

مطالعه‌ی عددی المان گسسته در شناسایی اثر متغیرهای محرک ارتعاشی بر رفع گرفتگی و تخلیه‌ی سیلوی حاوی مواد دانه‌ای

اکبر جعفری^{۱*}، علی ابولقندی^۲، آرش قریبی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

چکیده

رژیم جریان خروجی سیلوه‌ها تحت تأثیر متغیرهای مختلفی، از جمله ویژگی‌های هندسی آن، جنس و اندازه‌ی ذرات و تجهیزات تسهیل‌کننده‌ی جریان قرار دارد. در این تحقیق، از روش المان گسسته جهت شبیه‌سازی و مطالعه‌ی اثر ارتعاشات ناشی از نصب ویبراتور بر جریان خروجی سیلوی حاوی مواد دانه‌ای استفاده شده است. جهت اطمینان به دقت محاسبات، آنالیز حساسیت به فاکتورهای حل عددی صورت پذیرفت. همچنین جهت اعتبارسنجی، مقایسه‌هایی با نتایج تجربی و عددی موجود در مراجع انجام شده است. مشاهده‌ی شرایط واقعی نشان می‌دهد که وقتی دهانه‌ی سیلو به اندازه‌ی کافی بزرگ نیست، سیلو دچار انسداد می‌شود. در این تحقیق، با انجام تعدادی شبیه‌سازی، آستانه‌ی اندازه‌ی دهانه که منجر به انسداد می‌شود تعیین گردید و به عنوان اندازه‌ی بحرانی نام‌گذاری شد. اندازه‌های بزرگ‌تر و کوچک‌تر از آن به ترتیب غیربحرانی و فوق‌بحرانی معرفی شدند و مطالعات بر روی این سه حالت صورت پذیرفت. مطالعات عددی تحریک ارتعاشی دیواره‌ی سیلو، به‌ازای فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلف انجام شده است. به‌علاوه، جهت پی‌بردن به تأثیر محل نصب ویبراتور، شبیه‌سازی‌های لازم انجام شد و بر اساس نتایج عددی، وقتی محل آن در محدوده‌ی ۲۰٪ از ارتفاع پایین کیف تخلیه بوده، بیشترین تأثیر را داشته است. به‌عنوان نمونه‌ای دیگر از نتایج، مشخص شد که با افزایش فرکانس، ارتعاش میزان اثرگذاری ویبراتور تقویت می‌شود، هرچند با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، تفاوت تأثیر فرکانس‌های مختلف کاهش می‌یابد. در رابطه با اثرگذاری هر کدام از متغیرهای مسئله، علاوه‌بر توضیح نظری، به تفسیر و چرایی فیزیکی آن‌ها نیز پرداخته شده است.

کلمات کلیدی:

سیلو، انسداد، مواد دانه‌ای، المان گسسته.

Effects of vibrator characteristics on unclogging and outflow of silo containing granular material-DEM approach

Akbar Jafari^{1*}, Ali Abolghandi² and Arash Gharibi²

1-Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

2-Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

Abstract

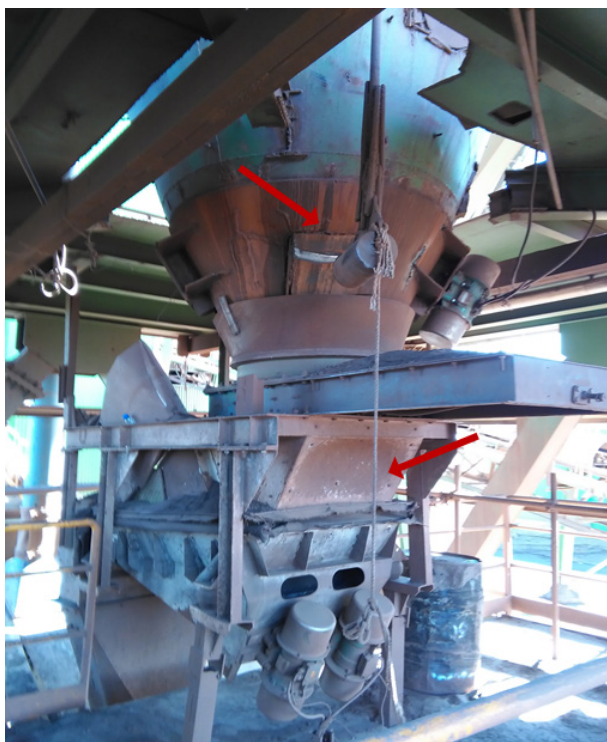
The output flow regime of the silo is influenced by different variables including its geometrical features, type and size of particles and flow aid devices. In this research, the Discrete Element Method (DEM) has been used to simulate and study effects of vibration, caused by installing a vibrator, on the output flow of silos containing granular materials. In order to ensure the accuracy of the simulations, the sensitivity analysis was performed on the numerical solution factors. For validation, comparisons with experimental and numerical results available in the open literature have been made. Observing the real conditions shows that when the opening of the silo is not large enough, the silo becomes blocked. Here, by performing a number of simulations, the opening size threshold at which the silo becomes blocked was determined and named as the critical size. Sizes larger and smaller than that threshold were introduced as non-critical and super-critical respectively, and numerical studies were carried out on these three cases. Numerical studies have been done for different values of the vibration frequency and amplitude. Moreover, to find out effects of the vibrator location, relevant stimulations were conducted, and based on the obtained results, when its location was within 20% of the bottom height of the discharge funnel, it had the greatest effect. As another conclusion, it was found that by increasing the vibration frequency, the impact of the vibrator increases however, the difference in the effects of different frequencies decreases with the increase of the vibration amplitude. Regarding effects of the studied variables, in addition to the theoretical explanation, their physical interpretation and reasoning has also been discussed.

Keywords

Silo; Blockage; granular material; DEM.

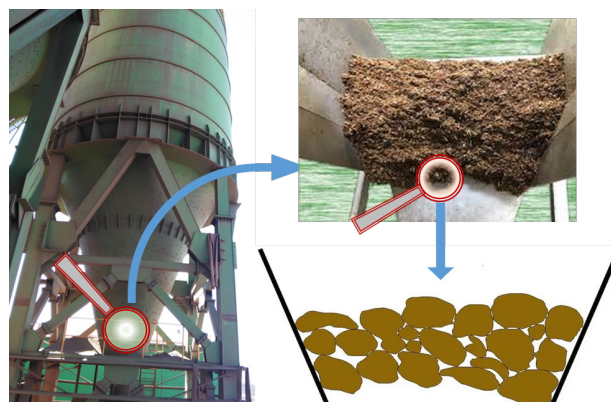
۱- مقدمه

سیلو یک تجهیز جهت ذخیره‌ی مواد دانه‌ای در بسیاری از صنایع، از جمله صنایع کشاورزی، مواد غذایی، معدنی، سیمان، پتروشیمی و دارویی است. تجهیز مذکور شامل یک محفظه‌ی بزرگ ذخیره و یک یا چند دریچه‌ی تخلیه است. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده، گرفتگی (انسداد) خروجی سیلو یک مشکل متداول است که به علت چسبندگی ذرات یا قفل‌شدگی آن‌ها و تشکیل سقف قوسی در ناحیه‌ی خروجی رخ می‌دهد. کاربران در عمل روش‌های مختلفی، همچون ضربه‌زدن و نصب ویبراتور را برای غلبه بر این مشکل اجرا کرده‌اند که البته عدم اجرای مؤثر آن‌ها، باعث عدم کارایی و حتی تخریب سیلو مشابه نمونه‌های شکل ۲ می‌گردد. با توجه به حادبودن این مشکل، موضوع آن دارای ارزش و اهمیت کاربردی بوده و از این‌رو مورد توجه محافل علمی و صنعتی قرار گرفته است. جهت یافتن راهکارهای مؤثر برای غلبه بر این مشکل، تحقیقات متنوعی با رویکردهای تئوری و تجربی توسط پژوهشگران مختلف انجام و منتشر شده است که در ادامه برخی از آن‌ها مرور می‌شود.



شکل ۲- خرابی دیواره‌ی سیلو در اثر ضربه‌ی چکش با هدف رفع گرفتگی.

تحقیق جانسن (Janssen) در سال ۱۸۹۵، یکی از نخستین مطالعات در ارتباط با مطالعه‌ی جریان تخلیه‌ی سیلوه‌ها محسوب می‌شود [۱]. بورلو (Beverloo) و همکاران نیز با روش تجربی به مطالعه‌ی جریان خروجی سیلوه‌ها پرداختند [۲]. واکر (Walker) روابطی تقریبی برای تعیین فشار وارد بر دیواره‌های سیلو و پایداری قوس درون آن را ارائه کرد [۳]. والترز (Walters) با رویکردی تحلیلی، به بررسی تنش و فشار وارد بر دیواره‌های قائم سیلو پرداخت [۴]. مطالعه‌ی تجربی آرنولد (Arnold) و کادن (Kaaden) از اولین تحقیقات منتشرشده در رابطه با بررسی اثر ارتعاشات مکانیکی بر اصطکاک مؤثر بین دو جسم محسوب می‌شود [۵]. بر اساس نتایج تحقیق مذکور، ارتعاشات باعث تضعیف اثر اصطکاک شده و حرکت را تسهیل می‌نماید. در همین زمینه، جارت (Jarrett) و دنیس (Dennis) اصطکاک دیواره‌ی سیلو و اثر آن بر نرخ



شکل ۱- انسداد دهانه‌ی خروجی سیلو ناشی از تشکیل گنبد قوسی ذرات نزدیک دهانه‌ی خروجی.

هوا و مکان قرارگیری آن بر رژیم جریان و نرخ تخلیه‌ی سیلو بررسی شده است. آن‌ها نشان دادند که با افزایش نرخ دمنده، چسبندگی ذرات کاهش یافته و نرخ تخلیه افزایش می‌یابد، اما این تأثیر مثبت یک‌نواخت نبوده، بلکه به گونه‌ای بوده که بعد از گذر از یک مقدار حدی، تأثیر منفی داشته است. در تحقیقی دیگر در همین زمینه، لو (Lu) و همکاران مطالعاتی بر روی تأثیر دمنده بر روی جریان مواد چسبنده‌ی درون سیلو انجام داده‌اند [۱۳]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که دمش هوا گرادیان فشار مطلوب را در نزدیکی دهانه‌ی خروجی فراهم کرده و باعث به حرکت درآمدن ذرات می‌شود. حرکت ذرات در اثر نیروی دمش هوا به عنوان عامل احتمالی جدایش ذرات و جلوگیری از انسداد معرفی شده است.

در کنار روش‌های تحلیلی و تجربی، روش المان گسسته در سال‌های اخیر جایگاه مهمی در شبیه‌سازی مواد دانه‌ای پیدا کرده و در مدل‌سازی تجهیزات مرتبط با مواد دانه‌ای به کار رفته است [۱۴، ۱۵]. در رابطه با مدل‌سازی سیلو می‌توان به تحقیق گودا (Goda) و ابرت (Ebert) اشاره نمود [۱۶]. آن‌ها نتیجه گرفتند که تشکیل ناحیه‌ی سکون (مرده) در نواحی مجاور دیواره‌های سیلو، باعث کاهش نرخ جریان خروجی می‌شود. همچنین آن‌ها با بررسی فشار وارد بر دیواره‌های سیلوی مخروطی مشاهده کردند که پیک فشار در محل اتصال قیف به مخزن سیلو اتفاق افتاده و دلیل آن تغییر ناگهانی شیب در این محل بیان شده است. تحقیق لانگستون (Langston) و همکاران با روش المان گسسته به مطالعه‌ی اثر ارتعاشات بر روی جریان مواد درون سیلو پرداخته است [۱۷]. بر اساس نتایج تحقیق مذکور، ارتعاش یک زبانه‌ی درون سیلو با فرکانس بالا و دامنه‌ی کم می‌تواند مانع از تشکیل گنبد

تخلیه را مورد مطالعه قرار دادند [۶]. کیوینگ (Kiwing) و همکاران با به‌کارگیری روش تجربی، مطالعاتی بر روی تأثیر قطر خروجی سیلو بر تخلیه‌ی آن انجام دادند [۷]. زوریگوئل (Zuriguell) و همکاران با استفاده از روش آزمایشگاهی به بررسی اندازه‌ی قطر بحرانی سیلو برای دانه‌های شیشه‌ای، پلاستیکی، فولادی و سربی پرداختند [۸]. یوناک (Unac) و همکاران با روش‌های تجربی و تئوری اثر شیب، اندازه‌ی ذرات و قطر خروجی را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر خروجی، نرخ تخلیه افزایش می‌یابد و هرچه قطر ذرات کوچک‌تر باشد، جریان تقویت می‌شود [۹]. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که هرچه شیب قیف افزایش پیدا کند، نرخ خروجی نیز افزایش می‌یابد. طی تحقیق ملمان (Mellmann) و همکاران که با روش تجربی انجام شده، تأثیر شکل ذرات بر روی جریان خروجی سیلو مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰]. آن‌ها با استفاده از عدد بی‌بعد فرود (Fr) و همچنین فاکتور شکل که به صورت نسبت طول به عرض ذرات تعریف می‌شود، جریان تخلیه را مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس نتایج آن تحقیق، جریان ذرات تحت تأثیر شکل و چسبندگی آن‌ها بوده و همچنین عدد فرود وابسته به خواص ذرات است و با افزایش فاکتور شکل، عدد فرود کاهش می‌یابد. ویلسون (Wilson) و همکاران با استفاده از روش تجربی، مطالعاتی بر روی سیلوی حاوی دانه‌های کروی از جنس شیشه و سرب انجام داده و قطر بحرانی سیلو را تعیین نمودند [۱۱]. از جمله تحقیقات تجربی انجام‌شده در زمینه‌ی به‌کارگیری ابزارهای کمکی جهت تخلیه سیلو، می‌توان به کار هوانگ (Huang) و همکاران اشاره نمود [۱۲]. طی آن مطالعه‌ی آزمایشگاهی، تأثیر میزان دمش

این تحقیق، امکان استفاده از روش المان گسسته در مدل‌سازی مسئله مورد استفاده قرار گرفته و کارایی آن ارزیابی می‌شود. از نقطه نظر کاربردی، تحقیق حاضر مستقیماً به رفع مشکل انسداد سیلوه‌ها می‌پردازد که بسیاری از صنایع، از جمله معادن، فولاد، سیمان و کشاورزی به آن مبتلا هستند و نتایج این تحقیق می‌تواند در این گونه موارد مفید واقع شود. در عین حال از جنبه‌ی نوآوری، باید گفت که تعداد نسبتاً کمی مقاله در این رابطه منتشر شده و هنوز این حوزه به تکامل نرسیده است. مطالعه‌ی اثر ارتعاش دیواره‌ها، به نحوی که در این تحقیق به آن پرداخته شده، جدید محسوب می‌شود. در عمل، بسیاری اوقات محل نصب و تنظیمات بهینه‌ی ویبراتور با روش سعی و خطا جستجو می‌شود که معمولاً زمان‌بر و پرهزینه است؛ لذا در اختیار داشتن نتایج این تحقیق می‌تواند در جهت کاهش میزان سعی و خطا در شرایط واقعی مفید واقع شود. به عنوان نمونه، در اینجا ثابت شد که در سیلوی با اندازه‌ی دهانه‌ی غیربحرانی، نصب ویبراتور تأثیر قابل توجهی بر تقویت نرخ تخلیه‌ی آن ندارد. به عنوان مثالی دیگر مشخص شد که محل نصب ویبراتور باید تا حد ممکن به خروجی نزدیک باشد و دیواره انعطاف‌پذیری کافی‌ای برای ایجاد دامنه‌ی ارتعاش داشته باشد.

۲- تئوری و فرمول‌بندی

با توجه به اینکه مقرر است از روش المان گسسته استفاده شود، توضیحاتی در این رابطه در این بخش ارائه می‌گردد. در یک سیستم با N ذره، موقعیت، سرعت و نیروهای بین ذرات در لحظه‌ی t_0 مشخص است؛ بنابراین با انتگرال‌گیری از معادلات حرکت نیوتن که در زیر آمده،

قوسی پایدار درون سیلو شود و از طرفی، ارتعاش زبانه با فرکانس کم و دامنه‌ی زیاد تأثیر قابل توجهی بر روی جابه‌جاشدن مواد درون سیلو دارد. فرایگ (Fraige) و همکاران یک قیف دوبعدی حاوی ذرات چندوجهی را با روش المان گسسته مدل‌سازی نموده و نشان دادند که ارتعاشات تأثیر قابل توجهی بر ممانعت از انسداد خروجی قیف دارد [۱۸]. بر اساس نتایج مطالعات آن‌ها، هرچه محل ارتعاش از دهانه‌ی خروجی فاصله‌ی بیشتری داشته باشد، انرژی آن بیشتر هدر رفته و تأثیر آن بر جلوگیری از انسداد کاهش می‌یابد. طبق نتایج مرجع مذکور، فرکانس ارتعاش تأثیر محسوسی بر نرخ تخلیه ندارد، در حالی که دامنه‌ی ارتعاش تأثیر مستقیم قابل توجهی بر آن دارد. ماچت (Matchett) اثر ارتعاشات بر روی جریان درون قیف مرتعش را با روش تحلیلی مورد مطالعه قرار داده و یک رابطه‌ی ساده برای برآورد نرخ تخلیه ارائه داده است [۱۹]. موتلانو (Motellano) و همکاران با دو رویکرد آزمایشگاهی و المان گسسته، نرخ تخلیه و الگوی جریان از سیلوی آزمایشگاهی حاوی ذرات شیشه و همچنین سیلوی حاوی دانه‌های ذرت را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۰]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هرچه ضریب اصطکاک بین ذرات افزایش پیدا کند، زمان تخلیه نیز افزایش می‌یابد. کوبیلکا (Kobyłka) و مولندا (Molenda) انسداد سیلو با ناحیه‌ی خروجی مستقیم را به روش المان گسسته مورد مطالعه قرار دادند [۲۱]. آن‌ها با شبیه‌سازی بار اعمال شده توسط ذرات به اجزای درون سیلو و مطابقت آن با نتایج تجربی، بر روش کار خود صحت گذاشته‌اند.

از لحاظ ضرورت انجام این تحقیق، باید به دو حوزه‌ی تئوری و کاربردی اشاره نمود. در زمینه‌ی تئوری، با انجام

همچنین سرعت تغییر فرم بستگی دارد [۲۲]. در واقع رفتار اجسام برخوردکننده صرفاً الاستیک نبوده، بلکه از نوع ویسکوالاستیک است؛ بنابراین در تعیین نیروی برخورد از ترکیب مدل تنش‌های تماسی هرتز و مدل ویسکوالاستیک کلوین استفاده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، میزان لهیدگی برآیند، برابر ξ^k بوده که اگر ذرات کروی باشند، سطح تماس به صورت دایره‌ای به شعاع a درمی‌آید. اگر دو ذره تحت نیروی P به هم فشرده شوند، شعاع دایره‌ی لهیدگی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۲۳].

$$P = \frac{4E^* a^3}{3R^*} \longleftrightarrow a = \sqrt[3]{\frac{3R^* P}{4E^*}} \quad (۳)$$

در رابطه‌ی فوق، R^* و E^* به ترتیب شعاع مؤثر و ضریب الاستیک مؤثر می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j} \quad (۴)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (۵)$$

در معادلات فوق، E_i و E_j مدل‌های یانگ و ν_i و ν_j ضرایب پواسن ذرات برخوردکننده می‌باشند. از طرفی، با استفاده از روابط هندسی، معادله‌ی زیر برای ارتباط بین میزان تداخل و لهیدگی به دست می‌آید.

$$a = (\xi R^*)^{1/2} \quad (۶)$$

بدین ترتیب با مشخص بودن موقعیت مرکز ذرات، مقدار ξ^k از رابطه‌ی (۵) به دست آمده و سپس با ترکیب روابط (۶) و (۳)، نیروی ناشی از تغییر شکل الاستیک وارد بر ذرات به دست می‌آید که متناسب با $E^*(R^*\xi^3)^{1/2}$ می‌باشد.

می‌توان موقعیت و سرعت همه‌ی ذرات را در زمان t_j که به اندازه‌ی بازه‌ی Δt بعد از t_0 است به دست آورد. با تکرار این فرآیند، مجموعه‌ی کاملی از اطلاعات در مورد موقعیت، سرعت، شتاب و انرژی تک‌تک ذرات در خلال زمان در اختیار قرار می‌گیرد.

$$\frac{\partial^2 \vec{r}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{m_i} F_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \varphi_j, \omega_j) \quad , (i, j=1, \dots, N) \quad (\text{الف-۱})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2} = \frac{1}{J_i} \bar{M}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \varphi_j, \omega_j) \quad , (i, j=1, \dots, N) \quad (\text{ب-۱})$$

در معادلات فوق، \vec{F}_i و \bar{M}_i به ترتیب نیرو و گشتاور وارده به دانه‌ی i ام به جرم m_i و ممان اینرسی J_i هستند. نیروها و گشتاورها توابعی از موقعیت \vec{r}_j ، وضعیت زاویه‌ای φ_j ، سرعت خطی \vec{v}_j و سرعت زاویه‌ای ω_j دانه هستند. نیروی \vec{F}_i شامل تمام نیروهایی می‌شود که در نتیجه‌ی تماس بین ذره و همسایگان آن به وجود می‌آید و در نقطه‌ی تماس دو ذره اعمال می‌گردد که نمایش ریاضی آن بدین صورت است:

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N \vec{F}_{ij} \quad (۲)$$

در رابطه‌ی بالا، \vec{F}_{ij} معرف نیروی وارده از سوی دانه‌ی j ام به دانه‌ی i ام است. قابل ذکر است که نیروهای تماسی به جنس، شکل سطح تماس و سرعت نسبی در منطقه‌ی تماس بستگی دارند. به علاوه، این نیروها باعث ایجاد گشتاوری حول مرکز ذره‌ی مورد مطالعه می‌شود. یک بخش اساسی از تحلیل المان گسسته تعیین نیروی برخورد بین اجزاست. تاکنون مدل‌های مختلفی برای این منظور توسعه داده شده که هرکدام برای شرایط خاصی مناسب هستند. در اینجا از مدل ویسکوالاستیک کلوین هرتز برای این منظور استفاده می‌شود. بر مبنای این مدل، نیروی برخورد به جنس، میزان تغییر فرم و

با این اوصاف، نیروی نرمال بین دو ذره ی برخوردکننده از مجموع نیروی الاستیک و نیروی ویسکوز به صورت زیر تعیین می گردد [۲۴].

$$F^n(\xi, \dot{\xi}) = \frac{4E^* \sqrt{R^*}}{3} \left(\xi^{\frac{3}{2}} + \eta \sqrt{\xi} \dot{\xi} \right) \quad (7)$$

$$\epsilon = \exp\left(-\frac{\eta}{\sqrt{2m^* K_n - \eta^2}}\right) \quad (9)$$

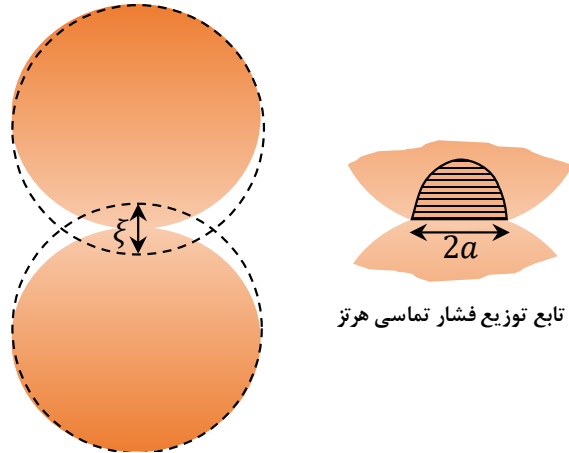
$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \quad (10)$$

در معادله ی فوق، m^* جرم مؤثر مجموعه ی جفت ذره ی برخوردکننده بوده و K_n ضریب فنر الاستیک نرمال است که به تغییر فرم پذیری نرمال وابسته می باشد. البته معمولاً ضریب بازگشت با روش تجربی اندازه گیری شده و بر اساس آن می توان ضریب میرایی را محاسبه نمود.

در رابطه با نیروی مماسی نیز می توان تفسیری مشابه نیروی نرمال ارائه کرد. در واقع، کل نیروی مماسی برابر مجموع نیروی الاستیک و غیرالاستیک است، با این توضیح که معمولاً سهم نیروی اصطکاکی غیرقابل برگشت بیشتر از اثر الاستیک است، چراکه حرکت مماسی به یک طرف انجام شده و بازگشت پذیر نیست. با این حال متناسب با شرایط ذرات و نقطه ی تماس آن ها، این نیرو می تواند از نوع ویسکوز یا اصطکاکی خشک باشد. با این توضیحات، تابع نیروی مماسی به صورت زیر قابل بیان است [۲۴].

$$F^t = -\text{sign}(v_{rel}^t) \cdot \min\left(\gamma^t |v_{rel}^t|, \mu |F^n|\right) \quad (11)$$

در معادله ی فوق، v_{rel}^t مؤلفه ی مماسی سرعت نسبی، γ^t ضریب میرایی مماسی ویسکوز و μ ضریب اصطکاکی مماسی خشک (کلومب) است. نیروی مماسی یکی از انواع ویسکوز یا خشک است که بر اساس معادله ی فوق، کوچک ترین از بین این دو در نظر گرفته می شود. بدیهی است که با توجه به تعداد زیاد معادلات دیفرانسیل حاکم،



تابع توزیع فشار تماسی هر تاز

شکل ۳- چگونگی تغییر شکل اجسام در تماس و تابع توزیع فشار تماسی.

جمله ی دوم معادله ی فوق به ضریب میرایی درونی ماده، η بستگی دارد. با این حال می توان از تعریف ضریب بازگشت، $0 \leq \epsilon \leq 1$ ، استفاده نمود و آن را به صورت ملموس تری بازنویسی کرد. این ضریب نماینده ی میزان بازگشت انرژی پس از برخورد است، به گونه ای که مقدار واحد آن نشان دهنده ی عدم وجود رفتار ویسکوز و عدم تلفات است. از نقطه نظر سینماتیکی، این ضریب بر حسب نسبت سرعت نسبی نرمال بعد از برخورد، v_{rel}^n ، به سرعت نسبی نرمال قبل از برخورد، v_{rel}^n ، به صورت زیر قابل بیان است.

$$\epsilon = \frac{v_{rel}^n}{v_{rel}^n} \quad (8)$$



شکل ۴- نصب ویبراتور روی دیواره‌ی قیف تخلیه در شرایط واقعی.

در دنیای واقعی، با تغییر سرعت دوران موتور محرک دستگاه ویبراتور، فرکانس ارتعاش قابل تنظیم بوده و به طریقی مشابه می‌توان مقادیر مختلف فرکانس تحریک ارتعاشی را در دنیای شبیه‌سازی نیز اعمال نمود. در شرایط واقعی، دامنه‌ی ارتعاش جدای از وابستگی به فرکانس، به انعطاف‌پذیری ورق سازنده‌ی قیف و مقدار نیروی تحریک نیز وابسته است که البته با توجه به عدم امکان تغییر ورق سازه با مقدار جرم وزنه‌های دوار نابالانس، دامنه‌ی ارتعاش کنترل می‌شود. محدوده‌ی اثر ویبراتور و دامنه‌ی ارتعاش متناسب با سفتی ورق و نیروی تحریک است و با فاصله از محل تحریک کاهش می‌یابد. در دنیای شبیه‌سازی، امکان پیاده‌سازی دامنه‌ی ارتعاش و اثر محل نصب ویبراتور کاملاً منطبق با شرایط واقعی

امکان حل تحلیلی آن‌ها وجود ندارد و بایستی به صورت عددی حل شوند. در اینجا از الگوریتم پیش‌بینی - تصحیح گیر (Gear) برای این منظور استفاده می‌شود [۲۷]. جهت اجرای شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، از برنامه‌ی منبع‌باز لایتس (LIGGGHTS) استفاده شده که در واقع نسخه‌ی بهبودیافته‌ی برنامه‌ی منبع‌باز لمپس (LAMMPS) است [۲۸]. برای این منظور، کدهای لازم تهیه گردید و جهت اجرای پایدار و استفاده از حداکثر ظرفیت محاسباتی، در سیستم‌عامل لینوکس نسخه‌ی اوپنتو برنامه‌ها اجرا شده است.

۳- مواد و روش کار

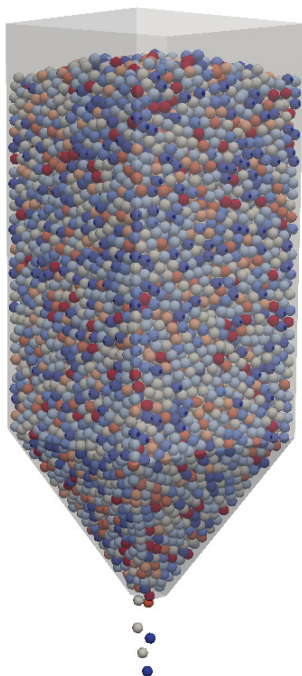
روش‌های مختلفی برای رفع گرفتگی سیلوها و شوت‌ها در عمل اجرا می‌شود، ولی میزان اثرگذاری و شرایط بهینه‌ی آن‌ها جای سؤال است. یکی از این روش‌ها نصب ویبراتور مطابق شکل ۴ روی دیواره‌ی قیف خروجی است که با ایجاد لرزش با فرکانس و دامنه‌ی مشخص، باعث جریان بهتر مواد در خروجی می‌شود. یک سؤال این است که ویبراتور در چه ناحیه‌ای از دیواره‌ی قیف تخلیه نصب گردد تا تأثیر بیشتری در رفع انسداد داشته باشد؟ در همین رابطه، باید به تأثیر فرکانس و دامنه‌ی ارتعاش بر میزان اثرگذاری ویبراتور پرداخته شود. در واقع، در پژوهش جاری، با شبیه‌سازی سیلو در شرایط مختلف، تأثیر هرکدام از پارامترهای فوق‌الذکر بر رفتار تخلیه‌ی سیلو مورد تحقیق قرار می‌گیرد.

جدول ۱- خواص مختلف دیواره و ذرات درون سیلو.

خواص	سمبل و واحد	ذرات	دیواره‌ی سیلو
چگالی	$(\rho) \text{ kg/m}^3$	۲۵۱۶	۱۱۶۳
سفتی	$(E) \text{ MPa}$	۴۱۰۰	۳۰۰۰
ضریب پواسون	ν	۰/۲۲	۰/۳۸
ضریب بازگشت	ϵ	۰/۷۵	۰/۶۲
ضریب اصطکاک	μ	۰/۳	۰/۳

جدول ۲- مشخصات هندسه‌ی سیلو و ذرات شبیه‌سازی.

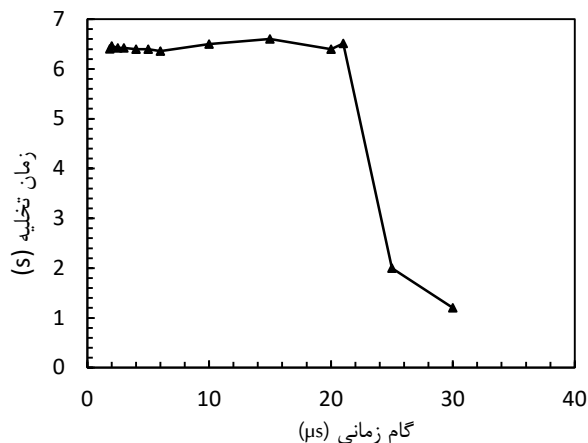
پارامترها	مقادیر
$L(m)$	۰/۲۵
$H(m)$	۰/۵
$\theta(^{\circ})$	۲۷/۵
$D(m)$	۵۷, ۴۲, ۳۲
قطر ذرات $d(mm)$	12.6 mm (10%), 13 mm (10%), 13.6 mm (25%), 14 mm (25%), 14.6 mm (10%), 15 mm (10%), 15.4 mm (10%)



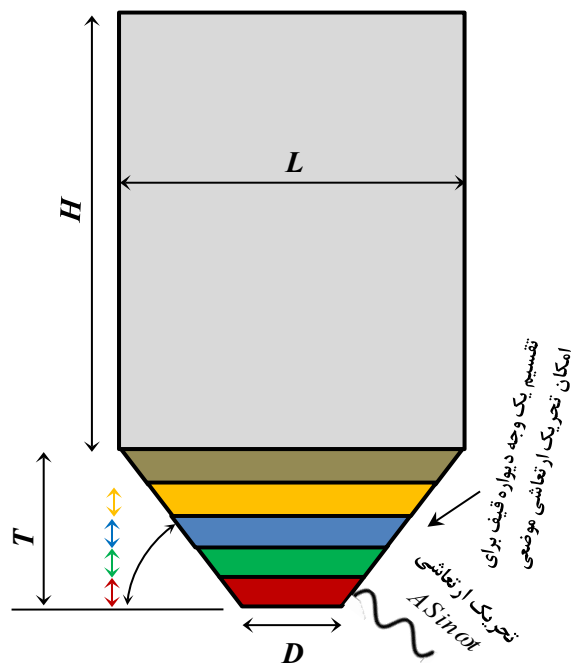
وجود ندارد، هرچند سعی شده تا حد زیادی به واقعیت نزدیک باشد. در این راستا، دیواره‌ی قیف سیلو مطابق شکل ۵ به چند ناحیه‌ی مستقل تقسیم شده و هر بار تحریک و جابه‌جایی هارمونیک قائم به یکی از این نواحی وارد شده است. با این کار، ناحیه‌ی اثر محدود می‌شود و می‌توان به مطالعه‌ی اثر محل نصب ویبراتور پرداخت. مواد انتخاب‌شده دانه‌هایی کروی‌ای از جنس شیشه هستند که مشخصات آن‌ها به صورت کامل در جدول ۱ آمده است. اندازه‌ی قطر ذرات در یک محدوده مطابق با توضیح درج‌شده در جدول ۲ بوده است. جنس بدنه‌ی سیلو از متاکریلیت (Methacrylate) است و خواص آن برگرفته از مقادیر ارائه‌شده در مرجع [۲۰] می‌باشد. دهانه‌ی سیلوی شبیه‌سازی‌شده مربعی با اندازه‌ی ضلع D بوده و مشخصات هندسی آن در جدول ۲ آمده است. بدیهی است با کاهش اندازه‌ی دهانه‌ی خروجی سیلو، احتمال انسداد آن افزایش می‌یابد، لذا آستانه‌ی اندازه‌ی که سیلو دچار انسداد شده و مواد به صورت خودکار از آن خارج نمی‌شود را اندازه‌ی بحرانی می‌نامیم. در اینجا با استناد به نتایج شبیه‌سازی سیلوهای با اندازه‌های مختلف دهانه‌ی خروجی، اندازه‌ی دهانه‌ی بحرانی $D_{cr} = 42 \text{ mm}$ به دست آمده است. بدین ترتیب اگر اندازه‌ی ضلع دهانه‌ی خروجی از این مقدار کمتر باشد، سیلو دچار انسداد است و بدون عامل کمکی، همچون ارتعاشات امکان تخلیه ندارد. در این تحقیق، شبیه‌سازی‌ها به‌ازای اندازه‌ی دهانه‌ی بحرانی، فوق‌بحرانی (دچار انسداد) و غیربحرانی انجام شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده، تحریک ارتعاشی با تحریک هارمونیک با تابع $x = A \omega t$ بوده که در آن A اوج دامنه، ω فرکانس ت آن برحسب rad/s و $f = \frac{\omega}{2\pi}$ فرکانس آن برحسب هرتز است.

۴-۱- آنالیز حساسیت به گام زمانی

برای مطالعه‌ی تأثیر گام زمانی، به‌ازای مقادیر مختلف آن، از ۱,۸۴ تا ۳۰ میکروثانیه، شبیه‌سازی‌های سیلویی با دهانه‌ی ۵۷ mm انجام و نتایج آن به‌صورت نمودار شکل ۶ به‌دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، وقتی گام زمانی کمتر از حدود ۵ میکروثانیه است، تفاوت چندانی در نتایج وجود ندارد و پس از آن اختلاف‌ها افزایش یافته و با عبور از ۲۰ میکروثانیه، تفاوت شدید رخ داده و زمان تخلیه کاهش قابل‌توجهی یافته است. در تفسیر این رفتار، دلایل مختلفی می‌توان برشمرد، از جمله مشاهده و رصد گرافیکی ذرات نشان داد که برخلاف واقعیت برخی ذرات از دیواره‌ی جامد عبور کرده و در فضای آزاد قرار می‌گیرند که ذرات گم‌شده محسوب می‌شوند؛ این اتفاق می‌تواند ناشی از خطای محاسباتی در برآورد نیروی برخورد و به‌تبع آن شتاب، سرعت و موقعیت ذرات باشد. از این‌رو در اینجا گام زمانی کوچک ۱,۸۴ میکروثانیه در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده که در محدوده‌ی پایداری نمودار آنالیز حساسیت به گام زمانی بوده است. البته این مقدار گام زمانی محافظه‌کارانه محسوب می‌شود؛ چراکه خیلی کوچک‌تر از مقداری است که منجر به کسب دقت کافی می‌گردد و هرچند هزینه‌ی محاسباتی را بالا برده، ولی می‌توان از دقت محاسبات در همه‌ی شرایط اطمینان داشت.



شکل ۶- نمودار حساسیت زمان تخلیه به گام زمانی.



شکل ۵- شماتیک و ابعاد سیلو به همراه تقسیم دیواره‌ی کیف و تصویری از یک لحظه از شبیه‌سازی المان گسسته.

۴- نتایج عددی و بحث

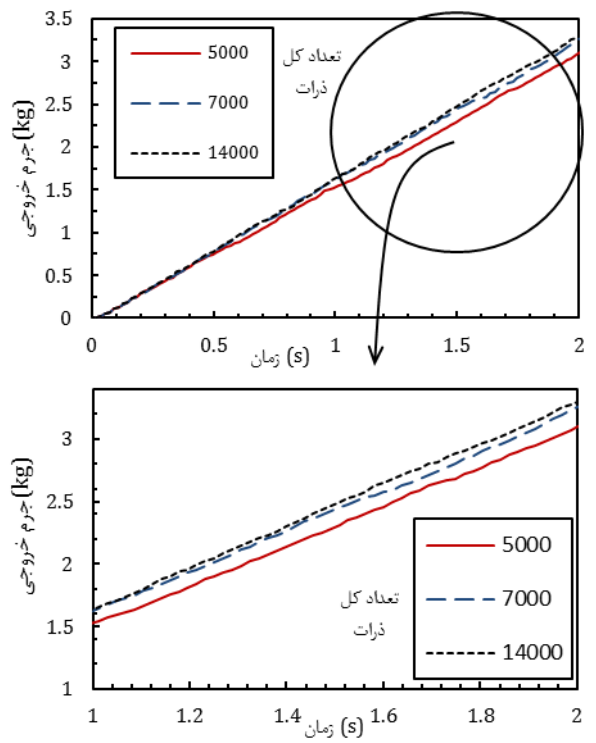
در شبیه‌سازی‌ها، در ابتدا طی بازه‌ی زمانی $t = 0.9 s$ ، تعداد ۱۴۰۰۰ ذره درون سیلوی بسته ریخته می‌شوند. طی زمان $t = 1.3 s$ ، تقریباً همه‌ی ذرات دچار سکون شده و برآیند انرژی جنبشی سیستم به سمت صفر میل می‌نماید و سپس در پیچه‌ی تخلیه باز شده است. شبیه‌سازی‌ها به‌ازای مقادیر مختلف متغیرهای درج‌شده در جدول ۳ انجام شده است.

جدول ۳- پارامترهای شبیه‌سازی.

پارامترها	سمبل	مقادیر
فرکانس	$f(Hz) = \frac{\omega}{2\pi}$	۲۰۰۰، ۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰
دامنه‌ی ارتعاش	$A (mm)$	۳۲، ۲، ۴، ۱، ۶، ۰، ۸
محل ویبراتور		$(0 - T)$ $(0 - 0.2T)$ $(0.2T - 0.4T)$ $(0.4T - 0.6T)$

۲-۴- آنالیز حساسیت به تعداد ذرات (ارتفاع مواد درون سیلو)

مقدار بار درون سیلو باید حداقل به اندازه‌ای باشد که نرخ جریان خروجی آن تقریباً مستقل از ارتفاع بار باشد [۶]. البته در مطالعات تجربی ثابت شده که در برخی مواد اگر ارتفاع بار بیش از یک برابر قطر سیلو باشد، ثبات نرخ تخلیه رخ می‌دهد و البته در عمده‌ی مواد، اگر ارتفاع بار بیش از دو برابر قطر باشد، قطعاً شرایط ثبات حاصل می‌گردد [۲۹]. در اینجا قبل از اجرای شبیه‌سازی‌های نهایی، تعدادی شبیه‌سازی به‌ازای مقادیر مختلف ارتفاع بار اجرا و اثر آن بر نرخ تخلیه‌ی سیلو مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۷ نمودارهای جرم خروجی برحسب زمان برای سیلو با دهانه‌ی ۵۷ mm به‌ازای مقادیر مختلف تعداد ذرات درون آن را نشان می‌دهد. بزرگنمایی نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد ذرات، نوسانات کمتر شده و ثبات شیب نمودار که بیانگر نرخ تخلیه است، بیشتر شده است. می‌توان مشاهده نمود که هرچند افزایش تعداد دانه‌ها بر روی نرخ تخلیه تأثیرگذار بوده، ولی بعد از گذار از تعداد ۷۰۰۰، این نرخ تقریباً تثبیت شده، لذا در اینجا تعداد ذرات ۱۴۰۰۰ برای ادامه شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است تا اطمینان کافی از ثبات جریان در تمامی حالات شبیه‌سازی وجود داشته باشد.

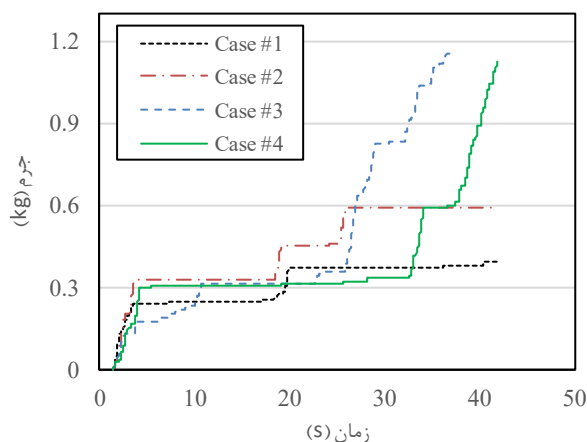


شکل ۷- نمودارهای جرم خروجی - زمان برای سیلو با دهانه‌ی ۵۷ mm به‌ازای مقادیر مختلف تعداد ذرات اولیه.

۳-۴- اعتبارسنجی

جهت اطمینان از فرآیند شبیه‌سازی و نتایج آن، مقایسه‌هایی با نتایج تجربی و همچنین شبیه‌سازی گزارش شده در مراجع صورت پذیرفت. واقعیت این است که نرخ تخلیه لحظه‌ای ثابت نبوده، بلکه حول یک مقدار متوسط نوسان می‌کند. یک مقایسه می‌تواند مربوط به مقدار متوسط نرخ تخلیه باشد که مطابق مقادیر درج شده در جدول ۴، تطابق قابل قبولی بین نتیجه‌ی حاضر و مقدار گزارش شده در مرجع وجود دارد. به عنوان شاخصی دیگر، مقادیر زمان کلی تخلیه‌ی سیلو حاصل از تحقیق حاضر و همچنین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مرجع [۲۰] در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، زمان تخلیه توسط مرجع مذکور با روش شبیه‌سازی ۲۸,۳۶ s به دست آمده که در مقایسه با

مشاهده می‌شود که نظم و روال ثابتی در تخلیه سیلو به‌ازای دفعات مختلف شبیه‌سازی وجود ندارد. درحقیقت رفتار ذرات در شرایط واقعی متأثر از تماس آن‌ها با همدیگر بوده و به‌نوعی شرایط تصادفی بر آن حاکم است و باعث عدم وقوع شرایط یکسان در هر بار تخلیه سیلو می‌گردد. با این حال باید تأکید نمود که وقتی دهانه سیلو از حد بحرانی فراتر رود، انسداد رخ نداده و همان‌گونه که در شکل‌های ادامه‌ی این بخش آمده است، نمودارهای جرم - زمان تقریباً به‌صورت خطی با شیب نسبتاً ثابتی درمی‌آیند که بیانگر نرخ تخلیه است.



شکل ۸- نمودار جرم تخلیه - زمان در چند بار شبیه‌سازی سیلوی با شرایط فوق‌بحرانی.

۴-۵- مطالعه‌ی اثر دامنه‌ی ارتعاش

دامنه‌ی ارتعاش یک عامل تعیین‌کننده در میزان عملکرد ویراتور در رفع انسداد سیلو است. درواقع دامنه‌ی ارتعاش بیانگر میزان تغییر فرم دیواره بوده که باعث جابه‌جاشدن ذرات مجاور خود می‌شود. شکل ۹ نمودارهای جرم خروجی - زمان به‌ازای سیلوی فوق‌بحرانی (مسدود) با اندازه‌ی دهانه‌ی ۳۲ mm را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش دامنه‌ی ارتعاش در فرکانس پایین، مانند ۵۰۰ Hz باعث افزایش محسوس شیب نمودار

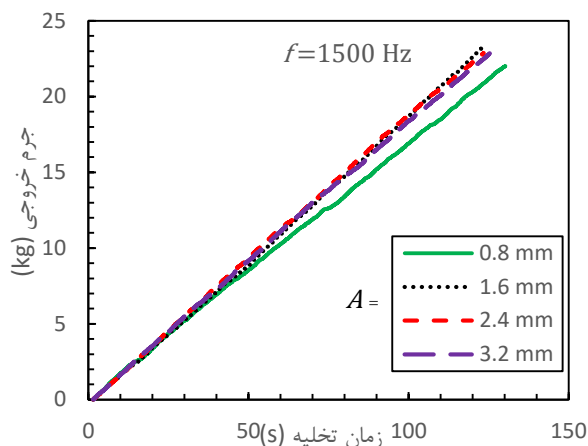
زمان حاصل از آزمایشات تجربی آن، ۳/۰۶٪ خطا را نشان می‌دهد، درحالی‌که بر اساس نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر، این زمان ۳۰,۰۲ s به‌دست آمده که بیانگر اختلاف کم (حدوداً ۲,۵٪) نسبت به مقدار تجربی است.

جدول ۴- مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی حاضر نسبت به نتایج شبیه‌سازی و تجربی.

نرخ تخلیه (kg/s)	زمان تخلیه (s)	درصد تفاوت نسبت به نتایج تجربی مرجع [۲۰]	
-	۲۹,۲۷	-	نتایج تجربی مرجع [۲۰]
۱,۷	۲۸,۳۶	۳,۰۶	نتایج شبیه‌سازی مرجع [۲۰]
۱,۶۴	۳۰,۰۲	۲,۵	نتایج تحقیق حاضر

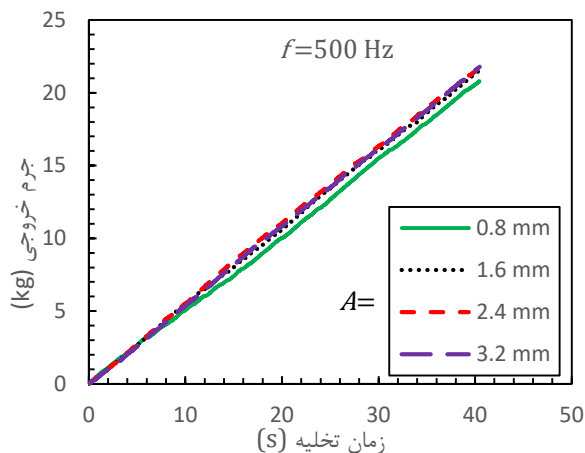
۴-۴- تأثیر اندازه‌ی دهانه و شناخت اندازه‌ی بحرانی

همان‌گونه که پیشتر نیز اشاره شد، بدیهی است که اندازه‌ی دهانه‌ی خروجی سیلو عامل تعیین‌کننده‌ی در تخلیه‌ی آن است. در اینجا به‌ازای اندازه‌های مختلف دهانه‌ی خروجی، شبیه‌سازی‌ها انجام گردید و همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، وقتی قطر دهانه‌ی خروجی سیلو کمتر از مقدار بحرانی است، جریان تخلیه منقطع است. درواقع در زمان‌هایی که به واسطه‌ی سقف قوسی و انسداد خروجی تخلیه متوقف شده، نمودار جرم - زمان به‌صورت خط افقی درآمده است. بر اساس این نمودارها، درنهایت نیز تخلیه‌ی کامل در زمان معمول حاصل نشده و شبیه‌سازی متوقف گردیده است. همچنین

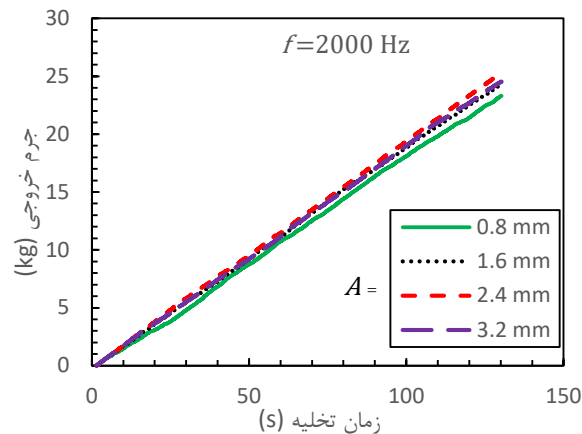
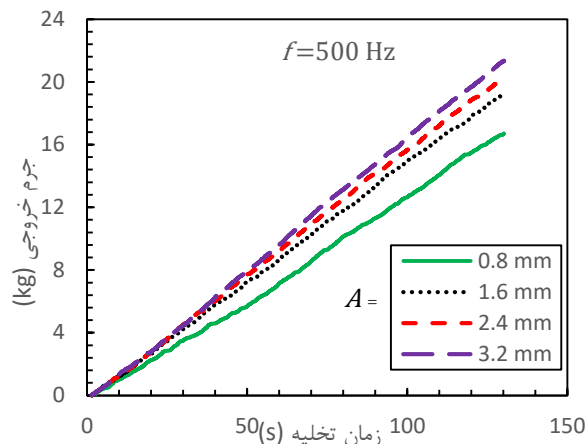
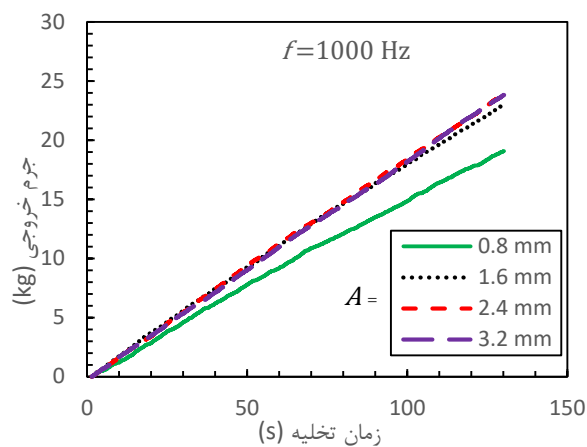


شکل ۹- نمودارهای تغییرات جرم خروجی بر حسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف دامنه و فرکانس برای سیلوی فوق‌بحرانی با دهانه‌ی ۳۲ mm (حالت فوق‌بحرانی).

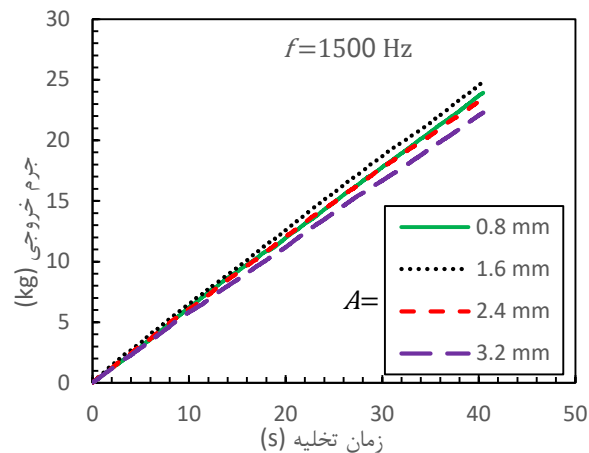
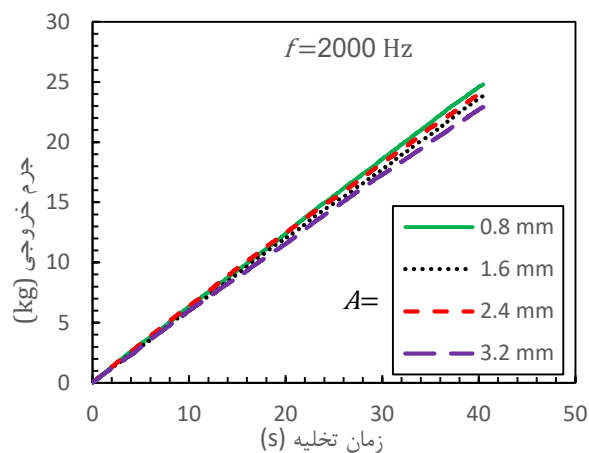
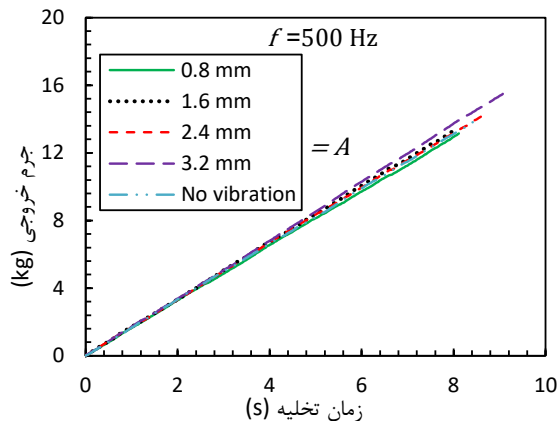
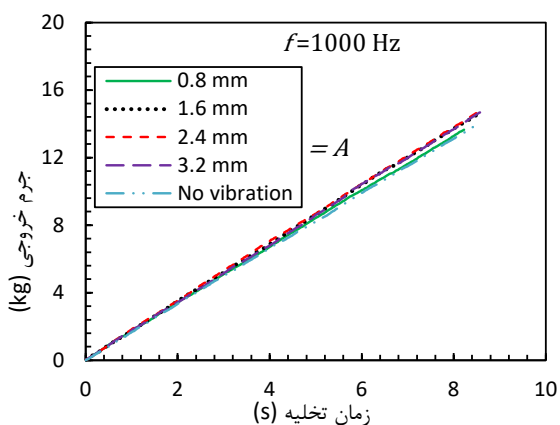
حال سؤال این است که اثر دامنه‌ی ارتعاش بر سیلویی با درجه‌ی بحرانی کمتر چگونه است؟ برای پاسخ به این سؤال، این مطالعه بر روی سیلوی آستانه‌ی بحرانی با اندازه‌ی دهانه‌ی خروجی ۴۲ mm انجام شد و نمودارهای مربوطه در شکل ۱۰ آمده است. مشاهده می‌شود که در فرکانس ۵۰۰ Hz با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، نرخ تخلیه اندکی افزایش می‌یابد، ولی با افزایش فرکانس به ۱۰۰۰ Hz، تأثیر آن کاهش یافته و نمودارها تقریباً بر هم منطبق شده‌اند، ولی با افزایش بیشتر فرکانس و رسیدن به ۲۰۰۰ Hz، تأثیر دامنه‌ی ارتعاش معکوس شده، به نحوی که با افزایش آن نرخ تخلیه کاهش یافته است.



شده که مبین تقویت نرخ تخلیه است. دقت در نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس، اختلاف بین شیب آن‌ها کمتر شده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در شرایط دهانه‌ی فوق‌بحرانی، افزایش دامنه‌ی ارتعاش در فرکانس‌های پایین اثر بیشتری بر افزایش نرخ تخلیه دارد و به بیانی دیگر، با افزایش فرکانس از شدت اثر دامنه‌ی ارتعاش کاسته می‌شود.

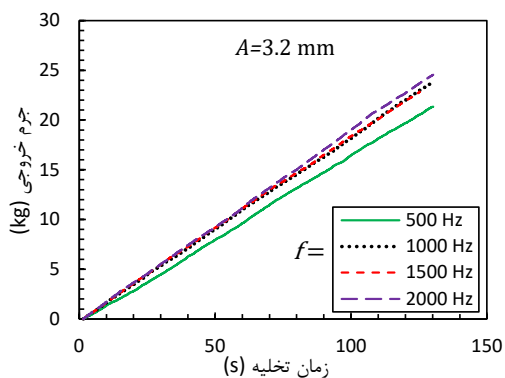
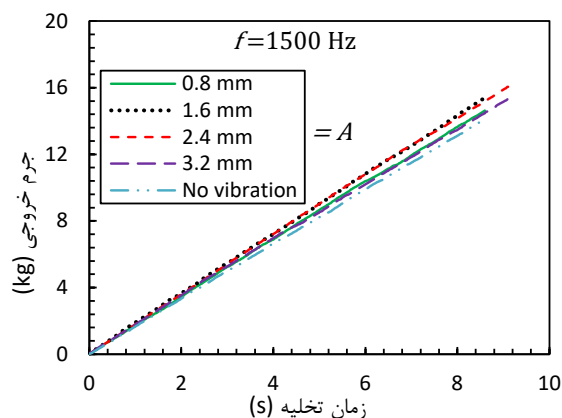
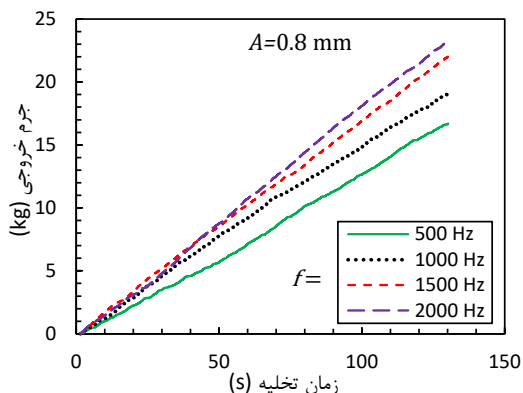
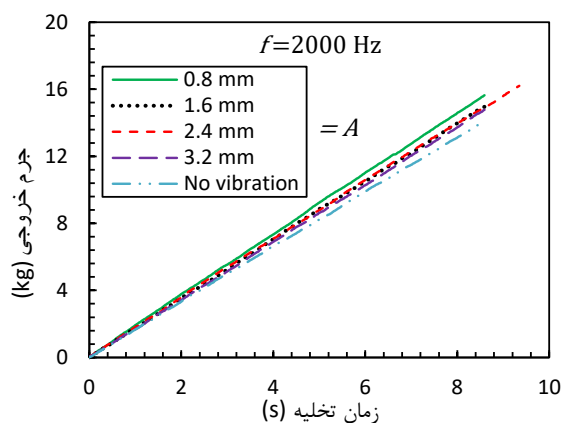
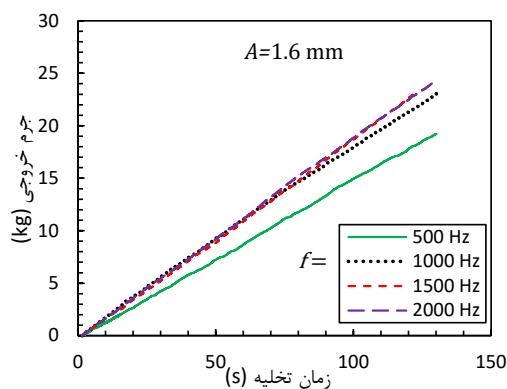


بر اساس نتایج این بخش، می‌توان گفت که افزایش دامنه‌ی ارتعاش در سیلوی فوق‌بحرانی منجر به تقویت اثر ویبراتور در تقویت نرخ تخلیه شده، ولی با افزایش فرکانس، نتایج مربوط به اعمال مقادیر مختلف دامنه‌ی ارتعاش به هم نزدیک شده است. از طرفی، با افزایش اندازه‌ی دهانه‌ی سیلو و رسیدن به حالت غیربحرانی، اساساً تفاوت قابل توجهی بین اثر اعمال مقادیر مختلف دامنه‌ی ارتعاش مشاهده نمی‌شود و حتی با افزایش دامنه، بعد از حد مشخصی تأثیر منفی بر نرخ تخلیه حادث شده است. از لحاظ تفسیر فیزیکی می‌توان گفت که با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، جابه‌جایی بیشتری به ذرات مجاور دیواره وارد شده و شانس شکست سقف قوسی و همچنین رفع چسبندگی افزایش می‌یابد، ولی افزایش بیش از حد دامنه‌ی ارتعاش می‌تواند ذرات را به سمت بالا حرکت داده و به‌نظر می‌رسد اثر مثبت آن در شکست ارتباط ذرات تضعیف شده و برآیند دو اثر مثبت و منفی منجر به ناچیز شدن اثر ارتعاشات شده است.

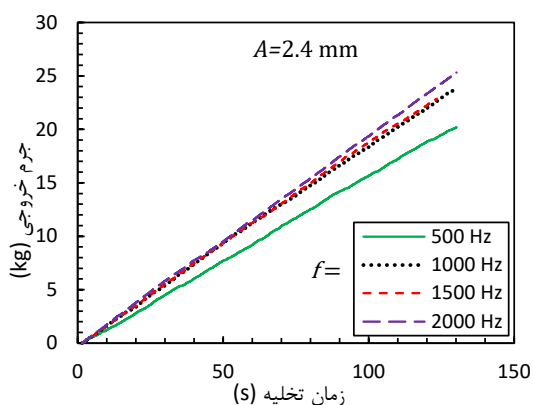


شکل ۱۰- نمودارهای تغییرات جرم خروجی برحسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف دامنه و فرکانس ارتعاش برای سیلو با شرایط آستانه‌ی بحرانی با دهانه‌ی ۴۲ mm (حالت آستانه‌ی بحرانی).

برای تکمیل این بخش از مطالعه، سیلوی غیربحرانی با اندازه‌ی دهانه‌ی ۵۷ mm نیز مورد بررسی عددی قرار گرفت و نمودارهای مربوطه در شکل ۱۱ ارائه شده است. بر این اساس، تأثیر دامنه‌ی ارتعاش در فرکانس‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز خیلی ناچیز بوده، ولی با افزایش فرکانس، تأثیر دامنه نمایان شده، هرچند نوع اثر آن منفی بوده است، به نحوی که با افزایش دامنه‌ی ارتعاش نرخ تخلیه اندکی کاهش یافته است. با وجود این باید تأکید نمود که در بیشتر موارد اختلاف بین گراف‌ها بسیار کم است؛ بدین معنی که در سیلوی غیربحرانی، دامنه‌ی ارتعاش تأثیر قابل توجهی بر نرخ تخلیه نداشته است.



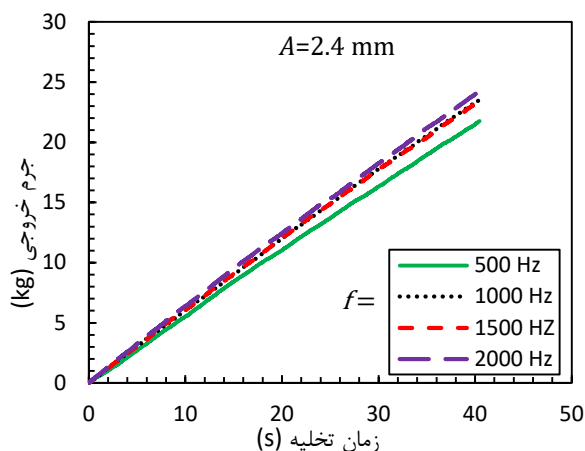
شکل ۱۱- نمودارهای تغییرات جرم خروجی برحسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف دامنه و فرکانس ارتعاش برای سیلو با دهانه‌ی ۵۷ mm (حالت غیربحرانی).



۴-۶- مطالعه‌ی اثر فرکانس ارتعاش

برای مطالعه‌ی مستقیم و واضح اثر فرکانس، نمودارهای مربوطه در شکل ۱۲ برای سیلوی فوق‌بحرانی با اندازه‌ی دهانه‌ی ۳۲ mm ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس، نرخ تخلیه (شیب نمودار) افزایش یافته و با مقایسه‌ی چهار دسته‌ی نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، دسته‌ی نمودارها به هم نزدیک‌تر شده‌اند؛ بنابراین هرچند با افزایش فرکانس تأثیر مثبت ویبراتور تقویت شده، ولی در همین حین باید به اثر دامنه نیز توجه نمود. در واقع مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، فاصله‌ی گراف‌های متعلق به انواع فرکانس کم شده؛ بدین معنی که اثر تغییر فرکانس تضعیف شده است.

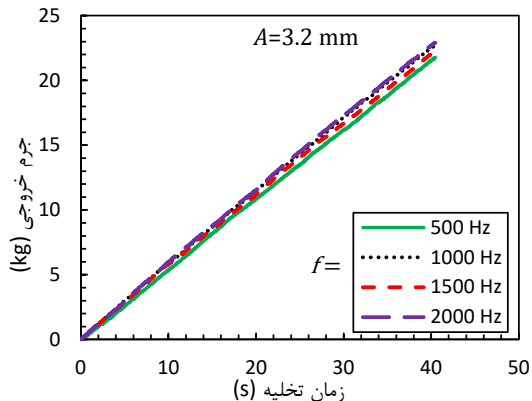
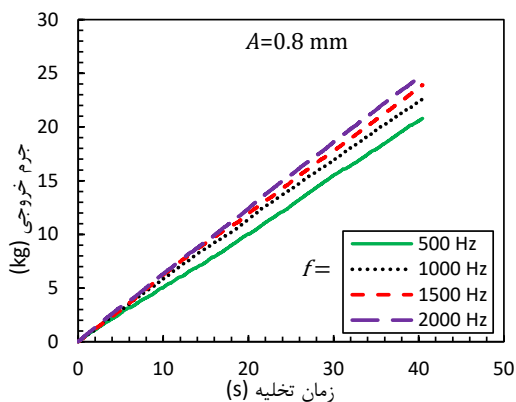
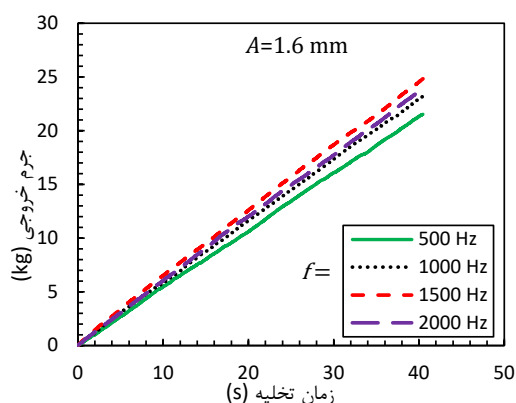
شکل ۱۲- نمودارهای تغییرات جرم خروجی برحسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف فرکانس و دامنه‌های ارتعاش برای سیلو با دهانه‌ی ۳۲ mm (حالت فوق‌بحرانی).

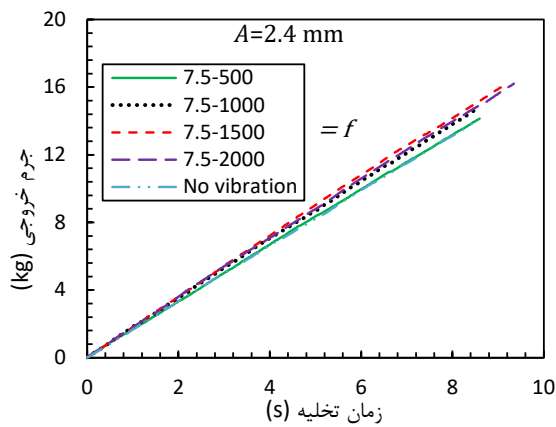


شکل ۱۳- نمودارهای تغییرات جرم خروجی برحسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف فرکانس و دامنه‌های ارتعاش برای سیلو با دهانه‌ی ۴۲ mm (حالت آستانه‌ی بحرانی).

برای تکمیل این بخش از مطالعه، نمودارهای لازم برای سیلوی غیربحرانی با دهانه‌ی ۵۷ mm در شکل ۱۴ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در دامنه‌ی ۰٫۸ mm افزایش فرکانس باعث افزایش اندک نرخ تخلیه شده است، اما با مراجعه به دسته‌ی نمودارهای مربوط به دامنه‌های بالاتر، مشخص می‌شود که تغییر فرکانس ارتعاش تقریباً بی‌تأثیر بوده است. ویژگی یکسانی که در تمام این نمودارها مشاهده می‌شود این است که با وجود ویراتور، نرخ خروجی اندکی افزایش یافته است. از نظر تفسیر فیزیکی تأثیر فرکانس، به‌طور خلاصه می‌توان گفت که عموماً افزایش فرکانس در بازه‌ی مطالعه‌شده باعث تقویت نرخ تخلیه‌ی سیلوی فوق‌بحرانی شده و هرچه دامنه‌ی ارتعاش پایین‌تر بوده، این اثر مشهودتر است. با این حال، در سیلوی غیربحرانی تفاوت قابل توجهی بین اثر فرکانس‌های مختلف به چشم نمی‌خورد. در تفسیر فیزیکی این نتایج می‌توان به این واقعیت اشاره کرد که با افزایش فرکانس، انرژی موج تقویت گردیده و بر این اساس انرژی منتقل‌شده به ذرات مجاور دیواره‌ی سیلو نیز افزایش یافته است. این انرژی می‌تواند باعث

حال به‌ازای سیلوی با دهانه‌ی بزرگتر یعنی با دهانه‌ی آستانه‌ی بحرانی ۴۲ mm نتایج را بررسی می‌کنیم. در شکل ۱۳، نمودارهای مربوط به جرم خروجی برحسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف فرکانس در دامنه‌های ثابت ارائه شده است. در اینجا نیز می‌توان گفت که افزایش فرکانس در دامنه‌های ثابت باعث افزایش نرخ تخلیه گردیده است. با وجود این باید تأکید نمود که در این حالت نیز با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، اختلاف بین نمودارهای متعلق به مقادیر مختلف فرکانس کم شده است.



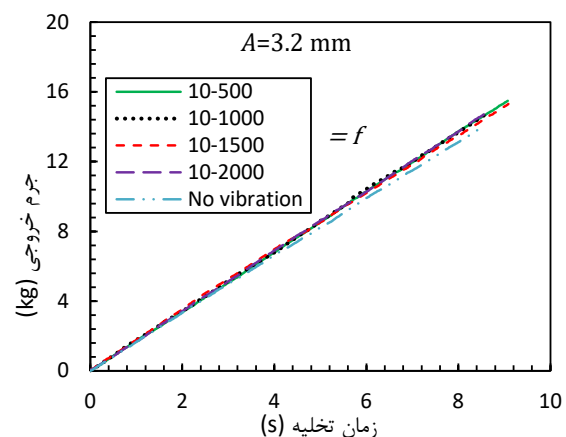
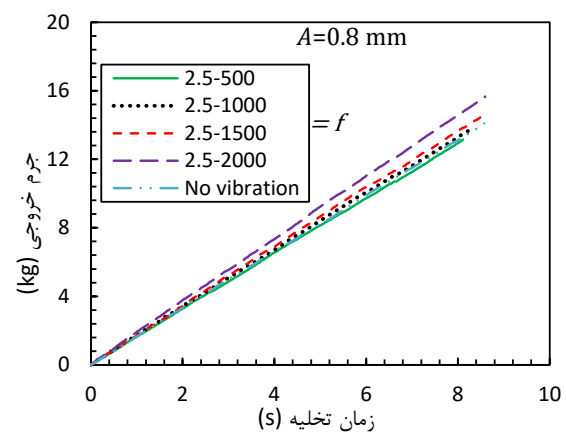
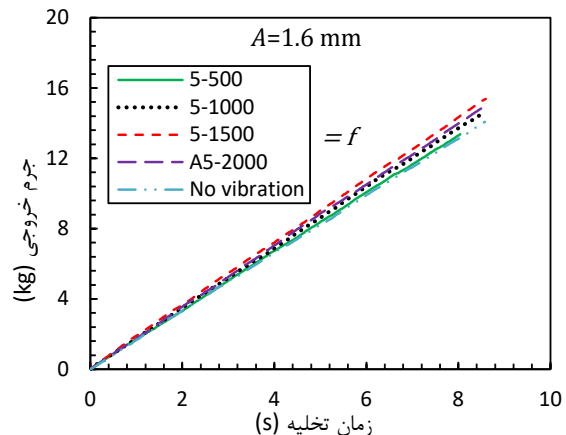


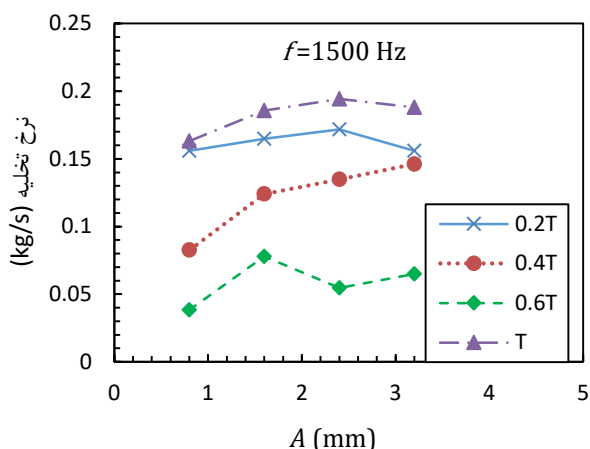
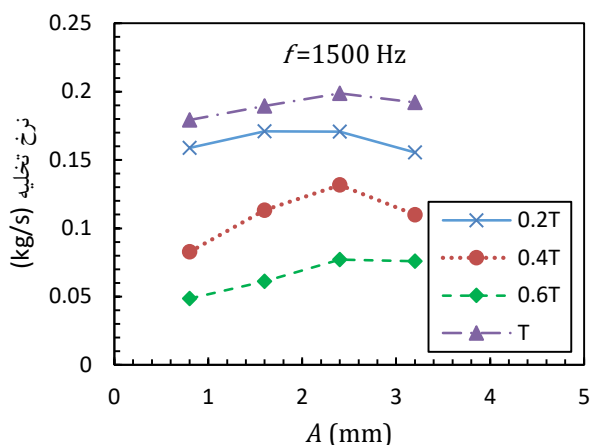
شکل ۱۴- نمودارهای تغییرات جرم خروجی بر حسب زمان تخلیه به ازای مقادیر مختلف فرکانس و دامنه‌های ارتعاش برای سیلو با دهانه‌ی mm ۵۷ (حالت غیربحرانی).

۴-۷- تأثیر محل ویبراتور

بدون تردید محل نصب ویبراتور نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان اثرگذاری آن در رفع انسداد و رژیم تخلیه‌ی سیلو دارد. همان‌گونه که پیشتر در بخش مواد و روش کار توضیح داده شد، دیواره‌ی قیف تخلیه‌ی سیلو به چند ناحیه‌ی مجزا تقسیم شده و هر بار به یکی از این نواحی جابه‌جایی نوسانی اعمال شده است. البته در یک حالت نیز به کل دیواره‌ی جانبی ارتعاش اعمال شده است. در اینجا نتایج مطالعه‌ی اثر محل ویبراتور روی سیلو تحت بدترین شرایط یعنی حالت فوق‌بحرانی با اندازه‌ی دهانه‌ی ۳۲mm ارائه و در مورد آن بحث می‌شود. در نمودارهای شکل ۱۵، اثر محل ارتعاش به‌ازای چند فرکانس و دامنه‌ی مختلف بر روی نرخ تخلیه‌ی سیلوی فوق‌بحرانی نشان داده شده است. هر دسته‌ی نمودار بر حسب دامنه‌ی ارتعاش و به‌ازای مقادیر مختلف فرکانس تهیه شده است. در واقع، هر گراف از هر دسته‌ی نمودار به نتایج مربوط به نصب ویبراتور در یک محل مشخص تعلق دارد که در شکل ۵ و جدول ۳ معرفی شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در بیشتر موارد، ارتعاش کل دیواره‌ی سیلو منجر به بیشترین تأثیر مثبت

غلبه بر چسبندگی ذرات شده و انسداد را برطرف نماید و جریان تقویت شود. با این حال باید اذعان نمود در شرایطی که سیلو غیربحرانی است، سهم انرژی ارتعاش نسبت به انرژی جنبشی جریان کلی ذرات قابل توجه نیست، پس تأثیر چندانی بر نرخ تخلیه نمی‌گذارد.



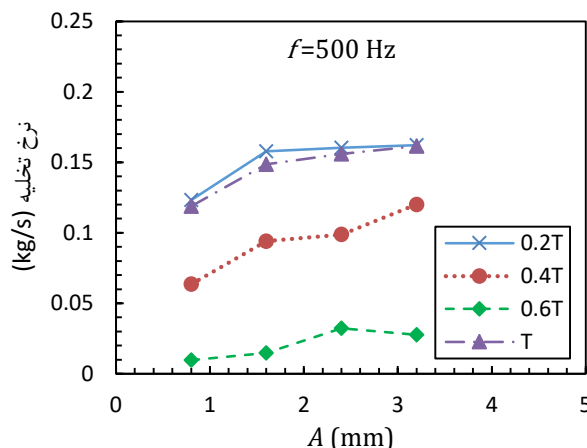
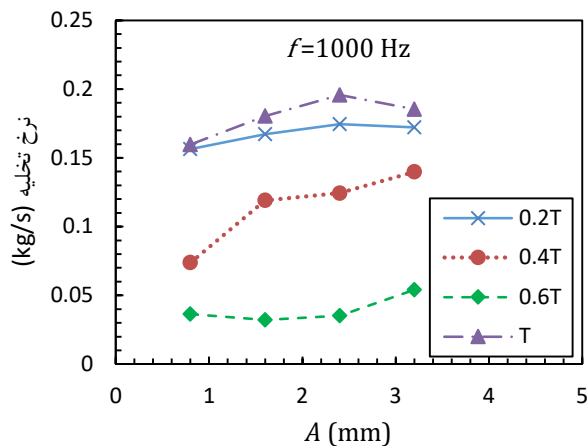


شکل ۱۵- نمودارهای تغییرات نرخ تخلیه برحسب دامنه در فرکانس‌های مختلف برای ویبراتور در ارتفاع‌های $0.2T$ ، $0.4T$ و $0.6T$ و همچنین یک وجه کامل قیف برای سیلو با دهانه‌ی 32 mm (حالت فوق‌بحرانی).

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، اثر اعمال ارتعاش دیواره‌ی قیف خروجی سیلو بر روی تخلیه‌ی آن با روش عددی المان گسسته مورد مطالعه قرار گرفت. جهت اطمینان از دقت شبیه‌سازی‌ها، آنالیز حساسیت به گام زمانی صورت پذیرفت. همچنین ارتفاع بار به اندازه‌ی کافی بزرگ انتخاب شد تا شرایط پایدار در جریان تخلیه‌ی سیلو برقرار باشد. برای اعتبارسنجی روش کار، مقایسه با نتایج عددی و تجربی گزارش شده در مراجع مرتبط انجام شد. سیلویی که تحت وزن مواد درونی و بدون تحریک ارتعاشی تخلیه شود غیربحرانی نامیده شد

شده است، ولی اجرای این نوع ارتعاش در دنیای واقعی چندان عملیاتی نیست. با مقایسه‌ی دیگر حالات مشاهده می‌شود که هرچه مکان ویبراتور به دهانه‌ی خروجی نزدیک‌تر بوده، تأثیر مثبت بیشتری بر نرخ تخلیه داشته است. این نوع نصب در شرایط واقعی قابل‌پیاده‌سازی است، هرچند باید محدودیت‌های فیزیکی احتمالی مدنظر قرار گیرد. در مورد چرایی فیزیکی چنین رفتاری می‌توان گفت که وقتی در نزدیکی خروجی ارتعاش وارد می‌شود، انرژی آن به‌صورت مؤثر در محل قفل‌شدگی ذرات وارد شده و آن ناحیه آزاد می‌شود و به دنبال آن، توده‌ی بزرگ‌تر ذرات از بالا امکان حرکت و تشدید جریان را خواهد داشت. از طرف مقابل، وقتی ارتعاش در نواحی بالاتر وارد می‌شود، چون دهانه مسدود است، با قدرت کمتری می‌تواند به جریان خروجی کمک نماید.



۶-مراجع

- [1]. Janssen, H.A., Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1895. 39: p. 1045-1049.
- [2]. Beverloo, W.A., H.A. Leniger, and J. van de Velde, The flow of granular solids through orifices. Chemical Engineering Science, 1961. 15(3-4): p. 260-269.
- [3]. Walker, D.M., An approximate theory for pressures and arching in hoppers. Chemical Engineering Science, 1966. 21(11): p. 975-997.
- [4]. Walters, J.K., A theoretical analysis of stresses in silos with vertical walls. Chemical Engineering Science, 1973. 28(1): p. 13-21.
- [5]. Arnold, P.C. and A.S. Kaaden, Reducing hopper wall friction by mechanical vibration. Powder Technology, 1977. 16(1): p. 63-66.
- [6]. Jarrett, N.D., A study of the influence of wall flexibility on pressure in rectangular silos, in School of Engineering and Design. 1991, Brunel University.
- [7]. To, K., P.-Y. Lai, and H.K. Pak, Jamming of Granular Flow in a Two-Dimensional Hopper. Physical Review Letters, 2001. 86(1): p. 71-74.
- [8]. Zuriguel, I., et al., Jamming during the discharge of grains from a silo described as a percolating transition. Physical Review E, 2003. 68(3): p. 030301.
- [9]. Uñac, R.O., et al., Experimental study of discharge rate fluctuations in a silo with different hopper geometries. Powder Technology, 2012. 225: p. 214-220.
- [10]. Mellmann, J., T. Hoffmann, and C. Füll, Mass flow during unloading of agricultural bulk materials from silos depending on particle form, flow properties and geometry of the discharge opening. Powder Technology, 2014. 253: p. 46-52.
- و با کاهش اندازه‌ی دهانه به آستانه‌ی انسداد رسید که به نام بحرانی نام‌گذاری گردید. وقتی اندازه‌ی دهانه از این حد کوچکتر باشد، انسداد قطعی رخ داده و حالت فوق‌بحرانی نامیده شد. مطالعات عددی بر روی سه حالت فوق‌بحرانی، بحرانی و غیربحرانی انجام و مشخص شد که ارتعاشات تأثیر قابل توجهی در رفع انسداد و افزایش نرخ تخلیه‌ی سیلوهای بحرانی و فوق‌بحرانی دارد. هرچند میزان اثرگذاری آن در سیلوی غیربحرانی کمتر است. بر اساس نتایج عددی، افزایش دامنه‌ی ارتعاش تا رسیدن به یک مقدار بهینه منجر به افزایش دبی تخلیه شده، ولی پس از آن روال کاهشی می‌گیرد. همچنین مشخص شد که با افزایش فرکانس ارتعاش، نرخ تخلیه‌ی سیلوی فوق‌بحرانی تقویت می‌شود، هرچند اثر افزایشی آن یک‌نواخت نیست، بلکه به تدریج تضعیف می‌شود. به علاوه مشخص شد که محل ویبراتور هرچه به دهانه‌ی خروجی نزدیکتر باشد، میزان اثر مثبت آن بر نرخ تخلیه افزایش می‌یابد. طی متن در مورد چرایی فیزیکی اثر متغیرهای ارتعاشی بر جریان تخلیه‌ی سیلو بحث شد و به خصوص به تأثیر انرژی ناشی از ارتعاشات در شکستن پیوند و چسبندگی بین ذرات اشاره گردید. با این اوصاف، پیشنهاد می‌شود که در غیاب ویبراتور، رفتار جریان خروجی سیلو مشاهده شده و انسداد احتمالی آن بررسی گردد. بدین ترتیب اگر سیلو اساساً دچار انسداد نیست، نمی‌توان با نصب ویبراتور انتظار تقویت قابل توجه نرخ تخلیه‌ی آن را داشت. در مقابل، در صورت وجود انسداد حتی به صورت موقتی، نصب ویبراتور در نزدیک‌ترین محل ممکن به خروجی سیلو توصیه می‌گردد. به علاوه مشخص شد که یک تنظیم قطعی برای فرکانس و دامنه‌ی (نیروی تحریک) ارتعاش وجود ندارد، بلکه باید مقدار بهینه‌ی آن تعیین و در آن شرایط کاری تنظیم گردد. در واقع، اگر ویبراتور در شرایط بهینه تنظیم نباشد، اثر مثبت قابل انتظار در رفع گرفتگی و تقویت جریان خروجی را نخواهد داشت.

- [21]. Kobyłka, R. and M. Molenda, DEM simulations of loads on obstruction attached to the wall of a model grain silo and of flow disturbance around the obstruction. *Powder Technology*, 2014. 256(0): p. 210-216.
- [22]. Jafari, A. and V. Saljooghi Nezhad, Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear. *Powder Technology*, 2016. 297: p. 126-143.
- [23]. Johnson, K.L. and K.L. Johnson, *Contact mechanics*. 1987: Cambridge university press.
- [24]. Brilliantov, N.V., et al., Model for collisions in granular gases. *Physical Review E*, 1996. 53(5): p. 5382-5392.
- [25]. Yan-hua, C. and T. Xin, Application of the DEM to screening process: a 3D simulation. *Mining Science and Technology*, 2009. 19: p. 0493-0497.
- [26]. Guifeng, W. and T. Xin, Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 2011. 21: p. 451-455.
- [27]. Gear, C.W., *Numerical initial value problems in ordinary differential equations* 1971: Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- [28]. Christoph Kloss, et al., Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM. *Progress in Computational Fluid Dynamics, An Int. J.*, 2012. 12(2/3): p. 140-152.
- [29]. Nedderman, R.M., et al., The flow of granular materials—I: Discharge rates from hoppers. *Chemical Engineering Science*, 1982. 37(11): p. 1597-1609.
- [11]. Wilson, T.J., et al., Reply to the commentary on granular discharge rate for submerged hoppers. 2014. Vol. 6. 2014.
- [12]. Huang, W., et al., Discharge characteristics of cohesive fine coal from aerated hopper. *Powder Technology*, 2009. 194(1-2): p. 126-131.
- [13]. Lu, H., et al., Study on the fluidization and discharge characteristics of cohesive coals from an aerated hopper. *Powder Technology*, 2011. 207(1-3): p. 199-207.
- [14]. Jafari, A. and R. Abbasi Hattani, Investigation of parameters influencing erosive wear using DEM. *Friction*, 2019.
- [15]. Jafari, A., M. Javaheri, and G. Baradaran, Computer simulation to optimize roller screen settings providing higher efficiency in green pellets classification. *Computers & Chemical Engineering*, 2022. 161: p. 107767.
- [16]. Goda, T.J. and F. Ebert, Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos. *Powder Technology*, 2005. 158(1-3): p. 58-68.
- [17]. Langston, P., et al., Vibration induced flow in hoppers: continuum and DEM model approaches. *Granular Matter*, 2009. 11(2): p. 99-113.
- [18]. Fraige, F.Y., et al., Vibration induced flow in hoppers: DEM 2D polygon model. *Particuology*, 2008. 6(6): p. 455-466.
- [19]. Matchett, A.J., A Theoretical Model of Vibrationally Induced Flow in Conical Hopper Systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 2004. 82(1): p. 85-98.
- [20]. González-Montellano, C., et al., Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. *Chemical Engineering Science*, 2011. 66(21): p. 5116-5126.