوراک ورودی سرد و زاویه پنل ها بر بازدهی سرد بررسی شد. نتایج نشان می دهد که با افزایش زاویه پنل های سرد، بازدهی سرد با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی کاهش پیدا می کند. این کاهش بازدهی برای پنل هایی با زاویه ۲۲ درجه بیشتر از زاویه ۲۵ درجه می باشد. افزایش دامنه ارتعاش سرد در روزنه مستطیلی منجر به بهبود بازدهی و در روزنه مربعی باعث کاهش بازدهی می شود.

افزایش خوراک باعث افزایش بازدهی هر دو سرد شده است. در دامنه ارتعاش ۲ میلی متر، اختلاف بازدهی سرد با روزنه مربعی و سرد با روزنه مستطیلی کم و با افزایش دامنه ارتعاش به ۵ میلی متر اختلاف سردها زیاد می شود. بازدهی پنل ها با زاویه ۲۲ درجه نسبت به زوایای ۱۸ و ۲۵ درجه پایین تر می باشد که افزایش دامنه ارتعاش سرد باعث تشدید بیشتر آن می شود.

با تغییر زاویه پنل اول به ۲۲ درجه، بازدهی سرد کاهش یافته که این کاهش بازدهی در دامنه ارتعاش ۲ میلی متر برای سرد با روزنه مربعی و سرد با روزنه مستطیلی تقریباً یکسان است. با افزایش دامنه ارتعاش سرد به ۵ میلی متر اختلاف دو روزنه سرد بیشتر شده، بازدهی سرد با روزنه مستطیلی افزایش و بازدهی سرد با روزنه مربعی کاهش می یابد.

با افزایش خوراک و زاویه پنل اول، بازدهی هر دو سرد با روزنه مربعی و مستطیلی افزایش پیدا کرده است. بازدهی سرد با روزنه مربعی و مستطیلی در زاویه ۱۸ تقریباً یکسان می باشد و با تغییر زاویه پنل دوم از ۱۸ به ۲۵ درجه، بازدهی سرد با روزنه مستطیلی کاهش پیدا کرده به طوری که از سرد با روزنه مربعی نیز کمتر می شود. با افزایش زاویه پنل سوم از ۱۸ به ۲۲ درجه، بازدهی سرد با روزنه مربعی بشدت کاهش

پیدا کرده که افزایش دامنه ارتعاش سرد باعث تشدید آن شده است. ولی برای سرد با روزنه مستطیلی بازدهی تقریباً ثابت می‌ماند.

افزایش زاویه پنل اول از ۲۲ به ۲۵ درجه باعث کاهش بازدهی سرد شده و این کاهش در سرد با روزنه مربعی بیشتر است. همچنین بهترین بازدهی در پنل‌هایی به ترتیب با زاویه‌های ۲۵، ۲۲ و ۱۸ درجه می‌باشد. افزایش زاویه پنل‌های دو و سه باعث کاهش شدید بازدهی در سرد با روزنه مربعی و افزایش دامنه ارتعاش نیز باعث افزایش بازدهی سرد با روزنه مستطیلی و کاهش بازدهی سرد با روزنه مربعی شده است.

افزایش خوراک ورودی سرد باعث افزایش بازدهی هر دو سرد و افزایش دامنه ارتعاش سرد از ۲ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر کاهش بازدهی سرد با روزنه مربعی شده است.

روزنه مستطیلی شکل به جز در پنل‌هایی به ترتیب با زاویه‌های ۱۸، ۲۲ و ۲۵، بازدهی بهتری داشته. بهترین بازدهی سرد با روزنه مستطیلی در پنل اول با زاویه ۱۸ درجه، دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر و کمترین بازدهی سرد با روزنه مستطیلی در پنل اول با زاویه ۲۲ درجه و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر بوده است.

هر دو شکل روزنه با افزایش خوراک بازدهی بهتری نشان داده، افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر در سرد با روزنه مربعی باعث کاهش بازدهی و در سرد با روزنه مستطیلی باعث افزایش بازدهی شده است. بهترین بازدهی سرد با روزنه مربعی در پنل اول با زاویه‌های ۱۸ و ۲۵ و دامنه ارتعاش ۲ میلی‌متر بوده است. سرد با روزنه مستطیلی شکل از سرد با روزنه مربعی در زوایای کمتر، بهتر عمل کرده و بازدهی بهتری نشان داده است.

با افزایش زاویه پنل‌ها بازدهی سردها بخصوص سرد با روزنه مربعی کاهش یافته، مقادیر کاهش بازدهی برای سرد با روزنه مستطیلی تقریباً ۱۳ درصد و برای سرد با روزنه مربعی، ۳۰ درصد می‌باشد. سرد با روزنه مربعی نسبت به افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر تأثیر منفی نشان داده ولی برای سرد با روزنه مستطیلی تأثیر مثبت داشته و باعث افزایش بازدهی بخصوص در زاویه‌های ۲۲ و ۲۵ شده است.

با افزایش خوراک بازدهی سرندها بهبود می‌یابد و عملاً تغییر زاویه پنل‌ها تغییر در بازدهی سرند ایجاد نمی‌کند بجز در پنل‌ها با زاویه‌های ۲۲-۲۵ و ۲۵-۲۲-۲۵ که گمان می‌شود به دلیل شیب زیاد سرند ذرات زمان کافی برای عبور از روزنه‌های سرند را ندارند. کاهش بازدهی در زاویه‌های فوق برای سرند با روزنه مربعی بیشتر از سرند با روزنه‌های مستطیلی می‌باشد. افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر در سرند با روزنه مستطیلی مخصوصاً در پنل‌هایی با زاویه ۲۲ و ۲۵ درجه، تأثیر مثبت بر بازدهی سرند داشته ولی در سرندهایی با روزنه مربعی، افزایش دامنه ارتعاش تأثیر منفی بر بازدهی گذاشته و باعث کاهش آن شده است. افزایش دامنه ارتعاش در سرند با روزنه مربعی تأثیر منفی بر بازدهی سرند داشته و با افزایش خوراک ورودی این تأثیر منفی کاهش می‌یابد. با افزایش خوراک تغییرات دامنه ارتعاش تقریباً بی‌اثر شده و تأثیر زیادی بر بازدهی سرند نمی‌گذارد. در سرند با روزنه مستطیلی افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر باعث افزایش جزیی در بازدهی سرند می‌شود.

افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر در سرند در سرند با روزنه مربعی تأثیر منفی بر بازدهی سرند داشته و برای سرند با روزنه مستطیلی افزایش دامنه ارتعاش تأثیر مثبت اندکی دارد. در پنل‌هایی با زاویه کمتر، دامنه ارتعاش تأثیر کمتری بر بازدهی سرند داشته و در پنل‌هایی با زاویه متوسط و زیاد نقش دامنه ارتعاش بیشتر و به صورت کاهشی می‌باشد.

افزایش خوراک ورودی سرندها باعث افزایش بازدهی آن‌ها شده است. در پنل‌های اول با افزایش شیب، تأثیر افزایش خوراک بر بازدهی سرند بیشتر شده است.

۵-۲- پیشنهادات

برای سرند با روزنه مربعی، افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر باعث کاهش بازدهی و برای سرند با روزنه مستطیلی افزایش دامنه ارتعاش از ۲ به ۵ میلی‌متر باعث افزایش بازدهی می‌شود، لذا پیشنهاد می‌شود

در سردند با روزنه مربعی از دامنه ارتعاش ۲ و برای سردند با روزنه مستطیلی از دامنه ارتعاش ۵ میلی‌متر استفاده شود.

به طور کلی افزایش خوراک ورودی سردند باعث افزایش بازدهی سردند با روزنه مربعی و روزنه مستطیلی در زاویه‌های پایین پنل‌های سردند شده و در زاویه‌های بالای سردند افزایش خوراک برای سردند با روزنه مربعی باعث کاهش بازدهی تا ۱۵ درصد و برای سردند با روزنه مستطیلی باعث کاهش بازدهی تا ۵ درصد شده است. لذا پیشنهاد می‌شود در زاویه‌های پایین پنل‌های سردند از حداکثر ظرفیت خوراک ورودی سردند استفاده شود. سردند با روزنه مستطیلی بازدهی بهتری نسبت به سردند با روزنه مربعی در دامنه ارتعاش ۵ و خوراک متناسب با حداکثر ظرفیت سردند داشته، لذا پیشنهاد می‌شود در صورت استفاده از پنل‌هایی با زاویه ۲۲ درجه به بالا از سردند با روزنه مستطیلی استفاده شود.

افزایش زاویه پنل‌های سردند با روزنه مربعی باعث کاهش بازدهی شده لذا پیشنهاد می‌شود حداکثر زاویه پنل‌های سردند با روزنه مربعی، ۲۲ درجه انتخاب شود. در سردند با روزنه مستطیلی می‌توان برای خوراک‌های کمتر از ظرفیت سردند از پنل‌هایی با زاویه ۲۵ درجه استفاده کرد.

پیوست ۱: متن کدهای ورودی لایتس برای خوراک ۱

```
atom_style    granular
atom_modify   map array
boundary      f f f
newton        off
communicate   single vel yes
units         si
region        reg block -1.25 5.05 -1.05 2.6 -0.1 0.5 units box
create_box    1 reg
neighbor      0.001 bin
neigh_modify  delay 0
#Material properties
fix           m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1e5
fix           m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix           m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix           m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix           m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 1 0.01 # The
optional rolling friction model is activated via rolling_friction = 'cdt'
#New pair style
pair_style    gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion
pair_coeff     * *
timestep      0.00001
fix           1 all nve/sphere
fix           2 all gravity 9.81 vector 0.0 -1.0 0.0
#box walls
fix           boxwalls_x1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 xplane -
1.2
fix           boxwalls_x2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 xplane 5
fix           boxwalls_y1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 yplane -
1
fix           boxwalls_y2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 yplane 1
fix           boxwalls_z1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane
0.01
fix           boxwalls_z2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane
0.44
#import mesh from meshes:
fix           cad1 all mesh/surface file meshes/22-18-25.stl type 1 scale 1 curvature_tolerant
yes
```

```

fix      cad2 all mesh/surface file meshes/over.stl type 1 scale 1 surface_vel 2.0 0. 0.
fix      cad3 all mesh/surface file meshes/feeder.stl type 1 scale 1
fix      cad4 all mesh/surface file meshes/under.stl type 1 scale 1
#fix     cad5 all mesh/surface file meshes/start.stl type 1 scale 1
fix      ins_mesh all mesh/surface/planar file meshes/insertion_face.stl type 1
#use the imported mesh as granular wall
fix      Screen_wall all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshes 4 meshes
cad1 cad2 cad3 cad4
#distributions for insertion
fix      pts1 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1 density constant 1400 radius
constant 0.03
fix      pts2 all particletemplate/sphere 15485867 atom_type 1 density constant 1400 radius
constant 0.02
fix      pts3 all particletemplate/sphere 32452843 atom_type 1 density constant 1400 radius
constant 0.01
fix      pts4 all particletemplate/sphere 67867967 atom_type 1 density constant 1400 radius
constant 0.008
fix      pts5 all particletemplate/sphere 32452867 atom_type 1 density constant 1400 radius
constant 0.005
fix      pdd1 all particledistribution/discrete 49979687 5 pts1 0.425 pts2 0.325 pts3 0.15
pts4 0.08 pts5 0.02
fix      3 all nve/limit absolute 0.00002
#region for insertion
group    nve_group region reg
#region          bc block -0.4 0.0 2.5 7 0.1 0.8 units box
#particle insertion
fix      ins nve_group insert/stream seed 86028157 distributiontemplate pdd1
nparticles 25000 vel constant 0.0 -1.0 0.0 particlerate 2500 overlapcheck yes insertion_face
ins_mesh extrude_length 1
#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles
fix integr nve_group nve/sphere
#thermo settings
compute          1 all erotate/sphere
thermo_style     custom step atoms ke c_1 vol time
thermo          30000
thermo_modify    lost ignore norm no
compute_modify   thermo_temp dynamic yes
#insert the first particles so that dump is not empty
run 1

```

```

dump dmp all custom 30000 post/dump.screen id type x y z ix iy iz vx vy vz fx fy fz omegax
omegay omegaz radius
dump dumpstress all mesh/stl 30000 post/mesh_*.stl
#moving mesh
fix movecad1 all move/mesh mesh cad1 viblin axis 0.0 0. 1.00 order 1 amplitude 0.002
phase 0.0 period 0.067
#fix movecad2 all move/mesh mesh cad2 viblin axis 0.0 -1 1.00 order 1 amplitude
0.002 phase 0.0 period 0.067
fix movecad3 all move/mesh mesh cad3 viblin axis 0.0 0. 1.00 order 1 amplitude 0.002
phase 0.0 period 0.067
#insert particles
run 1000000 upto
unfix ins
#run
run 1360000 upto

```

پیوست ۲: متن کدهای ورودی لایتس برای خوراک ۲

```

atom_style granular
atom_modify map array
boundary f f f
newton off
communicate single vel yes
units si
region reg block -1.25 5.05 -1.05 2.6 -0.1 0.5 units box
create_box 1 reg
neighbor 0.001 bin
neigh_modify delay 0
#Material properties
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1e5
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 1 0.01 # The
optional rolling friction model is activated via rolling_friction = 'cdt'
#New pair style
pair_style gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion
pair_coeff * *
timestep 0.00001
fix 1 all nve/sphere
fix 2 all gravity 9.81 vector 0.0 -1.0 0.0

```

```

#box walls
fix      boxwalls_x1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 xplane -
1.2
fix      boxwalls_x2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 xplane 5
fix      boxwalls_y1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 yplane -
1
fix      boxwalls_y2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 yplane 1
fix      boxwalls_z1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane
0.01
fix      boxwalls_z2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane
0.44
#import mesh from meshes:
fix      cad1 all mesh/surface file meshes/22-18-25.stl type 1 scale 1 curvature_tolerant
yes
fix      cad2 all mesh/surface file meshes/over.stl type 1 scale 1 surface_vel 2.0 0. 0.
fix      cad3 all mesh/surface file meshes/feeder.stl type 1 scale 1
fix      cad4 all mesh/surface file meshes/under.stl type 1 scale 1
#fix     cad5 all mesh/surface file meshes/start.stl type 1 scale 1
fix      ins_mesh all mesh/surface/planar file meshes/insertion_face.stl type 1
#use the imported mesh as granular wall
fix      Screen_wall all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshes 4 meshes
cad1 cad2 cad3 cad4
#distributions for insertion
fix      pts1 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1 density constant 1400 radius
constant 0.03
fix      pts2 all particletemplate/sphere 15485867 atom_type 1 density constant 1400 radius
constant 0.02
fix      pts3 all particletemplate/sphere 32452843 atom_type 1 density constant 1400 radius
constant 0.01
fix      pts4 all particletemplate/sphere 67867967 atom_type 1 density constant 1400 radius
constant 0.008
fix      pts5 all particletemplate/sphere 32452867 atom_type 1 density constant 1400 radius
constant 0.005
fix      pdd1 all particledistribution/discrete 49979687 5 pts1 0.425 pts2 0.325 pts3 0.15
pts4 0.08 pts5 0.02
fix      3 all nve/limit absolute 0.00002
#region for insertion
group    nve_group region reg
#region          bc block -0.4 0.0 2.5 7 0.1 0.8 units box
#particle insertion

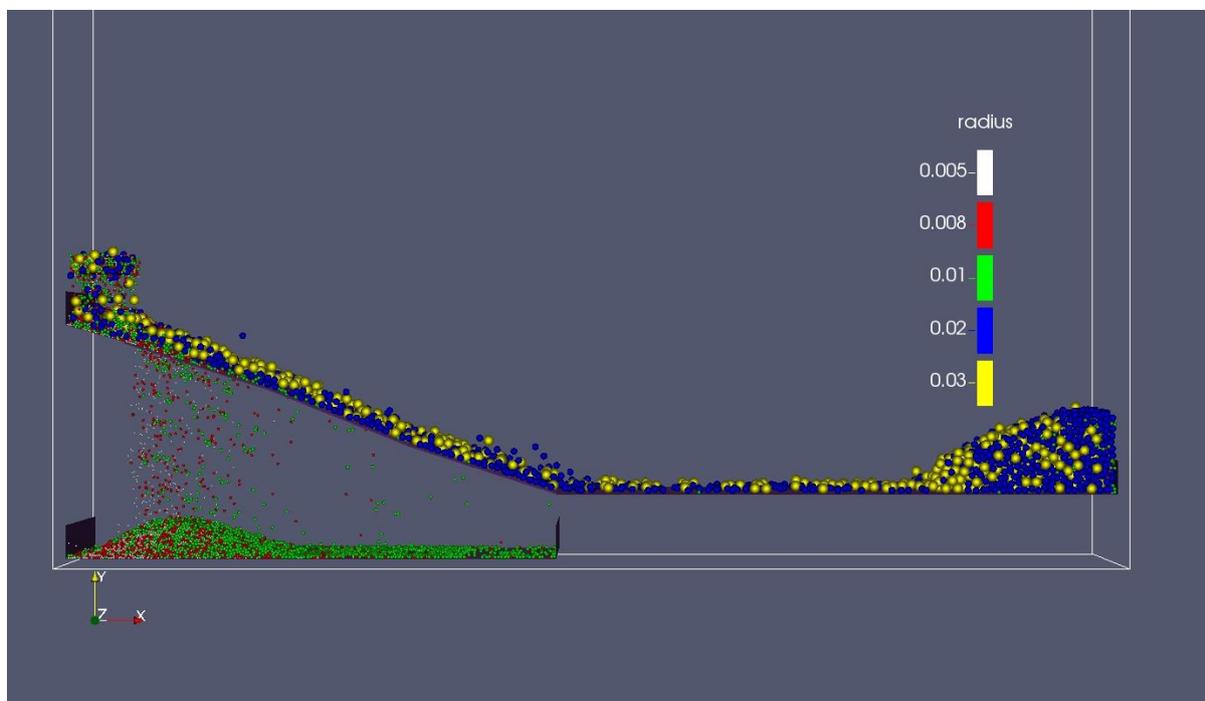
```

```

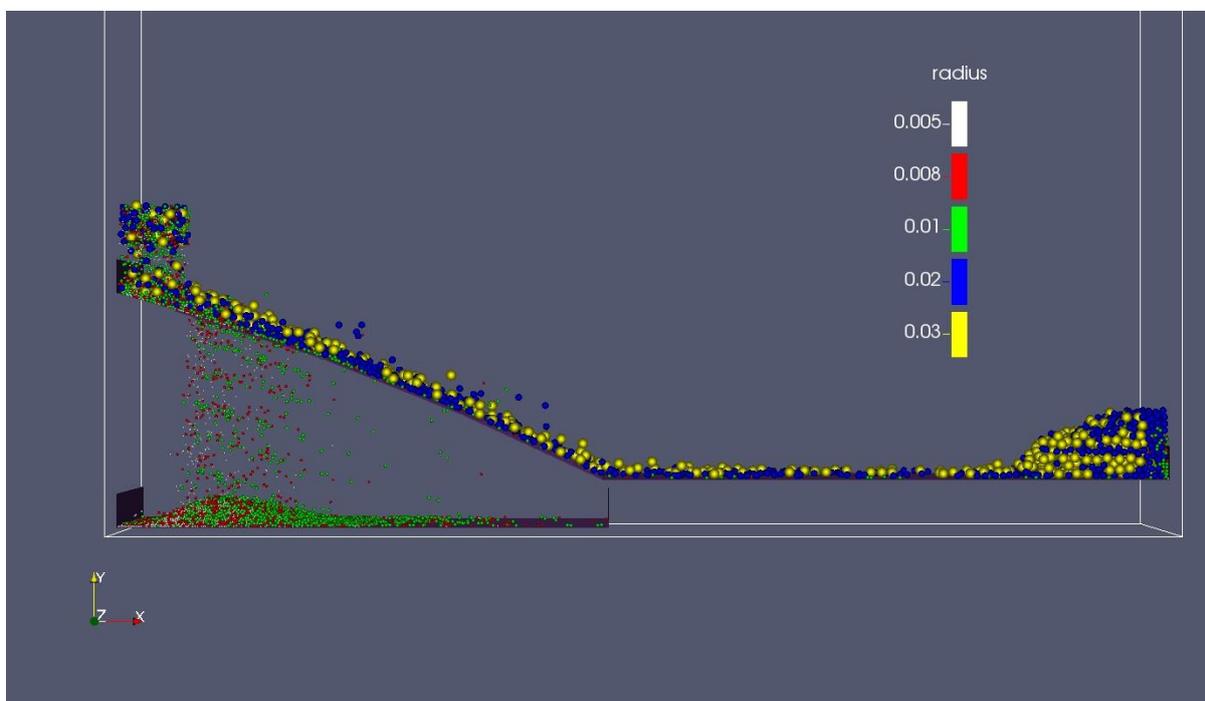
fix          ins nve_group insert/stream seed 86028157 distributiontemplate pdd1
nparticles 37000 vel constant 0.0 -1.0 0.0 particlerate 3700 overlapcheck yes insertion_face
ins_mesh extrude_length 1
#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles
fix integr nve_group nve/sphere
#thermo settings
compute          1 all erotate/sphere
thermo_style    custom step atoms ke c_1 vol time
thermo          30000
thermo_modify   lost ignore norm no
compute_modify  thermo_temp dynamic yes
#insert the first particles so that dump is not empty
run 1
dump dmp all custom 30000 post/dump.screen id type x y z ix iy iz vx vy vz fx fy fz omegax
omegay omegaz radius
dump dumpstress all mesh/stl 30000 post/mesh_*.stl
#moving mesh
fix          movecad1 all move/mesh mesh cad1 viblin axis 0.0 0. 1.00 order 1 amplitude 0.002
phase 0.0 period 0.067
#fix          movecad2 all move/mesh mesh cad2 viblin axis 0.0 -1 1.00 order 1 amplitude
0.002 phase 0.0 period 0.067
fix          movecad3 all move/mesh mesh cad3 viblin axis 0.0 0. 1.00 order 1 amplitude 0.002
phase 0.0 period 0.067
#insert particles
run          1000000 upto
unfix       ins
#run
run          1360000 upto

```

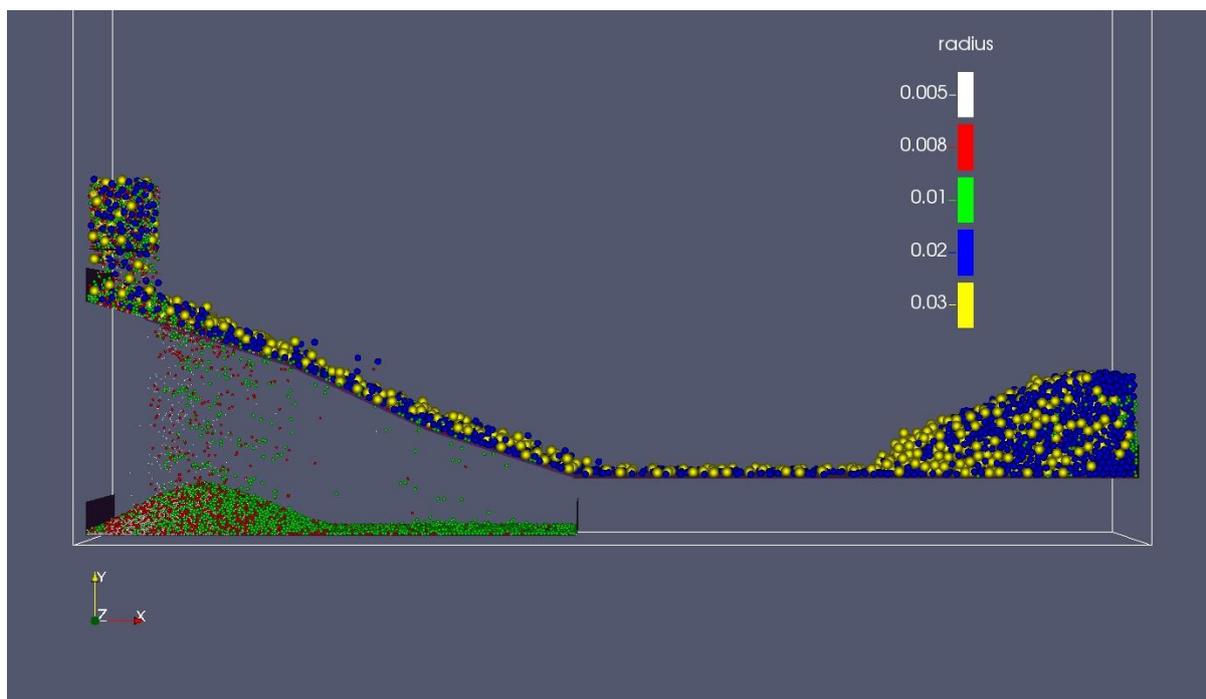
پیوست ۳: تصاویر شبیه‌سازی سرند در شرایط مختلف



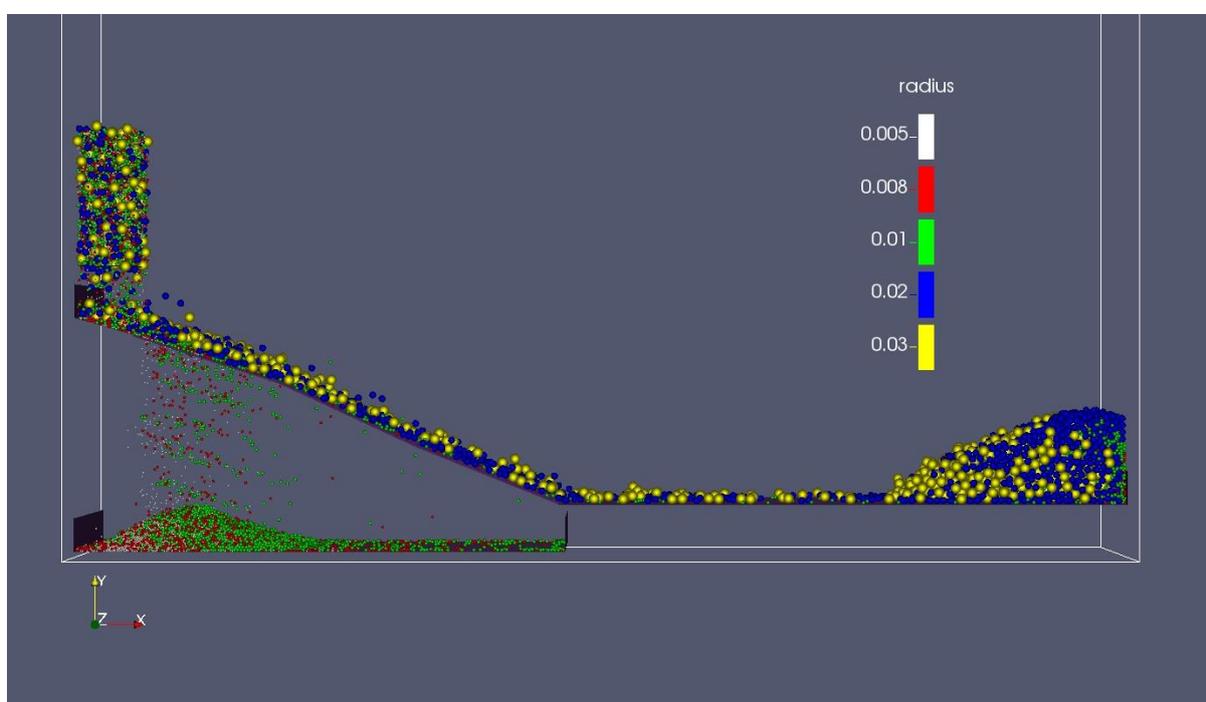
پیوست ۳ شکل ۱- شبیه‌سازی سرند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۱۸-۲۲-۱۸ درجه.



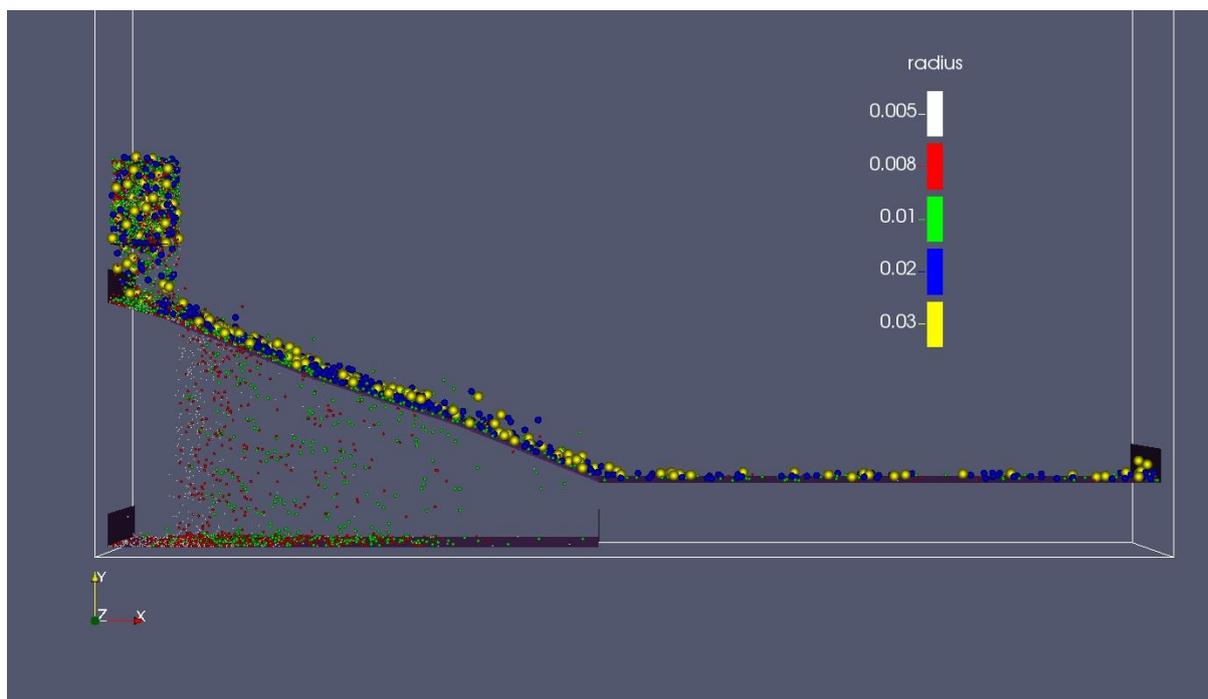
پیوست ۳ شکل ۲- شبیه‌سازی سرند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۵-۲۲-۱۸ درجه.



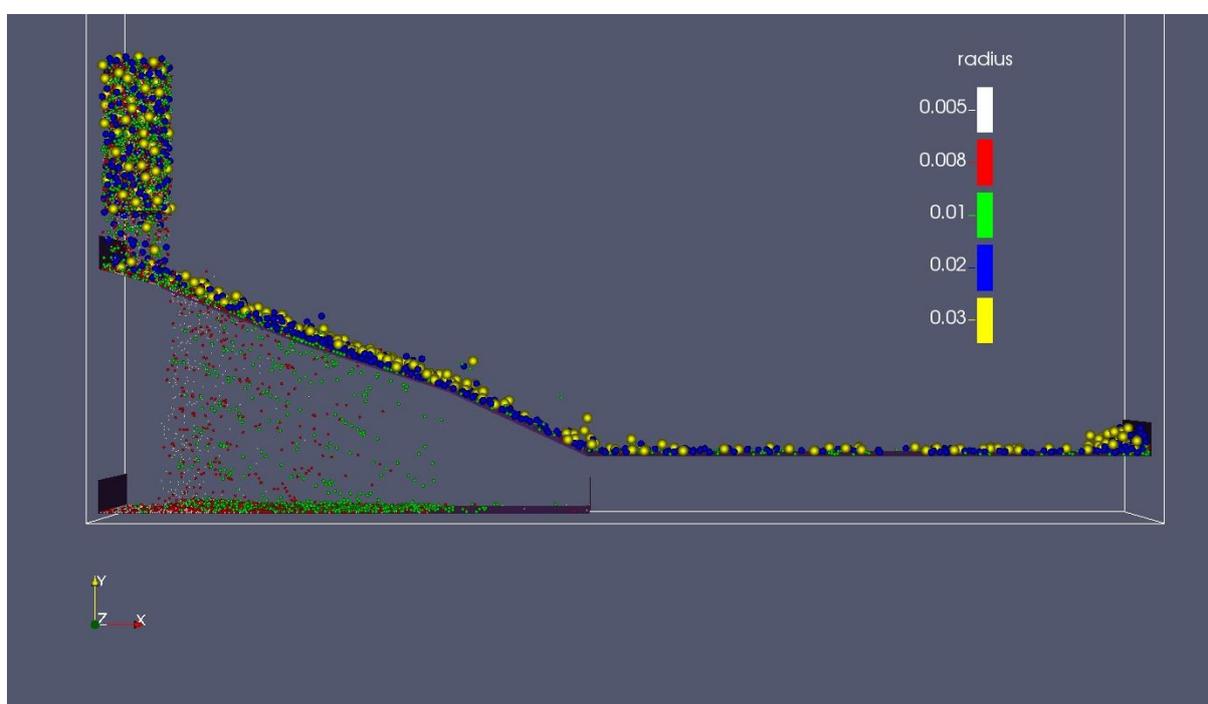
پیوست ۳ شکل ۳- شبیه‌سازی سرند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۱۸-۲۵-۱۸ درجه.



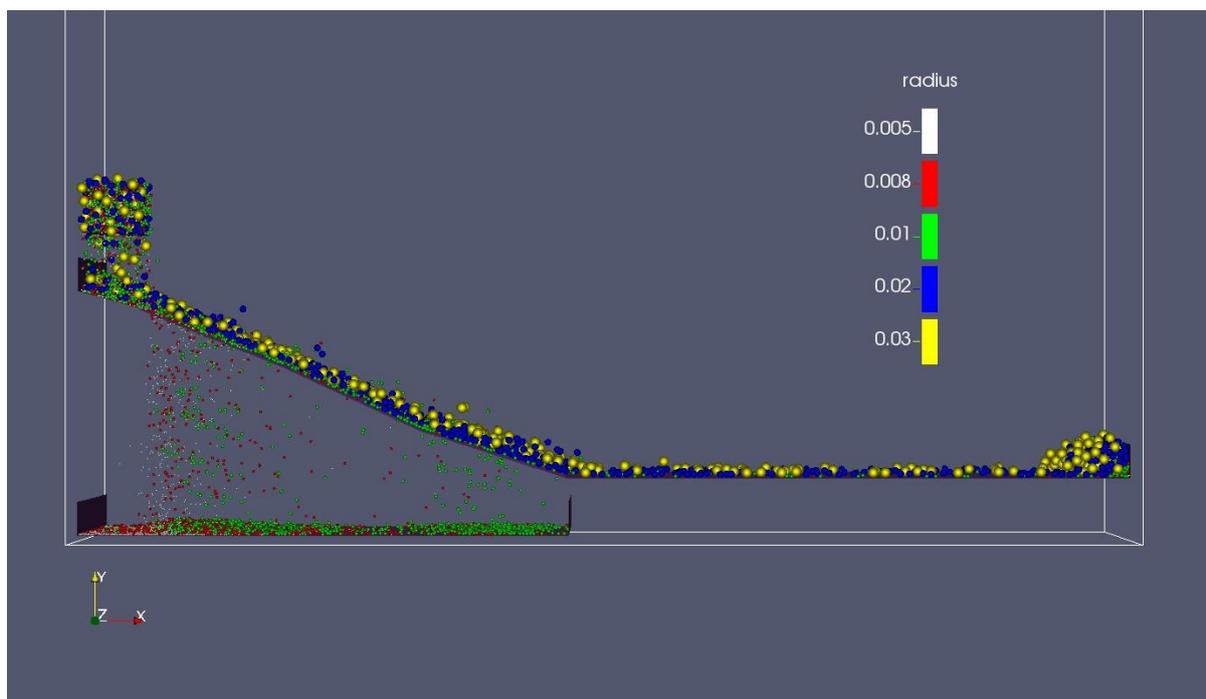
پیوست ۳ شکل ۴- شبیه‌سازی سرند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۲-۲۵-۱۸ درجه.



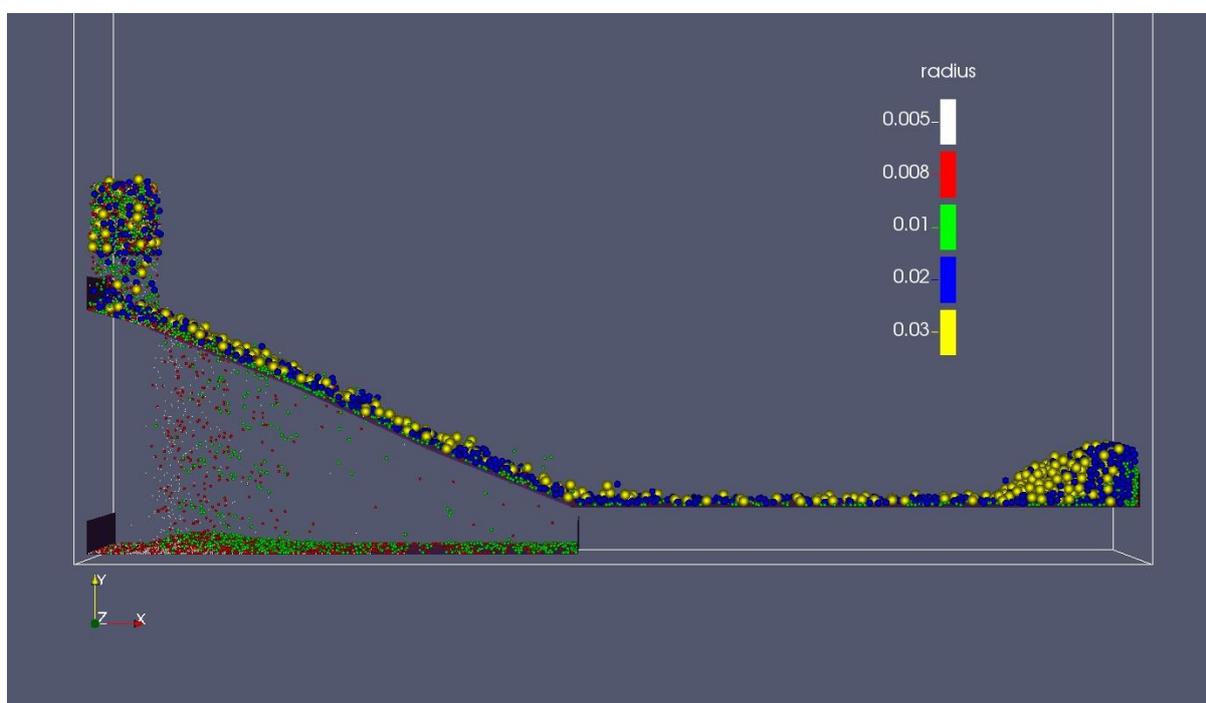
پیوست ۳ شکل ۵- شبیه‌سازی سرنند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۲-۱۸-۲۲ درجه.



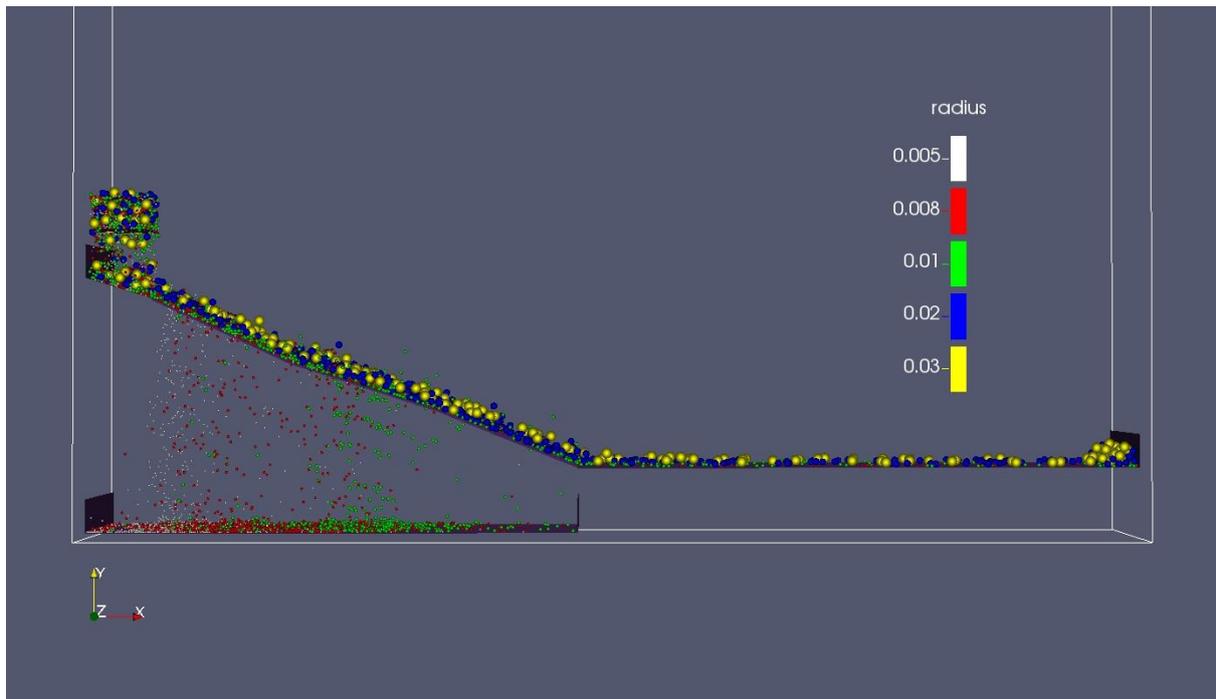
پیوست ۳ شکل ۶- شبیه‌سازی سرنند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۵-۱۸-۲۲ درجه.



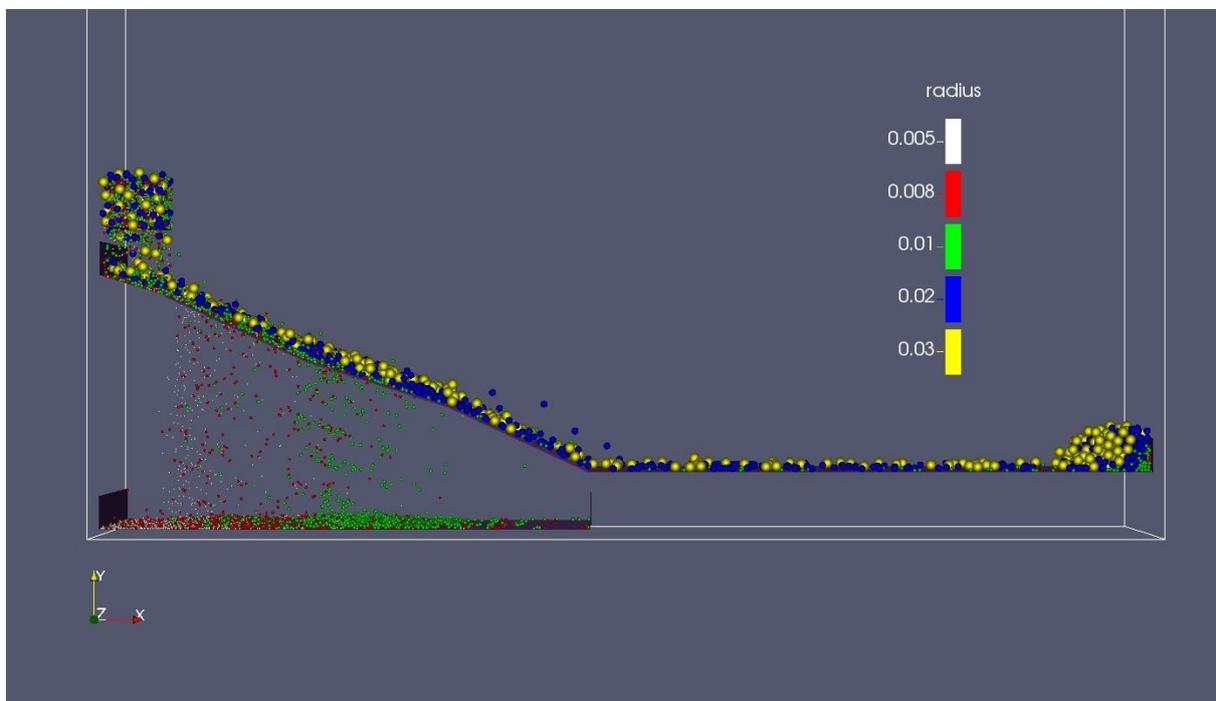
پیوست ۳ شکل ۷- شبیه‌سازی سرند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۱۸-۲۵-۲۲ درجه.



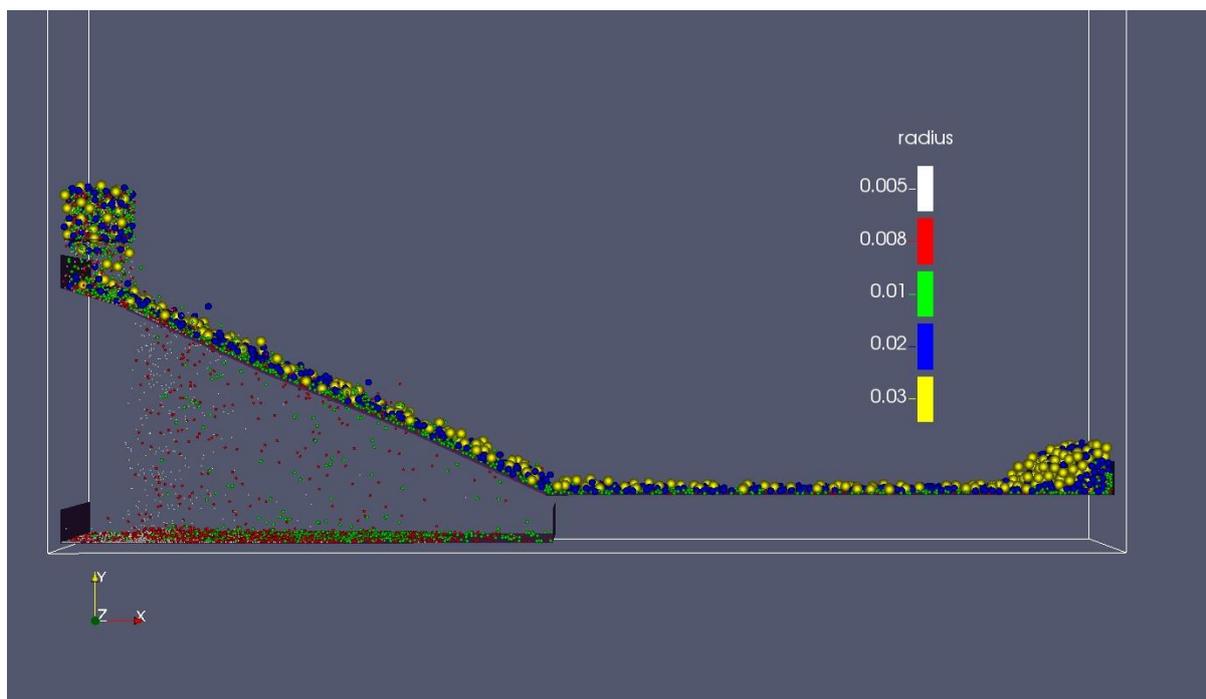
پیوست ۳ شکل ۸- شبیه‌سازی سرند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۲-۲۵-۲۲ درجه.



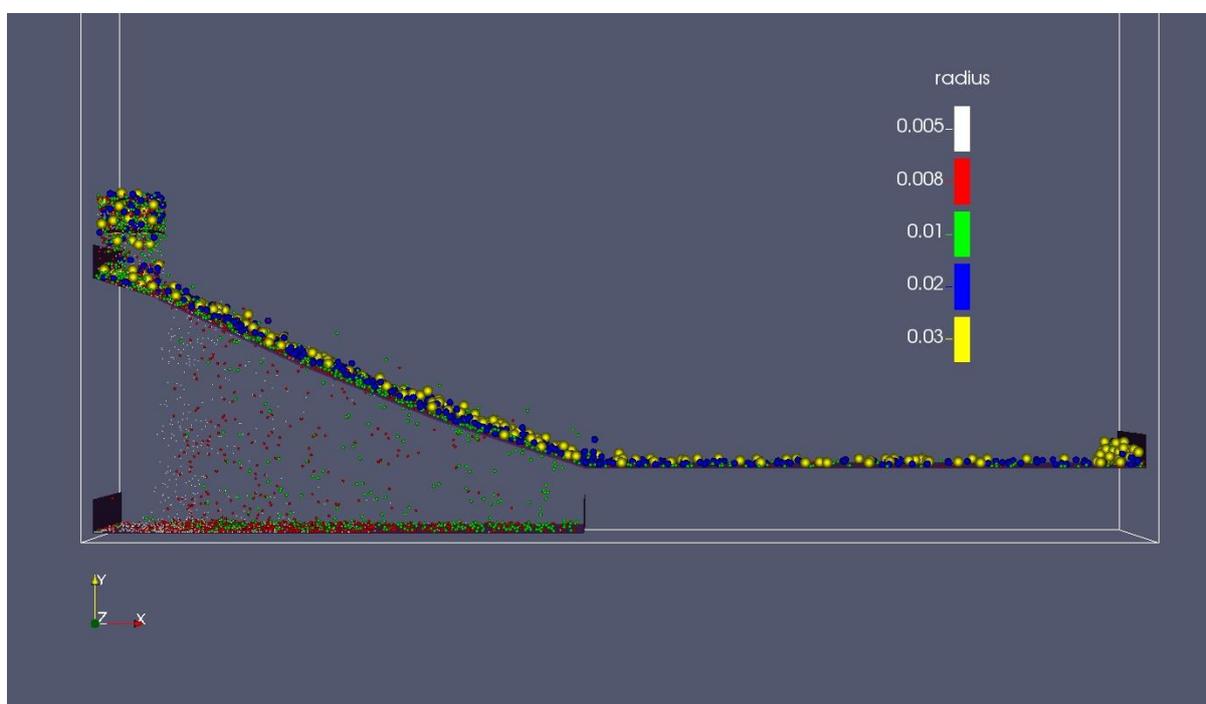
پیوست ۳ شکل ۹- شبیه سازی سرند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۵-۱۸-۲۲ درجه.



پیوست ۳ شکل ۱۰- شبیه سازی سرند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۵-۱۸-۲۵ درجه.



پیوست ۳ شکل ۱۱- شبیه‌سازی سرند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۱۸-۲۲-۲۵ درجه.



پیوست ۳ شکل ۱۲- شبیه‌سازی سرند با روزنه مربعی و زوایای پنل ۲۵-۲۲-۲۵ درجه.

فهرست منابع

- [1] Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique* 29, 47–65.
- [2] Ting, J.M., Khwaja, M., Meachum, L.R., Rowell, J.D., 1993. An ellipse-based discrete element model for granular materials. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 17, 603–623.
- [3] Shimosaka, A., Higashihara, S., Hidaka, J., 2000. Estimation of the sieving rate of powders using computer simulation. *Adv. Powder Technol.* 11, 487–502.
- [4] Solding, M., 2000. Influence of particle size and bed thickness on the screening process. *Miner. Eng.* 13, 297–312.
- [5] Li, J., Webb, C., Pandiella, S.S., Campbell, G.M., 2002. A numerical simulation of separation of crop seeds by screening—effect of particle bed depth. *Trans IChemE* 80, 109–117.
- [6] 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. *Appl. Math. Model.* 26, 89–111.
- [7] Solding, M., 2002. Transport velocity of a crushed rock material bed on a screen. *Miner. Eng.* 15, 7–17.
- [8] Li, J., Webb, C., Pandiella, S.S., Campbell, G.M., 2003. Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation. *Powder Technol.* 133, 190–202.
- [9] Raji, A.O., Favier, J.F., 2004. Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method. I: Theory, model development and validation. *J. Food Eng.* 64, 359–371.
- [10] Cleary, P.W., 2004. Large scale industrial DEM modelling. *Eng. Computation.* 21, 169–204.
- [11] Balevičius, R., Džiugys, A., Kačianauskas, R., Maknickas, A., Vislavičius, K., 2006. Investigation of performance of programming approaches and languages used for numerical

simulation of granular material by the discrete element method. *Comput. Phys. Commun.* 175, 404–415.

[12] Tavarez, F.A., Plesha, M.E., 2007. Discrete element method for modelling solid and particulate materials. *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 70, 379–404.

[13] Cleary, P.W., Morrison, R.B., 2008. Editorial. *Miner. Eng.* 21, 743.

[14] Cleary, P.W., Sinnott, M.D., 2008. Assessing mixing characteristics of particle-mixing and granulation devices. *Particuology* 6, 419–444.

[15] Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D., 2008. DEM prediction of particle flows in grinding processes. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 58, 319–353.

[16] Lu, N., Anderson, M.T., Likos, W. J., Mustoe, G.W., 2008. A discrete element model for kaolinite aggregate formation during sedimentation. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 32, 965–980.

[17] Kruggel-Emden, H., Sturm, M., Wirtz, S., Scherer, V., 2008. Selection of an appropriate time integration scheme for the discrete element method (DEM). *Comput. Chem. Eng.* 32, 2263–2279.

[18] Cleary, P.W., 2009a. Ball motion, axial segregation and power consumption in a full scale two chamber cement mill. *Miner. Eng.* 22, 809–820.

[19] Cleary, P.W., 2009b. Industrial particle flow modelling using discrete element method. *Eng. Computation.* 26, 698–743.

[20] Cleary, P.W., Morrison, R.D., 2009. Particle methods for modelling in mineral processing. *Int. J. Comput. Fluid. D.* 23, 137–146.

[21] P.J. Owen., P.W. Cleary., 2009. Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM). *Powder Technology* 193 , 274–288

[22] CHEN Yan-hua, TONG Xin., 2009. Application of the DEM to screening process: a 3D simulation. *Mining Science and Technology* 19, 0493–0497.

- [23] Ketterhagen, W.R., Am Ende, M.T., Hancock, B.C., 2009. Process Modeling in the Pharmaceutical Industry using the Discrete Element Method. *J. Pharm. Sci.* 98, 442–470.
- [24] Kozicki, J., Donzé, F.V., 2009. YADE-OPEN DEM: an open-source software using a discrete element method to simulate granular material. *Eng. Computation.* 26, 786–805.
- [25] Dong, K.J., Yu, A.B., Brake, I., 2009. DEM simulation of particle flow on a multi-deck banana screen. *Miner. Eng.* 22, 910–920.
- [26] CHEN Yanhua , TONG Xin .,2010. Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology* 20, 0615–0620.
- [27] Shmulevich, I., 2010. State of the art modeling of soil–tillage interaction using discrete element method. *Soil Till. Res.* 111, 41–53.
- [28] FrantzDale, B., Plimpton, S.J., Shephard, M.S., 2010. Software components for parallel multiscale simulation: an example with LAMMPS. *Eng. Comput.* 26, 205–211.
- [29] Zhao Lala, Zhao Yuemin, Liu Chusheng, Li Jun, Dong Hailin .,2011. Simulation of the screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM. *Mining Science and Technology (China)* 21 , 677–680.
- [30] Wang Guifeng, Tong Xin., 2011. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)* 21, 451–455.
- [31] Thornton, C., Cummins, S.J., Cleary, P.W., 2011. An investigation of the comparative behaviour of alternative contact force models during elastic collisions. *Powder Technol.* 210, 189–197.
- [32] Fernandez, J.W., Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison R.D., 2011, Using SPH one-way coupled to DEM to model wet industrial banana screens. *Miner. Eng.* 24, 741–753.
- [33] Kloss, C., Goniva, C., 2011. LIGGGHTS-open source discrete element simulations of granular materials based on LAMMPS. *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)* 2, 781–788.

- [34] Li, S., Marshall, J.S., Liu, G., Yao, Q., 2011. Adhesive particulate flow: The discrete-element method and its application in energy and environmental engineering. *Prog. Energ. Combust.* 37, 633–668.
- [35] Xiao, Jianzhang , Tong , Xin ., 2012 . Particle stratification and penetration of a linear vibrating screen by the discrete element method. *International Journal of Mining Science and Technology* 22, 357-362
- [36] Goniva, C., Kloss, C., Deen, N.G., Kuipers, J. A.M., Pirker, S., 2012. Influence of rolling friction on single spout fluidized bed simulation. *Particuology* 10, 582– 591.
- [37] Gary W. Delaney, Paul W. Cleary, Marko Hilden, Rob D. Morrison., 2012. Testing the validity of the spherical DEM model in simulating real granular screening processes. *Chemical Engineering Science* 68, 215–226.
- [38] Chand, R., Khaskheli, M.A., Qadir, A., Ge, B., Shi, Q., 2012. Discrete particle simulation of radial segregation in horizontally rotating drum: Effects of drum-length and non-rotating end-plates. *Physica A* 391, 4590–4596.
- [39] Chen, J., Huang, B., Chen, F., Shu, X., 2012. Application of discrete element method to Superpave gyratory compaction. *Road Mater. Pavement* 13, 480–500.
- [40] Tancredi, G., Maciel, A., Heredia, L., Richeri, P., Nesmachnow, S., 2012. Granular physics in low-gravity environments using discrete element method. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 420, 3368–3380.
- [41] Delaney, G.W., Cleary, P.W., Hilden, M., Morrison, R.D., 2012. Testing the validity of the spherical DEM model in simulating real granular screening processes. *Chem. Eng. Sci.* 68, 215–226.
- [42] Dong, K.J., Yu, A.B., 2012. Numerical simulation of the particle flow and sieving behaviour on sieve bend/low head screen combination. *Miner. Eng.* 31, 2–9.
- [43] Nassauer, B., Kuna, M., 2013. Contact forces of polyhedral particles in discrete element method. *Granul. Matter.* 15, 349–355.

- [44] Liu Chusheng, Wang Hong, Zhao Yuemin, Zhao Lala, Dong Hailin., 2013. DEM simulation of particle flow on a single deck banana screen. *International Journal of Mining Science and Technology* 23 , 273–277.
- [45] Plimpton, S.J., Gale, J.D., 2013. Developing community codes for materials modeling. *Curr. Opin. Solid St. M.* 17, 271–276.
- [46] Just, S., Toschkoff, G., Funke, A., Djuric, D., Scharrer, G., Khinast, J., Knop, K., Kleinebudde, P., 2013. Experimental Analysis of Tablet Properties for Discrete Element Modeling of an Active Coating Process. *AAPS PharmSciTech.* 14, 402–411.
- [47] Yoshida, Y., Ishikawa, S., Shimosaka, A., Shirakawa, Y., Hidaka, J., 2013. Estimation equation for sieving rate based on the model for undersized particles passing through vibrated particle bed. *J. Chem. Eng. Jpn.* 46, 116–126.
- [48] Dong, H., Liu, C., Zhao, Y., Zhao, L., 2013. Influence of vibration mode on the screening process. *Int. J. Mining Sci. Technol.* 23, 95–98.
- [49] Dong, K. J., Wang, B., Yu, A. B., 2013. Modeling of particle flow and sieving behavior on a vibrating screen: from discrete particle simulation to process performance prediction. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, 11333–11343.
- [50] Zhang, L., Quigley, S.F., Chan, A. H.C., 2013. A fast scalable implementation of the two-dimensional triangular Discrete Element Method on a GPU platform. *Adv. Eng. Softw.* 60-61, 70–80.
- [51] Kruggel-Emden, H., Elskamp, F., 2014. Modeling of screening processes with the discrete element method involving non-spherical particles. *Chem. Eng. Technol.* 37, 847–856.
- [52] LAMMPS, 2014. LAMMPS user manual. USA: Sandia National Laboratories. Retrieved from <http://lammps.sandia.gov/doc/Manual.html>
- [53] LIGGGHTS, 2014. LAMMPS improved for general granular and granular heat transfer simulations. Retrieved from <http://www.cfdem.com>

- [54] Zhanfu Li, Xin Tong, Bi Zhou, Xiaoyue Wang., 2015. Modeling and parameter optimization for the design of vibrating screens. *Minerals Engineering* 83, 149–155.
- [55] M. Jahani, A. Farzanegan, M. Noaparast., 2015. Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM Solve. *Powder Technolog.*
- [56] Akbar Jafari, Vahid Saljooghi Nezhad., 2016. Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear. *Powder Technology* 297, 126–143.
- [57] Lala Zhao, Yuemin Zhao, Chunyong Bao, Qinfu Hou, Aibing Yu., 2017. Optimisation of a circularly vibrating screen based on DEM simulation and Taguchi orthogonal experimental design. *Powder Technology* 310, 307–317.
- [58] A. Davoodi, M. Bengtssonb, E. Hulthéna, C.M. Evertssona., 2019. Effects of screen decks' aperture shapes and materials on screening efficiency. *Minerals Engineering* xxx, xxx–xxx.

Abstract

In this research, the process of sieving granular materials by vibrating three-panel screen with the discrete element method has been simulated. The laws of collision and inter particle forces are presented and the Hertz-Mindlin law is used to model the force between particles and boundaries. The screened particles are spherical in shape and the screen aperture are square and rectangular. During the simulation, the differential equations governing the motion of spherical particles are solved numerically and their behavior is predicted. The software used was open source under the Linux operating system, the geometric dimensions of the three-plane screen and the physical parameters of the feed were determined. After performing ninety-four simulations, the effect of various parameters such as vibration amplitude, vibration frequency and aperture shape on the screening efficiency were investigated and the relevant results were reported. Screen efficiencies with square and rectangular apertures in different amplitudes and frequencies are compared and the results obtained with laboratory tests and simulations are compared quantitatively and qualitatively and the difference results were less than 5%. At low vibration amplitude and high vibration frequency, the square shaped screen has better efficiency than the rectangular sized screen, but with increasing vibration amplitude, the rectangular sized screen efficiency is up to 10% higher than the square sized screen.

Keywords: discrete element method, screen panel angle, screen aperture shape, screen efficiency.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

M.Sc. Thesis in Mining Processing Engineering

Evaluation of important parameters affecting the efficiency of screening operation by discrete element method

By: jamal sheikhjami

Supervisor:

Dr. Kiomars seifpanahi shabani

January 2020