

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه جداساز گرانشی سنگ از کود دامی

رضا رحیمی^۱، محمدحسین کیانمهر^{۲*}، سیدرضا حسن ییگی^۳ و پیام زرافشان^۴

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد پردیس ابوریحان دانشگاه تهران و پژوهشگر واحد تحقیقات سازمان اتکا، تهران، ایران

۲، ۳ و ۴- به‌ترتیب استادان؛ و استادیار گروه فنی و کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۴

چکیده

یکی از روش‌های استفاده از فضولات دامی، فشرده‌سازی و پلت کردن آن است که باعث سهولت در حمل و نقل، کاهش بو و آزادسازی تدریجی نیتروژن می‌شود. برای پلت کردن کود دامی از دستگاه‌های اکسترودر و پلت‌کننده دیسکی استفاده می‌شود. از آنجا که تکه‌های سنگ و مواد اضافی موجود در کود انبار شده، باعث آسیب رساندن به دستگاه‌های پلت‌سازی می‌شود، جداسازی سنگ از کود قبل از فرآوری از جمله ضروریات فرآوری کود خواهد بود. در این تحقیق، یک دستگاه جداساز گرانشی با هدف جداسازی سنگ از کود طراحی و ساخته شد. با تغییر سه پارامتر شیب صفحات جداساز مواد، رطوبت کود و اندازه ابعاد سنگ و کود، عملکرد دستگاه ساخته شده ارزیابی شد. بدین منظور سطوح آزمایش برای شیب صفحات جداساز ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه، برای رطوبت کود ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد رطوبت و برای اندازه تکه‌های سنگ و کود ۱۰ و کمتر از ۱۰، بین ۱۰ تا ۲۰ و بین ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. با مقایسه میانگین‌ها، بیشترین بازده جداسازی سنگ از کود با دستگاه (به میزان ۷۶/۸۱ درصد)، در سطح شیب ۱۰ درجه، رطوبت ۵۰ درصد و تکه سنگ‌های ۱۰ و کمتر از ۱۰ میلی‌متر، به دست آمد.

واژه‌های کلیدی

آبشاری، ارتعاش، پلت، صفحات شیب‌دار، مواد زیست توده

مقدمه

میزان کود دامی، فرآوری آن ضروری خواهد بود. یکی از روش‌ها برای فرآوری کود دامی و سهولت در حمل و نقل، کاهش حجم از طریق متراکم کردن آن است. پلت کردن کود دامی یکی از روش‌های فشرده سازی و کاهش حجم کود است. از طرفی، کود شیمیایی بر پایه نیتروژن می‌تواند هنگام پلت‌سازی به کود دامی اضافه شود. این کار می‌تواند به خاصیت آزادسازی تدریجی نیتروژن مورد نیاز گیاه و افزایش عملکرد آن کمک کند (Alemi et al., 2015). مراحل آماده‌سازی کود دامی برای پلت‌سازی شامل

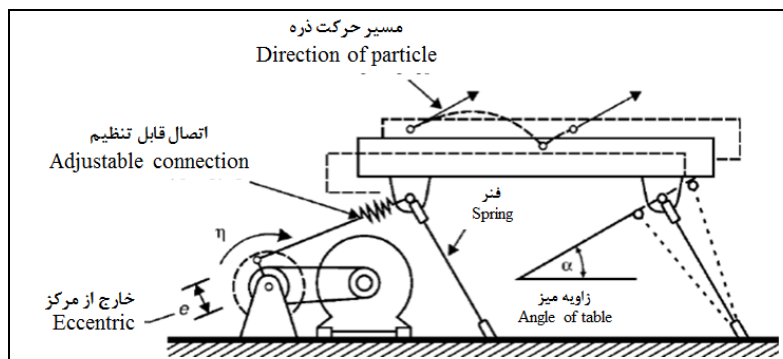
سالانه بیش از ۲۰ میلیون تن کود دامی در کشور تولید می‌شود (Anon, 2012). این مقدار کود در محل دامداری‌ها، در فضای باز روی هم انباشته می‌شوند. رطوبت و حجم زیاد به‌همراه یکسان نبودن مواد موجود در کود، از عوامل محدودکننده استفاده از کودهای دامی است (Rezaifar Hassan-Beygi et al., 2008). از دیگر محدودیت‌های استفاده از این مواد، اختلاط آنها با اجسام خارجی مانند سنگ و مواد جامد است؛ بنابراین، برای استفاده بهینه از این

نیروی گرانش، به‌طرف پایین صفحات شیب‌دار و مواد سبک‌تر به‌سمت بالای شیب حرکت می‌کنند و این دو از هم جدا می‌شوند. با توجه به این‌که صفحات جداساز مواد در یک جداساز گرانشی حرکت ارتعاشی دارند و شبیه به نقاله‌های انتقال مواد عمل می‌کنند و جداسازی نیز به نحوه ارتعاش و حرکت مواد بستگی دارد، لازم است حرکت مواد روی صفحات مورد تحلیل قرار گیرد.

شکل ۱ نحوه عملکرد یک نقاله ارتعاشی انتقال مواد را نشان می‌دهد. سیستم ایجاد ارتعاش، به میز حرکتی ارتعاشی با فرکانس و دامنه‌ای مشخص می‌دهد و مواد روی میز به‌حرکت در می‌آیند. برای حرکت مواد مرطوب و نرم روی میز، نیروی چسبندگی بین ذرات باید بیشتر از نیروی چسبندگی بین مواد و سطح میز باشد. برای این‌که مواد روی میز به‌صورت پرتابی حرکت کنند، باید شتابی بیشتر از شتاب جاذبه، از طریق سیستم ارتعاشی به آنها اعمال گردد (Colijn, 1984).

خشک کردن، خرد کردن، غربال کردن و جداسازی اجسام خارجی مانند سنگ و شیشه است. سنگ‌های موجود در کود می‌تواند به اجزای ماشین‌آلات فرآوری کود آسیب برساند. بنابراین کاهش و حذف مواد اضافی موجود در کود ضروری خواهد بود. یکی از روش‌های متداول برای جداسازی مواد سبک و سنگین از یکدیگر، جداسازی گرانشی است. اصول کار جداساز گرانشی^۱ تفاوت بین جرم حجمی ذرات است.

توماس (Tomas, 1990) گزارش کرد که چنانچه اختلاف جرم حجمی دو ماده بیشتر از ۵ درصد باشد می‌توان آن دو را با استفاده از دستگاه جداساز گرانشی جدا کرد. دستگاه جداساز گرانشی شامل یک بدنه لرزان است که با تعدادی فنر روی یک شاسی اصلی سوار می‌شود. مواد برای جداسازی روی یک سری سینی ریخته می‌شود که به شاسی لرزان متصل هستند و جداسازی از قسمت جلو و عقب صفحات صورت می‌گیرد. بدین‌صورت که مواد سنگین به‌دلیل جرم حجمی بیشتر و تحت تأثیر



شکل ۱- حرکت یک ذره روی سطح نقاله ارتعاشی (Ray, 2005)

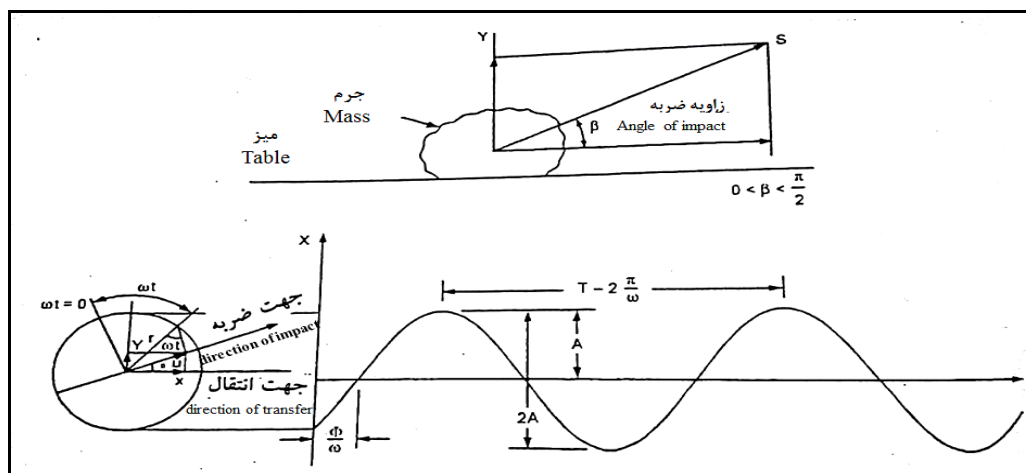
Fig. 1- Movement of one particle on the surface of vibration conveyor (Ray, 2005)

نمی‌شود، و ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی برابر باهم فرض می‌شوند (Ray, 2005). حرکت یک ذره روی میز ارتعاشی، نوسانی در نظر گرفته می‌شود، بنابراین خصوصیات حرکت ذره با رابطه ۱ تعریف می‌شود و مطابق با شکل ۲ خواهد بود.

برای تحلیل حرکت مواد روی صفحه ارتعاشی، رفتار توده مواد به‌عنوان یک جسم صلب در نظر گرفته می‌شود، از حرکت دورانی و غلتشی مواد چشم‌پوشی می‌شود، از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود، تأثیر سطح صفحات و مواد بر هم در نظر گرفته

که در آن،
 $x =$ جابه‌جایی مواد طی ضربه (متر)؛ $v =$ سرعت طی
 ضربه (متر بر ثانیه)؛ و $j =$ شتاب در طول میز (متر بر
 مجذور ثانیه).

$$\begin{aligned} x &= A \sin \omega t \\ v &= \omega A \cos \omega t \\ j &= -\omega^2 A \sin \omega t \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۲- حرکت هارمونیک ساده یک ذره (Ray, 2005)

Fig. 2- Simple harmonical motion of a particle (Ray, 2005)

نمی‌شود. پس در این حالت در جداساز گرانشی امکان جداسازی مواد وجود نخواهد داشت. حال اگر $g \cos \alpha < A\omega^2 \sin \omega t \times \sin \beta$ باشد، برآیند نیروهای وارد بر ذره به طرف بالای سطح است و ذره تمایل به جدا شدن از سطح میز دارد؛ بنابراین ذرات با جرم حجمی کمتر از سطح میز جدا می‌شوند و ذرات با جرم حجمی بیشتر روی سطح باقی می‌مانند. پس در این حالت امکان جداسازی مواد وجود دارد. با توجه به شکل ۲ مقدار زاویه ωt از صفر تا $\pi/2$ تغییر می‌کند و $\sin \omega t$ بیشترین مقدار را در $\omega t = \pi/2$ خواهد داشت. بنابراین بزرگ‌ترین مؤلفه عمودی شتاب برابر خواهد بود با $A\omega^2 \times \sin \beta$

فلر و همکاران (Feller et al., 1981) برای جدا کردن سنگ و کلوخ از بادام زمینی از یک جداکننده گرانشی استفاده کردند. سطح سوراخ‌دار این جداکننده اجازه می‌داد جریان هوا از زیر آن به

از آن‌جا که ذره با شتابی تحت زاویه β نسبت به سطح افق به طرف جلو پرتاب می‌شود، شتاب آن در طول بستر میز ارتعاشی (محور x)، مؤلفه عمودی شتاب در جهت محور y ، و نیروی عمودی ذره روی سطح میز، به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۲ تا ۴ به دست می‌آید.

$$j_x = \omega^2 A \sin \omega t \times \cos \beta \quad (2)$$

$$j_y = -\omega^2 A \sin \omega t \times \sin \beta \quad (3)$$

$$N = m (g \cos \alpha - A\omega^2 \sin \omega t \times \sin \beta) \quad (4)$$

با توجه به رابطه ۴، اگر $g \cos \alpha > A\omega^2 \sin \omega t \times \sin \beta$ باشد، برآیند نیروهای وارد بر ذره به طرف پایین در امتداد مؤلفه $g \cos \alpha$ است و در نتیجه در این حالت ذره از سطح جدا

شیب طولی از ۵ به ۳ درجه باعث افزایش جداسازی گندم سن زده می‌شود. حداکثر مقدار بازده جداسازی گندم در این تحقیق ۹۵ درصد گزارش شده است.

فالکنر روش‌های قدیمی و جدید جداسازی گرانشی را بررسی و مقایسه کرده و مزایا و معایب هر روش را با توجه به تجربه شخصی و عملی برای تولید و توسعه توضیح داده است (Falconer, 2003).

هوناگر و همکاران با استفاده از جداساز گرانشی به جداسازی زغال سنگ ریز پرداختند و به این نتیجه رسیدند که این روش جداسازی، نسبت به جداسازی با آب بازده بیشتری دارد (Honaker *et al.*, 2000).

بالاسیو و همکاران حرکت ذرات را روی یک جداساز گرانشی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که حرکت قبلی ذرات روی حرکت بعدی آنها تأثیر کمی دارد. اما حرکت ذره بسیار تحت تأثیر سطح بستر قرار می‌گیرد که این حرکت مدل احتمالی مارکوف را نشان می‌دهد (Balascio *et al.*, 1987).

پاتیل و سارود از جداکننده گرانشی برای دسته بندی بذره‌های گندم استفاده کردند که در نتیجه این تحقیق، بذره‌های گندم به سنگین، متوسط و قسمت‌های شکسته سبک با جرم صد دانه به ترتیب ۴/۰۵، ۳/۷۶، ۱/۴۶ گرم تقسیم بندی شدند (Patil & Sarode, 1988).

دسپوتویچ و همکاران (Despotovic *et al.*, 2015) اصول اولیه سینماتیکی و دینامیکی محرک‌های نقاله‌های ارتعاشی را توصیف و ویژگی‌های دینامیکی مواد انتقالی را بررسی کردند. این محققان گزارش می‌دهند که سرعت انتقال مواد، تابعی از زاویه بستر، دامنه ارتعاش و فرکانس زاویه‌ای تحریک است. ایشان محرک‌های الکترومغناطیسی را

بستر مواد دمیده شود. با این روش مواد سبک‌تر بر اثر نیروی هوا به طرف بالا پرتاب می‌شوند و به علت نیروی وزنشان به پایین می‌افتند. همچنین تکه‌های سنگین در تماس با سطح باقی می‌مانند و نیروی هوا قادر به بلند کردن آن‌ها نیست. در این دستگاه برای انتقال مواد از ارتعاش مکانیکی استفاده شده است (Feller *et al.*, 1981).

سیلوا و مارکوس فایلهو (Silva & Marcos-Filho, 1982) از یک جداکننده گرانشی برای جدا کردن بذره‌های ذرت استفاده و گزارش کردند این جداکننده گرانشی، بذره‌های در اندازه‌های مختلف را به خوبی جدا می‌کند.

شرکت کمپوست‌سازی آداس دستگاه جداساز گرانشی را برای جداسازی شیشه از کمپوست تهیه شده از زباله‌های شهری ساخت و برای ذرات ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر، در صفحات با زاویه‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه، بازده دستگاه را برای ذرات کمتر از ۱۰ میلی‌متر مقدار بازده را ۷۰ درصد اندازه‌گیری و گزارش کرد (Anon, 2006).

آیودجی و ییسی (Ayodeji & Yisa, 2014) با استفاده از موتور الکتریکی با توان یک اسب بخار، یک دستگاه جداساز گرانشی برای جدا کردن سنگ از برنج طراحی کردند و ساختند که با ایجاد ارتعاش از طریق وزنه‌های خارج از مرکز، سنگ و برنج از هم جدا می‌شدند.

راسخ و همکاران (Rasekh *et al.*, 2005) عملکرد دستگاه جداکننده گرانشی در میزان جداسازی گندم سن زده از گندم سالم را به صورت تجربی بررسی کردند. در این دستگاه، امکان تنظیم شیب طولی و عرضی بستر جداسازی مواد وجود داشت. این محققان به این نتیجه رسیدند که افزایش شیب عرضی جداساز از ۰/۵ به ۲ درجه و کاهش

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه جداساز گرانشی سنگ از کود دامی

یک نوع جداساز گرانشی برای جداسازی سنگ یا هر جسم جامد سنگین از کود دامی طراحی، ساخته و ارزیابی شد.

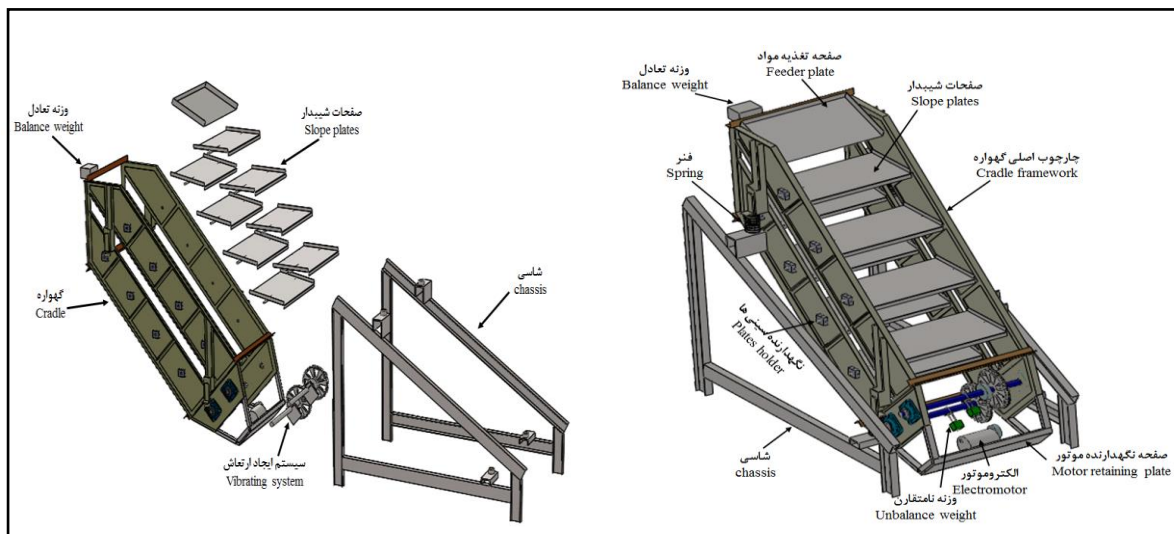
مواد و روش‌ها

دستگاه جداساز گرانشی طراحی شده شامل شاسی و گهواره نگهدارنده صفحات شیب‌دار است. صفحات شیب‌دار به صورت مورب روی گهواره سوار می‌شوند. گهواره با چهار فنر روی شاسی سوار می‌شود و از طریق وزنه‌های خارج از مرکز که روی محور دوار قرار گرفته‌اند به ارتعاش در می‌آیند. شکل ۳، مدل سه بعدی دستگاه طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورک را نشان می‌دهد.

بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که راه‌حل بهتر برای ایجاد حرکت خطی یا نوسانی در نقاله‌های ارتعاشی، استفاده از محرک‌های الکترومکانیکی است.

یسیا و همکاران (Yisa et al., 2017) یک جداساز سنگ از برنج را ارزیابی کردند و دریافتند که پس از اصلاح کانال جریان هوا برای بلند کردن دانه‌های برنج و رساندن جریان هوا به ۲/۶۹ متر مکعب در ثانیه، می‌توان ظرفیت دستگاه را از ۰/۸۶ به ۱/۸ کیلوگرم در ساعت و بازده آن را به مقدار قابل توجهی افزایش داد.

مرور منابع نشان می‌دهد که برای جداسازی سنگ از کود دامی تاکنون تحقیق نشده و دستگاهی نیز طراحی یا ساخته نشده است؛ در این تحقیق،



شکل ۳ - نمای سه بعدی و نمای انفجاری مدل طراحی شده دستگاه جداساز گرانشی در نرم افزار سالیدورک

Fig. 3- 3D and explosive view of model of gravity separator designed in Solidwork

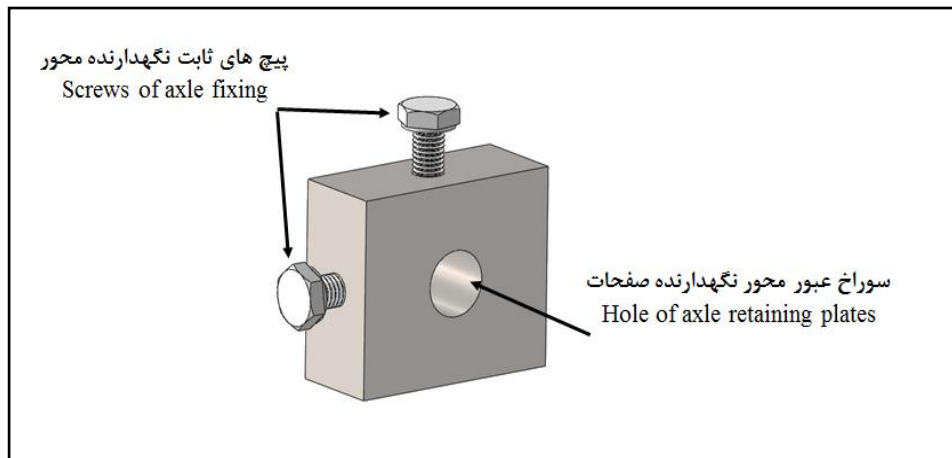
ارتعاش (شامل الکتروموتور و وزنه‌های نامتقارن) برای جداسازی است. شاسی دستگاه از سه قسمت افقی، اریب و عمودی ساخته شده است: قسمت عمودی از تیر آهن ۱۰ از جنس فولاد St 37 و قسمت اریب و افقی از ناودانی ۱۰ از جنس فولاد St 37. برای ساخت گهواره، قاب اصلی آن از نبشی پنج

پس از طراحی، مراحل ساخت دستگاه در کارگاه‌های گروه مهندسی فنی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران مطابق نقشه‌های طراحی شده آغاز شد. قسمت‌های مهم دستگاه مطابق شکل ۳ شامل شاسی، گهواره، صفحات شیب‌دار، مکانیزم نگهدارنده صفحات شیب‌دار و سیستم ایجاد

نگهدارنده صفحات از داخل این مکانیزم عبور داده شد و به کمک پیچ‌های M10 ثابت شدند. برای ت غیر شیب، پیچ‌های مذکور باز و پس از تنظیم شیب صفحات در مقدار مورد نظر، دوباره سفت می‌شوند (شکل ۴).

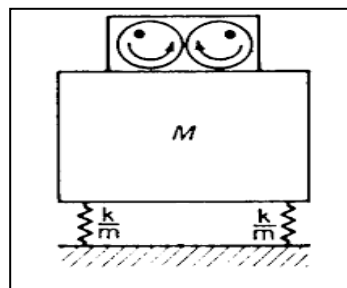
برای طراحی سیستم ایجاد ارتعاش دستگاه، از نامیزانی دواردر سامانه جرم- فنر استفاده شد (شکل ۵). دلیل استفاده از مکانیزم وزنه‌های خارج از مرکز در این سیستم قابل تنظیم بودن پارامترهای تعیین‌کننده ارتعاش است. با این مکانیزم، پارامترهای جرم وزنه، دامنه، فرکانس و میزان خروج از مرکزی جرم‌ها را می‌توان کنترل کرد. با توجه به شکل ۵، سیستم نشان داده شده ارتعاش عمودی ایجاد می‌کند.

و رابط بین آنها از نبشی چهار فولادی از جنس St37 استفاده شد. به منظور نگهداری صفحات شیب‌دار، بین قاب‌های اصلی جداساز با ورق با ضخامت دو میلی‌متر از جنس فولاد St37 پوشانده شد. در محل‌های مشخص روی این ورق‌ها سوراخ‌های ۲۰ میلی‌متری برای قرار گرفتن صفحات شیب‌دار ایجاد شد. صفحات شیب‌دار نیز از ورق فولاد St 37 با ضخامت دو میلی‌متر ساخته شد. صفحه تغذیه مواد نیز در بالای گهواره نصب شد تا مواد از طریق آن روی صفحات شیب‌دار اصلی منتقل شوند. به منظور ایجاد همپوشانی لازم برای جداسازی مواد، صفحات شیب‌دار در چهار طبقه و هر طبقه دو عدد طراحی و ساخته شدند. برای تنظیم شیب صفحات جداکننده از مکانیزم تنظیم شیب استفاده شد. محوره‌های



شکل ۴- مکانیزم تنظیم شیب صفحات جداکننده

Fig. 4- Slider adjustment mechanism for separator plates



شکل ۵ - سامانه جرم- فنر با جرم‌های محرک خارج از مرکز برای تولید ارتعاش عمودی (Poosti, 2014)

Fig. 5- Mass-spring system with off-center actuator masses to create vertical vibration (Poosti, 2014)

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه جداساز گرانشی سنگ از کود دامی

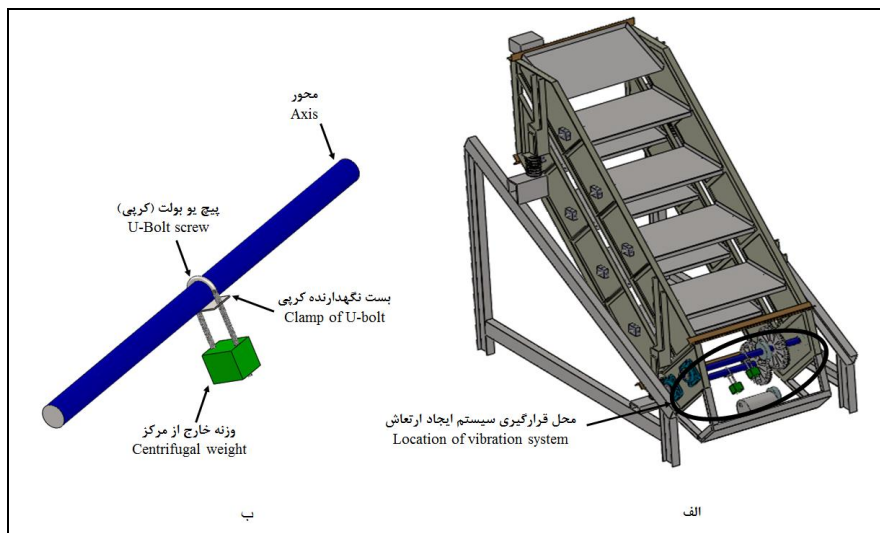
M = جرم (کیلوگرم)؛ m = جرم وزنه خارج از مرکز (کیلوگرم)؛ k = ضریب سفتی فنر (نیوتن بر متر)؛ ω = فرکانس زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه)؛ و X = دامنه ارتعاش (متر). برای ایجاد مکانیزم خارج از مرکز در سیستم ارتعاشی دستگاه جداساز، امکان قرارگیری محورهایی که وزنه‌های خارج از مرکز روی آنها سوار می‌شوند و همچنین محل قرارگیری الکتروموتور روی گهواره مشخص شد. در مکانیزم خارج از مرکز، از وزنه متصل به محور دوار استفاده شد که مرکز جرم وزنه، خارج از محور دوران قرار دارد (شکل ۶).

معادله دیفرانسیل سامانه‌ای ارتعاشی یک درجه آزادی است که با نیروی هارمونیک $F_0 \sin \omega t$ تحریک می‌شود به صورت رابطه ۵ و برای سیستم‌های بدون میراکننده ($c=0$) حل آن به صورت رابطه ۶ درمی‌آید.

$$Mx + cx + kx = F_0 \sin \omega t \quad (5)$$

$$X = \frac{me\omega^2}{k - M\omega^2} \quad (6)$$

که در آنها،



شکل ۶- الف- محل قرارگیری سیستم ارتعاشی ب- مکانیزم وزنه خارج از مرکز

Fig. 6- a) The location of the vibrating system and b) The off-center weight mechanism

که وزنه‌های خارج از مرکز روی آنها سوار شده‌اند. در طراحی سامانه ایجاد ارتعاش خطی باید از دو محور دارای وزن خارج از مرکز استفاده شود که شرایط زیر را دارا باشند:

- ۱- میزان me در هر دو محور برابر باشد.
- ۲- دو محور در خلاف هم دوران کنند.
- ۳- خط نیروی ارتعاش حاصل از دوران دو محور از مرکز جرم دستگاه عبور کند.

در این سیستم، وزنه خارج از مرکز به هنگام دوران ایجاد نیروی خارج از مرکز می‌کند که این نیرو به فنرها اعمال و باعث ایجاد ارتعاش می‌شود. میزان خارج از مرکز با e نمایش داده می‌شود با تغییر جرم وزنه و میزان خارج از مرکز آن می‌توان me را تغییر داد.

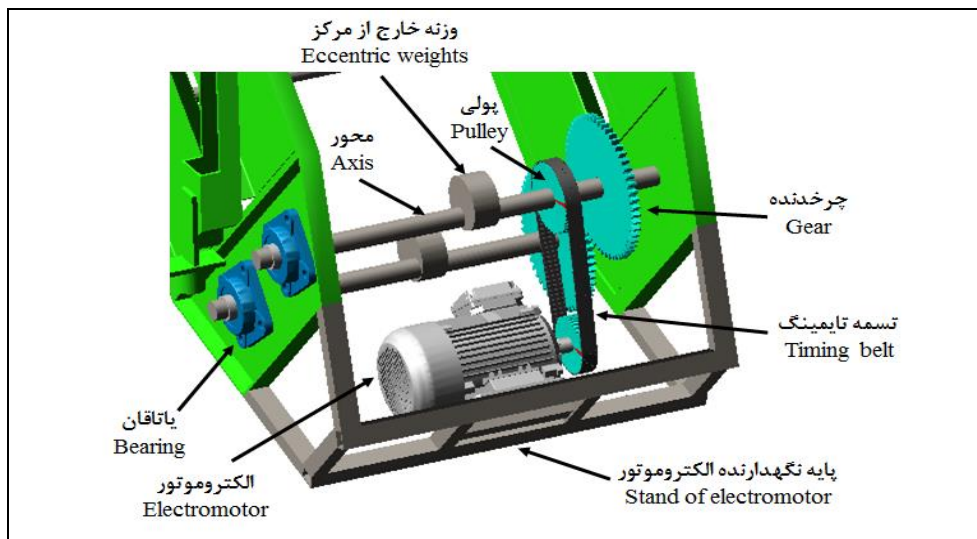
در جداسازها از سیستم ایجاد ارتعاش خطی استفاده می‌شود، از این رو از دو محور استفاده شد

هر وزنه خارج از مرکز هنگام دوران، نیروی گریز از مرکزی تولید می‌کند که برابر است با (رابطه ۷):

$$F=me\omega^2 \quad (7)$$

در سیستم ایجاد ارتعاش دستگاه جداساز گرانشی ساخته شده، از دو عدد محور استفاده شد تا وزنه‌های خارج از مرکز روی آنها سوار شوند. هر یک از وزنه‌ها با یک کرپی (پیچ U-BOLT) دقیقاً در وسط محورها قرار گرفته است. جرم وزنه‌ها با توجه به ضربه مورد نیاز در اثر ارتعاش و نیز میزان جابه‌جایی فنرهای جداساز انتخاب می‌گردد. مقدار جابه‌جایی مطلوب صفحه جداسازها در محدوده ۱۰

تا ۲۰ میلی‌متر است (Ray, 2005). برای تعیین پارامترهای ارتعاشی دستگاه، مدل دستگاه در نرم‌افزار ADAMS شبیه‌سازی شد. سامانه ایجاد ارتعاش دستگاه شبیه‌سازی شده در این نرم‌افزار، در شکل ۷ نشان داده شده است. مقادیر فرکانس و جرم خارج از مرکز مناسب برای جداسازی با تغییر جرم خارج از مرکز (در محدوده ۱/۵ تا ۴/۵ کیلوگرم) و فرکانس دوران (۱۵ تا ۲۰ هرتز) تعیین شد. در این تحقیق، مقدار خروج از مرکز وزنه‌ها با توجه به محدودیت فضای دستگاه ۱۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بخش نتایج و بحث آورده شده است.



شکل ۷- سیستم ایجاد ارتعاش شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آدامز

Fig 7- Simulation of vibration system in ADAMS

چرخ‌دنده‌های درگیر، نیرو به محور دیگر منتقل می‌شود تا دو محور با سرعت یکسان و در خلاف جهت یکدیگر حرکت کنند. ۳- چهار عدد یاتاقان UCF 208 به‌عنوان تکیه‌گاه محورها، و از آن‌جا که روی محورها وزنه‌های خارج از مرکز قرار دارند و باعث ارتعاش حین کار دستگاه می‌شوند، این یاتاقان‌ها به‌صورت خود-تنظیم انتخاب شدند.

سامانه ایجاد ارتعاش شامل قسمت‌های زیر است:
 ۱- دو عدد محور که وزنه‌های خارج از مرکز روی آنها نصب شده است، جنس محورها از فولاد ST 37 است.
 ۲- دو عدد چرخ‌دنده ساده با مدول پنج میلی‌متر روی محورها که در پایین دستگاه نصب شدند؛ توان از طریق تسمه تایمینگ و پولی از الکتروموتور به یکی از محورها منتقل و از طریق

دستگاه (نیوتن)؛ و P_0 = وزن الکتروموتور (نیوتن). جرم دستگاه بدون سیستم ایجاد ارتعاش ۲۴۰ کیلوگرم به دست آمد. مقدار خارج از مرکز وزنه‌های موتورهای ارتعاشی در محدوده پنج تا ۲۰ میلی‌متر است. از متناسب قرار دادن جرم سیستم ایجاد ارتعاش با جرم الکتروموتور ارتعاشی در جدول‌های انتخاب موتور ارتعاشی، موتور مورد نظر انتخاب شد. پس از محاسبات، از یک دستگاه الکتروموتور سه فاز ساخت شرکت موتوژن با توان ۳ کیلووات و سرعت ۱۴۴۰ دور در دقیقه استفاده شد. الکتروموتور با چهار پیچ M12 به صفحه لولایی روی دستگاه متصل شد. برای انتقال ارتعاش ایجاد شده از طریق سیستم ارتعاشی به گهواره دستگاه جداساز، از فنر استفاده گردید. برای طراحی و محاسبه فنرهای مورد نیاز دستگاه، نقشه طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورک، به محیط نرم‌افزار ADAMS منتقل و مورد تحلیل قرار گرفت. با توجه به میزان جابه‌جایی مورد نیاز برای جداسازی، سفتی فنرها در این نرم‌افزار ۲۴۰۰۰ نیوتن بر متر به دست آمد. پس از تعیین سفتی، چهار عدد فنر با مشخصات تعیین شده در جدول ۱، طراحی و ساخته شد. از رابطه ۹ برای طراحی فنر استفاده شد.

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (9)$$

که در آن،

d = قطر مفتول یا سیم فنر (میلی‌متر)؛ D = قطر میانگین حلقه (میلی‌متر)؛ G = مدول برشی (پاسکال)؛ و N = تعداد حلقه‌های فعال.

۵- برای انتقال نیرو از الکتروموتور به محورها، از دو عدد پولی و یک عدد تسمه تایمینگ استفاده شد. ۶- به منظور تنظیم یا تعویض تسمه، از یک صفحه آهنی در زیر پایه‌های الکتروموتور استفاده شد که با دو عدد لولا به بدنه دستگاه متصل است تا الکتروموتور روی آن قرار گیرد. ۷- از آنجا که اضافه کردن پولی‌ها و چرخ‌دنده‌ها باعث برهم خوردن تعادل دستگاه می‌شود، برای متعادل کردن مجدد دستگاه از وزنه‌های تعادل استفاده شد. مقدار جرم و موقعیت دقیق قرار گرفتن این وزنه‌ها با نرم‌افزار سالیدورک محاسبه شد. ۸- یک وزنه ۱۲۰ نیوتنی که در قسمت بالا و سمت چپ دستگاه قرار دارد.

برای انتخاب موتور الکتریکی برای تأمین توان مورد نیاز سامانه، لازم بود وزن کامل قسمتی از دستگاه محاسبه شود که روی فنرها قرار می‌گیرد. برای این منظور پس از طراحی دستگاه در نرم‌افزار سالیدورک و انتخاب جنس قسمت‌های مختلف دستگاه، وزن قسمت مورد نظر با استفاده از همان نرم‌افزار محاسبه شد. برای انتخاب موتور الکتریکی از رابطه ۸ استفاده شد که برای انتخاب موتورهای ارتعاشی به کار می‌رود (Anon, 2013).

$$M_t = e \times (P_c + P_0) \quad (8)$$

که در آن،

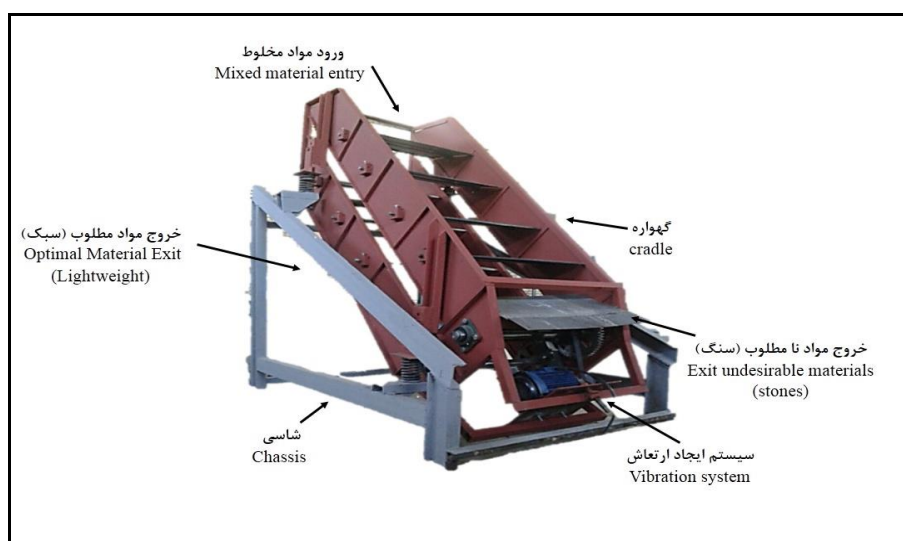
M_t = گشتاور استاتیکی (نیوتن در میلی‌متر)؛ e = مقدار خارج از مرکز وزنه‌های موتورهای ارتعاشی (میلی‌متر)؛ P_c = وزن

جدول ۱- مشخصات فنر مورد استفاده در دستگاه جداساز

Table 1- Specifications of springs that used in the separator

Spring that used فنر استفاده شده	Specification ویژگی
Carbon steel استیل	Material جنس
9	Diameter of wire(mm) قطر سیم (میلی‌متر)
79	External diameter of spring(mm) قطر خارجی فنر (میلی‌متر)
8	Number of all rings تعداد حلقه
6	Number of active rings تعداد حلقه فعال
150	Free spring length (mm) طول فنر آزاد (میلی‌متر)
24000	Spring stiffness(N/m) سفتی فنر (نیوتن بر متر)

پس از ساخت تمام اجزای شاسی و گهواره قرار داده شد و دستگاه برای ارزیابی آماده شد (شکل جداساز، این قطعات مونتاژ شد، گهواره روی شاسی (۸).



شکل ۸ - دستگاه جداساز گرانشی ساخته شده

Fig. 8- The built gravity separator

پس از ساخت دستگاه، برای هر آزمایش، ۷۵۰ گرم سنگ با ۵ کیلوگرم کود دامی که از مزرعه پردیس ابوریحان دانشگاه تهران تهیه شده بود (شکل ۹)، مخلوط شد تا مخلوط سنگ و کود برای آزمایش و ارزیابی و تعیین بازده دستگاه فراهم گردد.



شکل ۹ - کود دامی که از آن برای ارزیابی دستگاه جداساز گرانشی استفاده شد

Fig. 9- Manure that was used to evaluate the gravity separator

کمتر از ۱۰ میلی‌متر، بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر و بین ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متر) بر بازده دستگاه با استفاده از آزمایش‌های فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شد. میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن مقایسه شدند. از نرم‌افزار SAS برای تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس آزمایش‌ها در جدول ۲ آمده است. برای تعیین مقدار رطوبت اولیه مواد، سه نمونه ۱۰۰ گرمی کود طبق استاندارد ASAE S358.2 در داخل آون با دمای $103 \pm 3^\circ\text{C}$ به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. مقدار رطوبت طبق رابطه ۱۱ بر پایه تر سنجیده شد.

$$M_{w0b0} \% = \frac{W_w}{W_t} \times 100\% = \frac{W_w}{W_w + W_d} \times 100\% \quad (11)$$

مشخص شده برای تبدیل کود خشک به کود مرطوب و نیمه مرطوب، مقدار معینی آب اضافه شد. پس از اضافه کردن آب، برای توزیع یکسان رطوبت، درپوش ظرف‌های حاوی کود مرطوب بسته و به مدت ۲ روز به همان حال نگهداری شد. پس از آن، رطوبت کودهای موجود در هر سه ظرف بر اساس توضیحات بالا اندازه‌گیری شد و نمونه‌ها با رطوبت ۱۰

برای محاسبه بازده دستگاه از رابطه ۱۰ استفاده شد.

$$\text{بازده} = \frac{m_b}{m_T} \times 100 \quad (10)$$

که در آن، m_b = جرم کل مواد خارج شده از قسمت پشت دستگاه (کیلوگرم)؛ و m_T = جرم کل مخلوط کود و سنگ (کیلوگرم).

اثر متغیرهای شیب صفحات دستگاه در سه سطح (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه)، مقدار رطوبت کود دامی در سه سطح (۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد بر مبنای تر) و اندازه ذرات سنگ و کود در سه سطح (۱۰ و

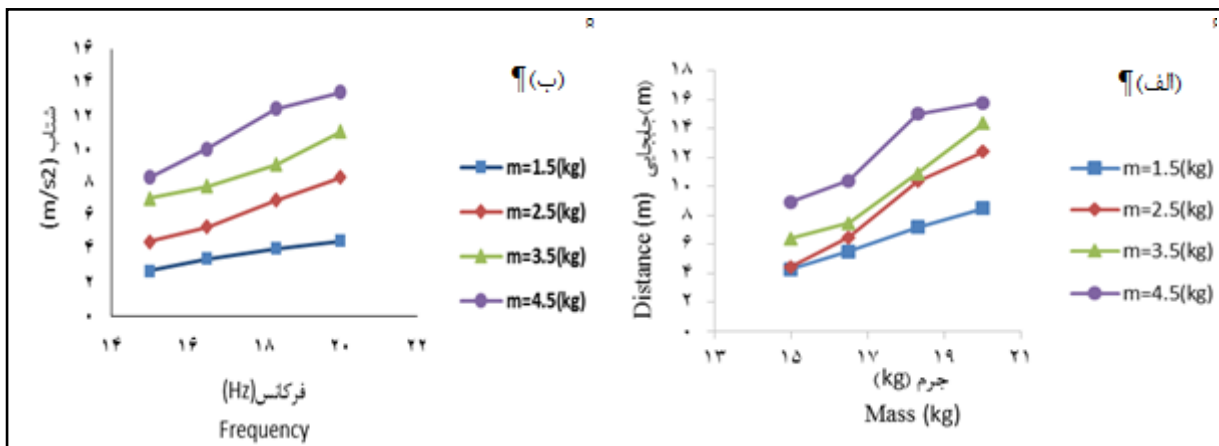
که در آن، M_{w0b0} = رطوبت کود بر مبنای تر (درصد)؛ W_w = جرم آب موجود در کود (گرم)؛ W_d = جرم ماده خشک موجود در کود (گرم)؛ W_t = جرم کل کود (گرم). کود تهیه شده به سه قسمت تقسیم و هر قسمت در ظرفی جداگانه ریخته شد و با استفاده از ترازوی دیجیتال وزن هر قسمت به دست آمد. به دو ظرف

برای جرم‌های خارج از مرکز ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ کیلوگرم به ترتیب در محدوده‌های ۴/۵ تا ۸/۵، ۴/۵ تا ۱۲/۴، ۶/۴ تا ۱۴/۴ و ۸/۹ تا ۱۵/۸ میلی‌متر افزایش یافت. بر اساس این شبیه‌سازی در نرم‌افزار ADAMS، همچنین با افزایش فرکانس از ۱۵ تا ۲۰ هرتز، میزان شتاب گهواره دستگاه نیز در محدوده ۲/۸ تا ۴/۵، ۴/۵ تا ۸/۳، ۷/۱ تا ۱۱/۱ و ۸/۳ تا ۱۳/۴ متر بر مجذور ثانیه برای جرم‌های مورد نظر افزایش یافت. با توجه به شکل ۱۰ و میزان جابه‌جایی لازم برای جداسازها، مقدار فرکانس و جرم خارج از مرکز مناسب برای دستگاه ساخته شده، به ترتیب ۲۰ هرتز و ۴/۵ کیلوگرم تعیین شد.

درصد (خشک)، ۳۰ درصد (نیمه مرطوب)، و ۵۰ درصد (مرطوب) آزمایش شدند.

نتایج و بحث

تغییرات جابه‌جایی و شتاب حاصل از شبیه‌سازی گهواره دستگاه ساخته شده به‌ازای فرکانس برای جرم‌های مختلف، در نرم‌افزار ADAMS، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که از قسمت الف این شکل پیداست، با افزایش فرکانس از ۱۵ تا ۲۰ هرتز (معادل سرعت دورانی الکتروموتور سامانه ایجاد ارتعاش، ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه) در نرم‌افزار ADAMS میزان جابه‌جایی عمودی گهواره دستگاه



شکل ۱۰- الف) تغییرات جابه‌جایی و ب) تغییرات شتاب در فرکانس‌ها و جرم‌های خارج از مرکز متفاوت شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آدامز

Fig. 10- a- Displacement changes and b- Acceleration changes in different frequencies and off-center masses simulated in ADAMS

بر بازده جداسازی همگی در سطح یک درصد معنی دار هستند. بنابراین، در این‌جا تنها درباره اثر متقابل مقدار رطوبت × اندازه ذرات، مقدار رطوبت × شیب صفحات، و اندازه ذرات × شیب صفحات بر بازده جداسازی بحث می‌شود.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر متغیرهای مستقل مقدار رطوبت کود، شیب صفحات جداساز و اندازه ذرات کود و سنگ بر بازده جداسازی، در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که از این جدول پیداست، اثرهای ساده و متقابل مذکور

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه جداساز گرانشی سنگ از کود دامی

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس متغیرهای مقدار رطوبت کود، اندازه ذرات و شیب صفحات جداساز بر بازده جداسازی دستگاه جداساز گرانشی

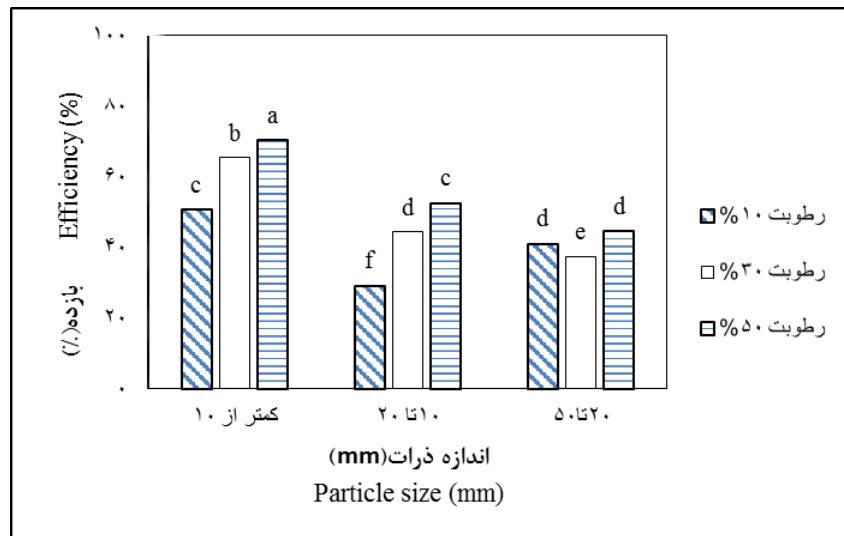
Table 2- Results of analysis of variance of manure moisture content, particle size and slope of separator plates on gravitational separator efficiency

average of squares میانگین مربعات	Degrees of freedom درجه آزادی	Sources of changes منبع تغییر
171/51**	2	moisture content مقدار رطوبت
402/1**	2	Particle size اندازه ذرات
449/22**	2	Plates slope شیب صفحات
36/6**	4	Particle size × moisture content اندازه ذرات × مقدار رطوبت
21/28**	4	Plates slope × moisture content شیب صفحات × مقدار رطوبت
57/21**	4	Plates slope × Particle size شیب صفحات × اندازه ذرات
5/76**	8	Plates slope × Particle size × moisture content شیب صفحات × اندازه ذرات × مقدار رطوبت
15/33	54	Error خطا
6/37	-	Coefficient of variation (%) ضریب تغییر (%)

** معنی دار در سطح آماری ۱ درصد ($p \leq 0.01$)

۱۱ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که به طور کلی در هر سه سطح رطوبت بررسی شده، با افزایش اندازه ذرات، بازده کاهش می یابد.

اثر متقابل مقدار رطوبت و اندازه ذرات بر بازده جداسازی
نتایج مقایسه میانگین های اثر متقابل مقدار رطوبت در اندازه ذرات بر بازده جداسازی، در شکل

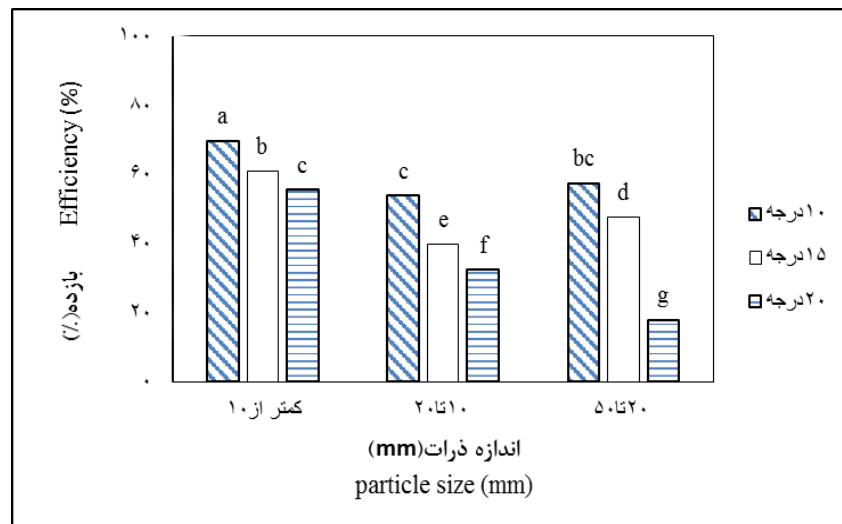


شکل ۱۱- اثر متقابل مقدار رطوبت و اندازه ذرات بر بازده جداسازی

Fig. 11- Interaction of moisture content and particle size on separation efficiency

از این شکل پیداست که در هر سه سطح شیب صفحات برای تمام اندازه ذرات با افزایش اندازه ذرات بازده جداسازی دستگاه طراحی و ساخته شده به‌طور معنی‌داری در سطح ۱ درصد کاهش می‌یابد.

اثر متقابل اندازه ذرات مواد و شیب صفحات جداساز بر بازده جداسازی نتایج مقایسه میانگین‌های اثر متقابل اندازه ذرات در شیب صفحات بر بازده جداسازی، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- اثر متقابل اندازه ذرات مواد و شیب صفحات جداساز بر بازده جداسازی

Fig. 12- Interaction of particle size and plates slope on separation efficiency

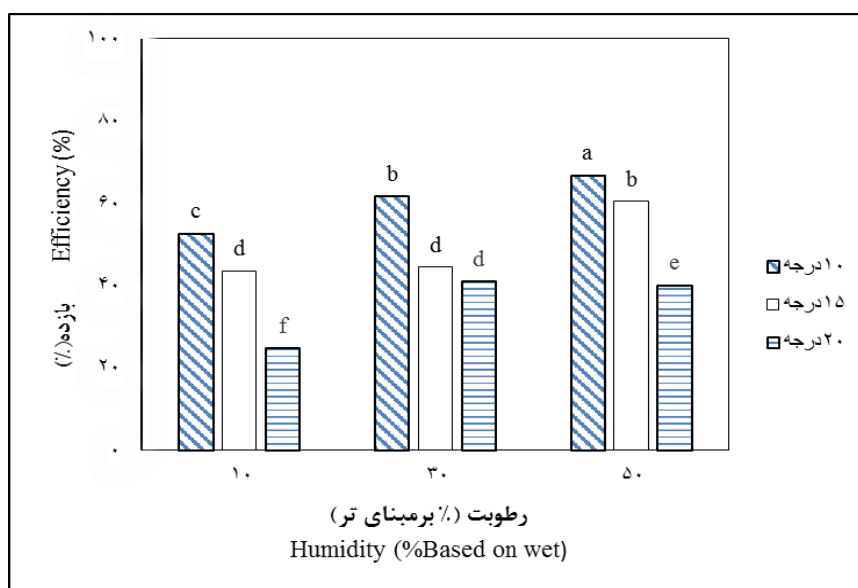
در شیب ۱۰ درجه مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه ذرات از ریز (کمتر از ۱۰ میلی‌متر) به متوسط (۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر)، بازده از ۶۹/۸ به ۵۳/۹ درصد کاهش یافته است اما در این شیب

شیب ۲۰ درجه و اندازه ذرات متوسط و درشت بسیار کم است، جداسازی در این شرایط مناسب به نظر نمی‌رسد. از شکل ۱۲ همچنین دریافت می‌شود که برای تمام سطوح اندازه ذرات، افزایش شیب صفحات از ۱۰ به ۲۰ درجه، سبب کاهش معنی‌دار بازده جداسازی دستگاه می‌شود.

اثر متقابل اندازه مقدار رطوبت مواد و شیب صفحات جداساز بر بازده جداسازی

شکل ۱۳ نتایج مقایسه میانگین‌های اثر متقابل مقدار رطوبت و شیب صفحات بر بازده جداسازی را نشان می‌دهد.

اختلاف معنی‌داری بین بازده دستگاه در مواد با اندازه متوسط و درشت (۲۰ تا ۵۰ میلی‌متر) دیده نمی‌شود. دلیل این افزایش در مواد درشت، سطح تماس بیشتر این مواد با صفحات شیب‌دار و در نتیجه خروج از قسمت پشت دستگاه است. برای شیب صفحات ۱۵ درجه کاهش بازده جداسازی برای اندازه ذرات درشت، نسبت به اندازه ذرات متوسط، مشاهده نشد که می‌تواند به علت غلظت راحت‌تر مواد به سمت جلو دستگاه باشد. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در شیب ۲۰ درجه، با افزایش اندازه ذرات، بازده کاهش می‌یابد و از ۵۵/۶ درصد به ۱۸/۹ درصد می‌رسد. از آنجا که بازده جداسازی در



شکل ۱۳- اثر متقابل مقدار رطوبت مواد و شیب صفحات جداساز بر بازده جداسازی
 Fig. 13- Interaction of moisture content and plates slope on separation efficiency

به ۶۰/۴ درصد، و در شیب ۲۰ درجه از ۲۴/۷ به ۴۰/۱ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین از این شکل دریافت می‌شود که در هر سه سطح رطوبت کود، با افزایش شیب صفحات، بازده جداسازی دستگاه به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد به غیر از رطوبت ۳۰ درصد که بین

در این شکل پیداست که در تمامی شیب‌های مورد مطالعه با افزایش رطوبت، بازده جداسازی دستگاه به‌طور معنی‌داری در سطح ۱ درصد افزایش می‌یابد. به نحوی که در شیب ۱۰ درجه با افزایش رطوبت از ۱۰ تا ۵۰ درصد، مقدار بازده از ۵۲/۷ درصد به ۶۶/۸ درصد، در شیب ۱۵ درجه از ۴۳/۵

میانگین‌های بازده جداسازی مربوط به شیب‌های ۱۵ و ۲۰ درجه تفاوت معنی‌دار نیست. دلیل افزایش بازده در اثر افزایش رطوبت در شیب‌های مختلف این است که با افزایش رطوبت، اصطکاک بین ذرات کود و صفحات شیب‌دار افزایش می‌یابد، در نتیجه، ذرات کود بیشتر به سمت پشت دستگاه حرکت می‌کنند و بنابراین بازده افزایش می‌یابد.

کار این دستگاه جداساز، اختلاف چگالی بین ذرات سنگ و کود است. مشاهده گردید که شیب صفحات جداساز، رطوبت کود و اندازه ذرات بر جداسازی تأثیر دارد. نتایج بررسی همچنین نشان می‌دهد بهترین بازده دستگاه برای مواد با رطوبت ۵۰ درصد، شیب صفحات ۱۰ درجه و اندازه ذرات کمتر از ۱۰ میلی‌متر، برابر با مقدار ۷۶/۸۱ درصد به‌دست آمده است. پیشنهاد می‌شود:

- سیستم انتقال مواد پس از جداسازی برای دستگاه تعبیه گردد.

- انرژی مصرفی دستگاه جداساز تحلیل و بررسی شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک دستگاه جداساز گرانشی سنگ از کود دامی طراحی، ساخته و ارزیابی شد. اساس

قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران و پردیس ابوریحان برای فراهم آوردن امکان اجرای این پژوهش، از پارک علم و فناوری دانشگاه تهران برای تأمین بودجه اجرای تحقیق، و از مرکز تحقیقات و نوآوری سازمان اتکا برای فراهم آوردن امکانات لازم در اجرای تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- Alemi, H., Kianmehr, M. H., Borghei, A. M., & Alasi, M. (2015). The effect of nitrogen fertilizer pelleting process on gradual release of nitrogen in soil and its increase in basil plant. *Agriculture Journal*, 106, p. 8-14. (in Persian)
- Anon. (2006). Hard Particle Separator Report. *Research Report*. Adas Composting Research Project.
- Anon. (2012). Statistics of Agricultural Jihad. Report. Iran. (in Persian)
- Anon. (2013). Italvibras Company. <http://www.italvibras.it>.
- Ayodeji, O. O., & Yisa, J. J. (2014). Design and fabrication of rice de-stoning machine. *Food Science and Technology*, 2(1), p. 1-5.
- Balascio, C. C., Misra, M. K., & Johnson, H. P. (1987). Particle movement and separation phenomena for a gravity separator: I. Development of a Markov probability model and estimation of model parameters. *Transactions of the ASAE*, 30(6), p. 1834-1839.
- Colijn, H. (1984). *Weighing and Proportioning of Bulk Solids*. Trans Tech Publications.
- Despotović, Ž. V., Šinik, V., Janković, S., Dobrićević, D., & Bjelica, M. (2015). *Some specifics of vibratory conveyor drives. In International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection*. Oct. 15 -16. Zrenjanin, Serbia.

- Falconer, A. (2003). Gravity separation: old technique/new methods. *Physical Separation in Science and Engineering*, 12(1), p. 31-48.
- Feller, R., Mizrach, A., Zaltzman, A., & Schmilovitch, Z. (1981). Gravity separation over a mesh belt conveyor. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 26(5), p. 371-377.
- Honaker, R. Q., Singh, N., & Govindarajan, B. (2000). Application of dense-medium in an enhanced gravity separator for fine coal cleaning. *Minerals Engineering*, 13(4), p. 415-427.
- Patil, V. N., & Sarode, S. D. (1988). Seed quality studies in wheat as influenced by specific gravity separator. *Seed Research*, 16(1), p. 114-116.
- Poosti, B. (2014). *The Theory of Vibrations with Its Applications*. Shahre Ab Press. (in Persian)
- Rasekh, M., Tavakoli, T., Firoozabadi, B., & Kianmehr, M. H. (2005). Experimental studying of performance of gravity separator apparatus in separation of sunn Pest-Damaged wheat. *Quarterly Journal of Food Science and Technology of Iran*, 2(3), p. 33-47. (in Persian)
- Ray, T. K. (2005). *Mechanical Handling of Materials*. Asian Books Private Limited. New Delhi.
- Rezaifar Hassan-Beygi, S. R., Kianmehr, M. H., & Azadegan, B. (2008). Investigating the physical properties of pellet cow manure. *Journal of Agriculture*, 10(2), p. 53-69. (in Persian)
- Silva, W. R., & Marcos-Filho, J. (1982). Effect of weight and size of maize seed on field performance. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 17(12), p. 1743-1750.
- Tomas, J. 1990. An introduction to gravity separators. *Powder and Bulk Engineering*. 12, p. 36-38.
- Yisa, M. G., Fadeyibi, A., Katibi, K. K., & Ucheoma, O. C. (2017). Performance evaluation and modification of an existing rice destoner. *International Journal of Engineering Technologies*, 3(3), p. 169-175.



Design and Fabrication of Gravity Separator of Stone from Cattle Manure and Determining Maximum Efficiency

R. Rahimi, M. H. Kianmehr^{*}, S. R. Hassan-Beigi and P. Zarafshan

^{*}Corresponding Author: Professor, Technical and Agricultural Department, College of Aburaihan, Tehran University, Pakdasht, Iran. Email: Kianmehr@ut.ac.ir

Received: 15 May 2018, Accepted: 25 December 2018

Abstract

One of the methods of using livestock exhaust is compressing and pelleting it, which causes facilitation of transportation, reduction of odor and gradual release of nitrogen. For manure pelleting, extruder and disk pelleting are used. Since the stones existing materials in the stored manure cause damage to the pelleting apparatus, so the removal of the stone from the manure before the processing is necessary. In this research, with the aim of separation the rock from the manure, a gravity separator was designed and fabricated. The performance of the device was evaluated by changing the three slope parameters of the material separator plates, manure moisture content and the size of the stone and manure dimensions. The changed level was for 10, 15 and 20 ° slopes of separators, 10, 30 and 50% of the moisture content of manure, and for the particle size of less than 10, 10 to 20 and 20 to 50 mm. The maximum device separation efficiency of the stone from the manure was 76.81% at 10 ° slope, 50% moisture content and a particle size less than 10 mm.

Keywords: Biomass, Cascade, Pellet, Slope plates, Vibration