معرفی روش جدید انتخاب قطر و سرعت دورانی مناسب برای سرندهای دوار ورمی-کمپوست

محسن طاهرزاده[۱*]، داود قنبریان[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

۲- عضو هئیت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

* ایمیل نویسنده مسئول: mohsentaherzadeh28@gmail.com

چکیده

یکی ازمهم‌ترین روش‌های فرآوری زباله‌های شهری بازیافت آن‌ها به صورت ورمی‌کمپوست است که درنتیجه‌ی این فرایند علاوه برکاهش مشکلات زیست‌محیطی، مقادیرقابل توجهی کود مرغوب به نام ورمی‌کمپوست تولیدمی‌شود. پس از تولید ورمی‌کمپوست محصولات تولیدی که شامل کود و کرم هستند باید با شیوه‌ای مناسب جداسازی شوند. جداسازی در صنعت ورمی‌کمپوست دو فرایند را در بر می‌گیرد: ۱- جداسازی کود ریز دانه و مرغوب از ذرات درشت و مواد خارجی. ۲- جدا سازی کرم از کود تولید شده. یکی از مرسوم‌ترین روش‌های جداسازی در صنعت ورمی‌کمپوست استفاده از سرندهای دوار است که می‌توانند در ابعاد گوناگون ساخته‌شوند. در سرندهای دوار مواد به واسطه‌ی سرعت و قطر استوانه‌ی دوار تا ارتفاع خاصی بالا آمده و سپس به سمت پایین و کف استوانه ریزش می‌کنند. در این تحقیق تلاش شد با توجه به منطق اصلی و منحصر به فرد به کار رفته در این سرندها که تامین انرژی لازم برای خرد کردن کلوخه های ورمی کمپوست است روشی برای تعیین قطر و سرعت مناسب سرند ارائه گردد. نتایج اولیه و نظری حاصل از این پژوهش انطباق قابل قبولی با نتایج عملی حاصل از تحقیقات پیشین داشت.

واژه‌های کلیدی: استوانه‌ی دوار، رطوبت ورمی‌کمپوست، سرعت استوانه، کلوخه‌ی ورمی‌کمپوست، میزان انرژی کلوخه

مقدمه

در فعالیت های کشاورزی، دررستوران ها و غذاخوری ها و هچنین در صنعت، پسماندهای ارگانیک زیادی از قبیل بقایای گیاهی، کودهای دامی و زباله های گوناگون تولید می شود. این موضوع باعث ایجاد آلودگی های فراوان در محیط زیست می‌شود چرا که معمولا این زباله ها یا دفن شده یا سوزانده می‌شوند و یا اینکه در روی زمین رها می‌گردند. دفن و سوزاندن سالانه، میلیون ها تن زباله علاوه بر این که مشکلات زیست‌محیطی فراوانی به وجود می‌آورد، هزینه‌های کلانی نیز صرف حمل، دفن و یا سوزاندن زباله می‌شود. در روش دفن زباله معایبی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: ورود نیترات و سایر مواد آلاینده به خاک و آب‌های زیر زمینی، اشغال فضای زیاد توسط مواد زائد. این در حالی است که بیش از ۵۰ تا ۶۰ درصد زباله ها ارگانیک هستند و با مدیریت

صحیح می‌توانند به موادی مفید در کشاورزی و باغبانی تبدیل شوند، در این صورت علاوه بر کاهش هزینه‌های اقتصادی، صرفه-جویی زیادی نیز در مواد مغذی گیاهی و انرژی متابولیک به عمل خواهد آمد(کلایو و همکاران۲۰۱۱). یکی از مهم‌ترین روش‌های فرآوری زباله‌های شهری بازیافت آن‌ها به صورت ورمی‌کمپوست است که در نتیجه‌ی این فرایند، علاوه بر کاهش مشکلات بهداشتی و زیست محیطی، مقادیر قابل توجهی کود آلی و مرغوب به نام ورمی‌کمپوست تولید می‌شود (ارزانش و عباسی، ۱۳۹۰). ورمی کمپوست یک کود آلی بیولوژیک است که در اثر عبور مداوم و آرام مواد آلی در حال پوسیدگی از دستگاه گوارش گونه‌هایی از کرم‌های خاکی حاصل می‌شود. این مواد پس از دفع از بدن کرم، ورمی کمپوست را تشکیل می‌دهند (علیخانی، ۱۳۸۵).). مواد آلی در حال پوسیدن، هنگام عبور از بدن کرم آغشته به مخاط دستگاه گوارش بدن کرم (موکوس)، ویتامین و آنزیم‌هامی‌شود و در نهایت به عنوان یک کود آلی غنی‌شده در می‌آید که برای بهبود ساختمان خاک بسیار مفید بوده و عناصر غذایی خاک را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد. در کل ورمی‌کمپوست شامل فضولات کرم به همراه درصدی از مواد آلی، مواد غذایی بستر زندگی کرم و لاشه کرم‌ها می‌باشد (اسماعیل و همکاران، ۲۰۰۳).

از جمله موادی که می‌توان برای تولید ورمی کمپوست از آن‌ها استفاده کرد عبارتند از: پهن حیوانات، پسماندهای کشاورزی، ضایعات کاغذ و پوشاک، ضایعات جنگلی، خرده برگ‌های سطح شهر، ضایعات شهری، ضایعات صنعتی، لجن حاصل از بیوگاز و بستر قارچ‌های خوراکی (ادواردز،۲۰۰۳ و جوپتا،۲۰۰۴).

در فرایند تولید ورمی‌کمپوست باید گونه‌ی مناسبی از کرم‌ها انتخاب شود. به طور کلی در حدود ۲۷۰۰ گونه‌ی مختلف از کرم‌های خاکی وجود دارد که بسته به موضوع کار و هدف،گونه انتخابی متفاوت خواهد بود. یکی از مهم‌ترین گونه‌های کرم خاکی که در سطح جهان و ایران برای تولید ورمی کمپوست استفاده می‌شود کرم خاکی ببری یا ایزنیا فوتیدا (eisenia fotida) می‌باشد (علیخانی، ۱۳۸۵).

برای جداسازی ورمی‌کمپوست تاکنون روش‌های مختلفی به کار برده شده است برخی از این روش‌ها عبارتند از: استفاده از شوک الکتریکی جهت تحریک و بیرون راندن کرم‌ها از ورمی‌کمپوست، استفاده از مواد شیمیایی محرک جهت فراری دادن کرم‌ها و... که هر یک دارای معایبی هستند. بررسی های انجام شده نشان می دهد مشکلات مربوط به سایر روشهای جداسازی باعث شده است تا تمایل تولید کنندگان به استفاد ه از جداسازهای مکانیکی روز به روز بیشتر شود. به نحوی که اغلب به صورت تجربی و غیر علمی اقدام به ساخت الکهای دوار مکانیکی برای جداسازی کرم ها نموده اند و ملاک و معیار علمی برای انتخاب ابعاد دستگاه و به خصوص قطر استوانه که اصلی‌ترین قسمت یک سرند دوار است، در نظر گرفته نمی‌شود.

در کل استوانه های داوار کاربردهای متعددی دارند که از جمله آنها می توان به کاربرد آنها در درجه بندی و گرانوله سازی مواد و محصولات مختلف در صنایع کشاورزی و داروسازی اشاره کرد. در هرکدام از این صنایع ویژگیهای خاصی از استوانه دوار مورد

استفاده قرار می گیرد. به عنوان مثال در حالی که در صنایع داروسازی و تولید بذر هدف اصلی گرانوله کردن ماده مورد نظر است در صنایع درجه بندی، عبور محصول مورد نظر از سوراخهای ایجاد شده در سطح داخلی استوانه مورد توجه است و در این راستا بایستی کمینه شدن آسیبهای مکانیکی محصول مورد نظر باشد.

در سرند ورمی‌کمپوست مواد وقتی در ابتدای استوانه دوار ریخته می‌شوند بسته به سرعت دورانی استوانه تا ارتفاع خاصی بالا آمده و سپس به سمت پایین وکف استوانه ریزش میکنند در ضمن مواد به دلیل شیب طولی استوانه به سمت انتهای آن حرکت میکنند و در طول این فرایند قسمت ریزدانه مواد از جداره‌ی مشبک استوانه خارج می‌شود و قسمت دانه‌درشت مواد از انتهای استوانه خارج می‌شود. مهمترین ویژگی که طراحی سروند دوار برای ورمی کمپوست را به صورت یک مسئله خاص، متفاوت با سایر کاربردها نمایان می سازد ضرورت متلاشی و خرد شدن کلوخه های درشت ورمی کمپوست است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ورمی‌کمپوست در یک کارگاه تولیدی در استان چهارمحال و بختیاری و شهر فرخشهر تهیه شد و مراحل تحقیق در کارگاه ماشین آلات دانشگاه شهرکرد انجام شد.

نحوه‌ی اندازه گیری رطوبت ورمی‌کمپوست

میزان رطوبت ورمی‌کمپوست از جمله پارامتر هایی است که بر عملکرد دستگاه موثر است و تمام مراحل تحقیق باید با در نظر داشتن این پارامتر انجام شود. برای تعیین محتوای رطوبت اولیه‌ی کود سه نمونه‌ی ۱۰۰ گرمی از کود طبق استاندارد ASAE S358.2 در داخل آون ساخت شرکت SHIMAZ CO با دمای ۳±۱۰۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. محتوای رطوبت طبق رابطه‌ی زیر بر مبنای پایه‌ی تر محاسبه شد (استاندارد ASAE، ۱۹۹۸).

$$M_{wb} = \frac{W_w}{W_t} = \frac{W_w}{W_{d+}W_w}$$

M_{wb} : درصد رطوبت بر مبنای تر

W_w : جرم رطوبت موجود در کود (گرم)

W_d : جرم ماده‌ی خشک موجود در کود (گرم)

W_t : جرم کل کود (گرم)

تهیه‌ی نمونه‌ی کود ورمی کمپوست با رطوبت مورد نظر

برای تهیه‌ی نمونه‌هایی با سطوح رطوبتی مورد نظر برای هر آزمایش، با آب‌پاش به کود آب مقطر اضافه گردید. مقدار آب اضافه شده از رابطه‌ی زیر محاسبه گردید (استروشاین، ۲۰۰۴):

$$m_w = \frac{m_i (M_{wf} - M_{wi})}{1 - M_{wf}}$$

m_w : جرم آب اضافه شده (گرم)

m_i : جرم اولیه‌ی کود تر (گرم)

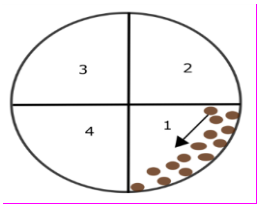
M_{wi} : درصد رطوبت اولیه‌ی کود بر مبنای تر

M_{wf} : درصد رطوبت نهایی بر مبنای تر

پس از اضافه نمودن آب مقطر، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت درون یخچال با دمای ۵ درجه‌ی سانتی گراد نگهداری شدند تا رطوبت به طور یکنواخت درون هر نمونه توزیع شود.

قطر استوانه‌ی دوار

برای طراحی استوانه‌ی دوار سرند، در ابتدا حرکت مواد درون سرند مد نظر قرار گرفت چرا که اولین وظیفه‌ی استوانه در برگرفتن و به حرکت درآوردن مواد است. اگر حرکت استوانه پادساعتگرد در نظر گرفته شود و سرعت دوران استوانه به اندازه‌ای باشد که مواد را تا ارتفاعی به اندازه‌ی مرکز استوانه بالا بیاورد با توجه به اینکه تجمع مواد بیشتر درون ربع اول استوانه اتفاق می‌افتد، ذرات کود در اثر وزنشان با غلتیدن وسرخوردن روی یکدیگر به سمت پایین ریزش می‌کنند (شکل ۱). این نوع حرکت باعث چسبیدن ذرات به یکدیگر شده و محتویات پودری شکل درون سرند به ذرات کروی شکل درشت تبدیل می‌شوند و از انتهای قسمت خروجی سرند خارج می‌شوند که این امر در عملیات سرندکردن، نامطلوب است.



شکل ۱): حرکت ذرات کود در ربع اول استوانه دوار

برای جلوگیری از گرانوله شدن محتویات درون سرند، این مواد باید تا ارتفاعی خاصی بالا آورده شوند و سپس سقوط کنند، این حرکت باید به گونه ای باشد که: الف) منجر به استفاده‌ی بهینه از بیشترین سطح درونی سرند شود و ب) باید تاحد امکان باعث شود که ورمی‌کمپوست دانه درشت و کلوخه‌ای، خرد شده و به عنوان کود مرغوب و با کیفیت از سرند خارج شود. بدین منظور باید قطر و سرعت دورانی استوانه به اندازه‌ای در نظر گرفته شوند که شرایط مورد نیز برای حرکت مناسب بار درون سرند را مهیا کند. در وهله‌ی اول این نکته باید در نظر گرفته شود که ذرات کود به دو دلیل باید تا ارتفاعی بیش از ارتفاع مرکز استوانه بالا برده‌شوند که عبارتند از: الف)عمل سقوط کردن و حرکت آبشاری در ربع دوم استوانه برای مواد درون سرند اتفاق بیفتد. ب) از حرکت سرش و غلتیدن ذرات بر روی یکدیگر جلوگیری شود.

۲-٤ بررسی ارتفاع لازم برای سقوط و متلاشی شدن کلوخه‌های ورمی‌کمپوست

بستر ورمی کمپوستی که هنوز تحت عملیات سرند قرار نگرفته‌است از ذرات پودری شکل به همراه کلوخه‌هایی تشکیل شده است که این کلوخه‌ها (شکل۲) در عملیات سرند باید از هم پاشیده شوند و حتی الامکان به ذرات کوچک‌تر از ۴ میلیمتر تبدیل شده، از منافذ سرند عبور کنند و به عنوان کود مرغوب دسته‌بندی شوند و نیز کرم‌های محبوس شده درون کلوخه‌ها از محل خود خارج شده و امکان جداسازی آن‌ها بیشتر شود. البته مواد اولیه‌ی استفاده شده برای تهیه‌ی ورمی‌کمپوست بر روی بافت کود و اندازه‌ی کلوخه‌ها بسیار مؤثر است. به طور مثال اگر کود دامی استفاده شده در تهیه‌ی ورمی‌کمپوست با مقداری خاک مخلوط باشد کلوخه‌ها چسبنده‌تر و دارای ابعاد بزرگ‌تری می‌شوند.

شکل ۲): کلوخه‌های ورمی‌کمپوست

در این پژوهش از میان توده‌ی ورمی کمپوست در سطوح مختلف رطوبتی بزرگ‌ترین کلوخه‌ها انتخاب شد و وزن این کلوخه‌ها اندازه‌گیری شد که نتایج در جدول ۱ آورده شده است. البته لازم به ذکر است که در هر سطح رطوبتی وقتی چند کلوخه (که بزرگترین کلوخه‌ها بودند) انتخاب می‌شد معمولا هم وزن بودند که برای افزایش دقت آزمایش از کلوخه‌های با جرم یکسان استفاده شد.

جدول ۱): وزن بزرگترین کلوخه‌ها در سطوح مختلف رطوبتی

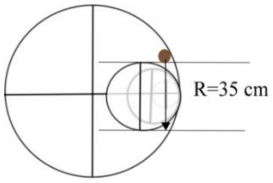
درصد رطوبت	۵۰	۶۰	۷۰
جرم کلوخه‌ها (گرم)	۵۰	۶۰	۷۵

کلوخه‌ها از ارتفاع‌های مختلف سقوط داده شد و مواد بر جای مانده از کلوخه بر روی یک الک با سوراخ‌هایی به قطر ۴ میلی‌متر ریخته شد و در هر مرحله وزن ذرات بزرگتر از ۴ میلی‌متر که بر روی الک ماند، اندازه‌گیری شد ارتفاع تا حدی افزایش داده شد که کلوخه تقریباً به طور کامل از هم پاشیده شد و هیچ ذره‌ای از کلوخه بر روی الک باقی نماند (البته ممکن است در کلوخه‌ها مواد خارجی از قبیل سنگ، سنگریزه و ... وجود داشته باشد که باید از روی الک حذف شده و فقط کلیه‌ی ذرات تشکیل دهنده‌ی کلوخه که قابلیت پودر شدن را داشتند مد نظر قرار گرفته شدند). آزمایش برای هر سطح رطوبتی در ۵ تکرار انجام شد که نتایج نهایی به دست آمده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲): ارتفاع لازم جهت سقوط و متلاشی شدن کلوخه‌ها

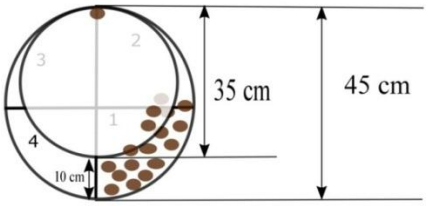
درصد رطوبت کلوخه	ارتفاع سقوط (سانتیمتر)	وزن کلوخه‌ی بر جای مانده پس از سقوط (گرم)
۵۰	۲۰	۰
۶۰	۲۰	۱۲
۶۰	۲۵	۶
۶۰	۳۰	۰
۷۰	۲۰	۱۵
۷۰	۲۵	۱۰
۷۰	۳۰	۵
۷۰	۳۵	۰

با بررسی جدول ۲ مشاهده می‌شود که حداکثر ارتفاع لازم جهت خرد شدن کلوخه‌ها ۳۵ سانتیمتر است. پس استوانه‌ی دوار باید به گونه‌ای طراحی شود که بتواند یک دایره به قطر ۳۵ سانتی‌متر را درون خود جای دهد (شکل ۳). به این ترتیب مواد درون استوانه می‌توانند تا ارتفاعی بالا آورده شوند که اتفاقی شبیه عمل سقوط آزاد از ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری در مورد آنها حادث شود.



شکل ۳): برآورد اندازه‌ی قطر استوانه

برای طراحی استوانه‌ی دوار باید این نکته در نظر گرفته شود که بار درون سرند نیز مقداری از فضای سرند را اشغال کرده است و بسیاری از مواد درون سرند در مسیرهای دایروی با قطری کمتر از قطر استوانه‌ی دوار در حرکت هستند. اگر ارتفاع بار درون سرند ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شود باید معادل با ارتفاع بار درون سرند به شعاع استوانه اضافه شود (شکل ۴). در این صورت قطر استوانه‌ی دوار باید حداقل برابر ۴۵ سانتی‌متر در نظر گرفته‌شود تا حرکت سقوط آزاد از ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری را برای همه‌ی ذرات درون استوانه فراهم کند.

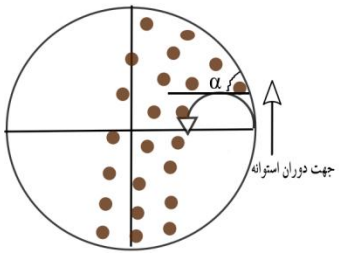


شکل ٤) : تعیین قطر استوانه‌ی دوار

تا اینجا قطر استوانه برابر ۴۵ سانتی‌متر برآورد شد ولی فاکتور سرعت دورانی که می‌تواند مواد را تا ارتفاع مورد نظر برساند نیاز به بررسی دارد که در قسمت‌های بعدی به این مسأ له پرداخته شده است.

٦-۲ بررسی حرکت مواد دراستوانه دوار و تطبیق معادلات حرکت مواد با معادلات انرژی

تا کنون شعاع لازم برای حرکت سقوط آزاد ذرات درون سرند بررسی شد ولی در واقع حرکت ذرات و کلوخه‌های درون استوانه‌ی دوار سقوط آزاد در خط مستقیم نیست بلکه مواد در اثر یک نیروی اولیه که از جانب جداره‌ی استوانه‌ی دوار به آنها وارد می‌شود مطابق شکل ۵ مسیرهای منحنی یک حرکت پرتابی را طی می کنند.



شکل ٥): مسیر واقعی حرکت مواد درون استوانه‌ی دوار

با توجه به شکل ۵ و با در نظر گرفتن ارتفاع اوج ذرات که از رابطه‌ی $H=\frac{V^2\sin^2\alpha}{2g}$ بدست می‌آید، بیشینه‌ی ارتفاع در زاویه‌ی ۹۰ درجه اتفاق می افتد و می‌توان این گونه تعریف کرد که:

$$\lim_{\alpha \to 90^0} \frac{V^2 \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{V^2}{2g} = H_{max}$$

پس هر چقدر زاویه‌ی پرتاب (α) به ۹۰ درجه نزدیک تر شود یعنی شعاع انحنای استوانه و در نهایت خود استوانه بزرگتر شود ذرات می‌توانند تا ارتفاع بیشتری به سمت بالا پرتاب شوند که با توجه به نکات گفته شده این امر مطلوبی است. یعنی تا جایی که شرایط اجازه می‌دهد بهتر است قطر استوانه بیشتر در نظر گرفته‌شود از طرفی افزایش قطر استوانه باعث افزایش حجم کلی دستگاه، وزن دستگاه و افزایش هزینه‌ها می‌شود لذا برای طراحی استوانه باید به یک مصالحه‌ی منطقی بین متغیرها دست پیدا کرد.

با توجه به اینکه بهترین بازیابی (نسبت موادی که از منافذ سرند عبور کرده‌اند به کل موادی که می‌توانند از منافذ سرند عبور کنند) در سرندهای دوار در سرعتی بدست می‌آید که بار درون سرند تا ارتفاعی معادل دوسوم قطر استوانه بالا برده شود (عابدینی طرقبه و همکاران، ۱۳۹۱)، اگر در سرند ورمی‌کمپوست، بار تا ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری بالا برده‌شود (ارتفاع لازم جهت متلاشی شدن کلوخه‌ها) قطر مورد نیاز برای استوانه‌برابر ۵۲/۵ سانتی‌متر است. حال باید بررسی شود که آیا مواد کلوخه‌ای ورمی‌کمپوست که با حرکت پرتابی (مطابق شکل ۵) درون سرند با معادله‌ی مسیر($y = \frac{-g x^2}{2v^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha$) حرکت می‌کنند (هالیدی و همکاران، ۱۹۹۲) متلاشی می‌شوند یا خیر؟ با توجه به اینکه زاویه‌ی پرتاب مواد در این حرکت نا مشخص است و به عواملی نظیر نیروی وارد به ذرات، شعاع انحنای سرند، شکل هندسی ذرات ورمی‌کمپوست، ابعاد ذرات، موقعیت ذرات نسبت به هم و ... بستگی دارد، بررسی مسیر حرکت ذرات با پیچیدگی‌های زیادی روبرو می‌شود. لذا ساده‌تر این است که میزان انرژی ذرات و کلوخه‌ها، هم در حرکت سقوط آزاد و هم در حرکت درون سرند ارزیابی شود. در ابتدا حرکت سقوط آزاد کلوخه بررسی می‌شود. برای اینکه در محاسبات بحرانی‌ترین شرایط لحاظ شود با توجه به جدول ۱ وزن کلوخه ۷۰ گرم و ارتفاع سقوط کلوخه ۳۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای محاسبه‌ی سرعت و انرژی کلوخه در انتهای مسیر سقوط از رابطه‌ی زیر (مسیر حرکت سقوط آزاد) استفاده شد (پاشایی و همکاران، ۱۳۸۱):

$$y = \frac{1}{2} g t^2 + V_0 t + y_0$$

در اصل ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری حداقل ارتفاعی درنظر گرفته شد که مواد درون استوانه باید به این ارتفاع برسند تا محتویات کلوخه‌ای درون آنها فرو پاشیده شود. با توجه به اینکه سرعت اولیه‌ی کلوخه صفراست، تنها مجهول این معادله زمان (t) است و داریم:

$$0.35 = \frac{1}{2} 9.8\, t^2 \rightarrow t^2 = 0.0714 \rightarrow t = 0.2672\ S$$

پس مدت زمانی که طول میکشد تا کلوخه مسیر ۳۵ سانتی‌متری سقوط را طی کند۰,۲۶۷۲ ثانیه است برای بدست آوردن سرعت کلوخه در انتهای سقوط داریم:

$$V = g\,t + V_0 \rightarrow V = 9.8\times0.2672 = 2.618\ \frac{m}{s}$$

با داشتن سرعت کلوخه طبق رابطه‌ی ذیل مقدار انرژی کلوخه در هنگام متلاشی شدن برابر است با:

$$K = \frac{1}{2}\,m\,V^2$$

$$K = \frac{1}{2}\times0.07\times(2.618)^2$$

$$K = 0.24\ j$$

در اصل ۰/۲۴ ژول انرژی، حداقل انرژی لازم برای خرد شدن کلوخه است و برای حصول اطمینان از خرد شدن کلوخه‌ها باید متغیرهای دخیل در طراحی به گونه‌ای محاسبه شوند که محتوای انرژی مواد کلوخه‌ای درون سرند را به مقداری بیش از ۰/۲۴ ژول برسانند. (نکته: با توجه به اینکه در فرایند طراحی استوانه‌ی دوار، از میان متغیرهای مؤثر در محاسبات، اندازه‌ی دو متغیر شعاع و سرعت استوانه قابل تغییر توسط طراح می‌باشند، بنابر این معادلات مربوطه باید به گونه‌ای طرح شوند که مقادیر بهینه برای سرعت و شعاع استوانه به دست آید).

با توجه به محتوای انرژی کلوخه‌ای که از ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری رها می‌شود (کلوخه‌ی۱) در هنگام برخورد با زمین که برابر ۰/۲۴ ژول محاسبه شد، کلوخه‌ای که درون سرند تا ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر بالا آورده می‌شود (کلوخه‌ی ۲) نیز باید دارای معادل همین مقدار انرژی پتانسیل باشد که اگر با استفاده از رابطه‌ی ذیل انرژی پتانسیل آن را محاسبه کنیم داریم:

$$U = m\,g\,h = 0.07\times9.8\times0.35 = 0.24\ j$$

اما تفاوت بین کلوخه‌ی ۱ و کلوخه‌ی ۲ در این است که کلوخه‌ی۱ با سرعت اولیه‌ی صفر از ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری رها می‌شود ولی کلوخه‌ی ۲ هنگامی که به ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری می‌رسد با سرعتی معادل سرعت دورانی سرند در حرکت است یعنی علاوه بر ۰/۲۴ ژول انرژی پتانسیل، حاوی مقداری انرژی جنبشی نیز هست (که در سمت راست رابطه‌ی ۱ مشهود است) و این همان میزان انرژی لازم برای حصول اطمینان از خرد شدن کلوخه است. بنابر این محتوای انرژی کلوخه‌ی ۲ برابر است با:

$$E = m\,g\,h + \frac{1}{2}\,m\,V^2 = 0.24 + (0.035\,V^2) \qquad \text{(رابطه‌ی ۱)}$$

اگر سرعت دورانی استوانه (n: تعداد دور بر دقیقه) تبدیل به سرعت خطی (متر بر ثانیه) شود رابطه به این صورت در می‌آید:

$$V = \frac{2n\pi r}{60}$$

$$E = m\ g\ h + \frac{1}{2}m(\frac{(2n\pi r)^2}{3600})$$

$$E - m\ g\ h = m\ (\frac{n^2\ \pi^2\ r^2}{1800}) \qquad \text{(رابطه‌ی ۲)}$$

این رابطه را به طور خاص در مورد کلوخه‌ی ورمی‌کمپوست تولید شده در این تحقیق می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$E = 0.24 + (0.035\ (\frac{(2n\pi r)^2}{3600})) \qquad \text{(رابطه‌ی ۳)}$$

در رابطه‌ی فوق ($E - m\ g\ h$) اختلاف انرژی بین کلوخه‌ای است که درون استوانه با سرعت ثابت خاصی به ارتفاع مورد نظر می‌رسد با کلوخه‌ای که در ارتفاع مورد نظر به صورت ثابت قرار دارد. از طرفی در مورد کلوخه‌های ورمی‌کمپوست همان انرژی mgh برای فروپاشی کلوخه‌ها کافی است لذا اگر هدف خرد شدن کلوخه‌ها باشد با توجه به رابطه‌ی فوق می‌توان با کمینه کردن این اختلاف انرژی که یا به وسیله‌ی کم کردن شعاع استوانه و یا با کم کردن سرعت دورانی دستگاه حاصل می‌شود به یک حد بهینه برای این دو متغیر دست یافت. برای روشن تر شدن این موضوع می‌توان معادله‌ی فوق را بر اساس شعاع استوانه و یا براساس سرعت دورانی دستگاه به صورت ذیل تعریف کرد:

$$r = \sqrt{\frac{1800(E-mgh)}{m\ n^2\pi^2}} \qquad \text{(رابطه‌ی ۴)}$$

$$n = \sqrt{\frac{1800(E-mgh)}{m\ r^2\pi^2}} \qquad \text{(رابطه‌ی ۵)}$$

برای بررسی روابط بدست آمده در مورد استوانه‌ی دوار لازم است سرعت بحرانی تعریف شود، سرعت بحرانی، سرعت دورانی است که دراین سرعت مواد درون استوانه‌ی سرند دوار در اثر نیروی گریز از مرکز (F) به جداره استوانه می‌چسبند و عملیات جداسازی با مشکل مواجه می‌شود. بدین منظور سرعت بحرانی برای استوانه‌ی مورد بحث که قطر آن تا کنون ۵۲ سانتی‌متر درنظر گرفته شد طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می شود:

$$F = mg = \frac{mV^2}{r}$$

$$V_{\text{بحرانی}} = \frac{2n\pi r}{60} = \sqrt{r \times g}$$

$$n = \frac{30\sqrt{r\,g}}{\pi r}$$

$n = 58.6$ دور بر دقیقه

با توجه به روابط فوق این نکته برداشت می‌شود که با افزایش شعاع، سرعت بحرانی کاهش می‌یابد چرا که با افزایش شعاع، صورت کسر با توان یک دوم رشد میکند و مخرج با توان یک بنابر این هرچقدر قطر استوانه کوچک‌تر شود سرعت بحرانی آن افزایش می‌یابد و هر چقدر استوانه بزرگ‌تر شود سرعت بحرانی آن کاهش می‌یابد. بنا بر این در کل می‌توان این نتیجه را گرفت که استوانه‌ای با قطر بزرگتر باید در سرعت دورانی کمتری کار کند و استوانه‌ی کوچک‌تر در سرعت بیشتر.

نتایج و بحث

تا اینجا سرعت بحرانی استوانه‌ی مورد نظر محاسبه شد بنا بر این اگراستوانه با سرعت (ε − ۵۸/۶) بچرخد مواد درون آن (کلوخه) از بالاترین ارتفاع (۵۲ سانتی‌متری) سقوط می‌کند، چرا که نیروی وزن در بالاترین ارتفاع بر نیروی گریز از مرکز غلبه می‌کند. اما این سرعت مطلوب نیست و باعث اتلاف انرژی می‌شود چون طبق برآورد انجام شده میزان سرعتی که منجر به رسیدن کلوخه تا ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری می‌شود انرژی لازم برای فروپاشی کلوخه را فراهم می‌کند. لذا دراین تحقیق برای حصول اطمینان از فروپاشی کلوخه سعی شد یک سرعت بهینه در بازه‌ای ما بین سرعت بحرانی و حداقل سرعتی که کلوخه را تا ارتفاع ۳۵ سانتی-متری بالا می‌آورد (حداقل سرعت دورانی که می تواند سطح انرژی کلوخه را به اندازه‌ی سطح انرژی کلوخه‌ی۱ برساند) ارزیابی شود. به منظور بدست آوردن حداقل سرعت دورانی که می تواند سطح انرژی کلوخه را به اندازه‌ی سطح انرژی کلوخه‌ی۱ برساند، نمی‌توان سرعت لحظه‌ی برخورد کلوخه با زمین را مد نظر گرفت چرا که در سقوط آزاد سرعت با شتاب g به طور مداوم در حال تغییر است و کلوخه‌ی۱ درهنگام برخورد به زمین دارای ماکزیمم سرعت است ولی سرعت دورانی سرند یک سرعت ثابت و بدون شتاب است از این رو می‌بایست میانگین سرعت سقوط آزاد محاسبه شود چرا که با محاسبه‌ی سرعت میانگین، تاثیر شتاب در حرکت حذف شده و یک سرعت ثابت به دست می‌آید بدین منظور می‌بایست فاصله‌ی ۳۵ سانتی‌متری بر مدت زمان سقوط تقسیم شود:

$$\frac{0.35}{0.2672} = 1.3\ \frac{m}{s}$$

با تبدیل این سرعت به سرعت دورانی برای استوانه‌ی مورد بحث، سرعت ۴۷/۸ دور بر دقیقه بدست می‌آید. بدین ترتیب باید یک سرعت بهینه مابین ۴۷ تا ۵۹ دور بر دقیقه برای سرند نظر گرفته شود. به طور مثال اگر سرعت ۵۰ دور بر دقیقه در رابطه‌ی ۱ اعمال شود:

$$E = 0.24 + 0.035\,\frac{(2\times50\times3.14\times0.26)^2}{3600} = 0.3047\ j$$

انرژی بدست آمده برابر است با مقدار انرژی پتانسیل کلوخه در نقطه‌ی اوج که ارتفاع این نقطه را بوسیله‌ی رابطه‌ی ذیل می‌توان محاسبه کرد:

$$0.3047 = m\,g\,h = 0.07\times9.8\times h \rightarrow h = 0.44\ m$$

یعنی کلوخه تا ارتفاع ۴۴ سانتی متری بالا رفته است (۹ سانتی‌متر از حداقل ارتفاع لازم بالاتر) به این ترتیب می‌توان زاویه‌ی حرکت پرتابی کلوخه را با استفاده از رابطه‌ی نقطه‌ی اوج در حرکت پرتابی محاسبه کرد (هالیدی و همکاران، ۱۹۹۲):

$$h_{max} = \frac{V^2\sin^2\alpha}{2g} \qquad \text{(رابطه‌ی۶)}$$

$$0.09 = \frac{1.85\times\sin^2\alpha}{19.6}$$

$$\sin^2\alpha = 0.953$$

$$\sin\alpha = .0976$$

$$\alpha = 77.5^{\,0}$$

کلوخه‌ی مورد نظر تحت این شرایط با زاویه‌ی ۷۷/۵ درجه پرتاب شده است. با توجه به این نکته که بیشترین برد حرکت پرتابی در زاویه‌ی ۴۵ درجه اتفاق می‌افتد (پاشایی و همکاران، ۱۹۹۲)، هرچقدر زاویه‌ی حرکت مواد درون سرند به ۴۵ درجه نزدیک تر شود پاشش مواد به نقاط دور تر میسر شده، فضای بیشتری از سرند مورد استفاده قرار می‌گیرد و از تجمع مواد در ربع اول استوانه جلوگیری می‌شود. پس سرعت در معادلعه‌ی انرژی (رابطه‌ی ۳-۲) باید به حدی رسانده شود که ارتفاع اوج بدست آمده در آن سرعت باعث شود $\sin\alpha$ در رابطه‌ی ۳-۴ برابر با ۰/۷۰۷ شود ($\sin 45^0 = 0.707$). چون تمامی پارامترها در روابط ۳-۱ تا ۳-۴ دارای مقادیر مشخصی می‌باشند لذا برای طراحی استوانه، اندازه‌ی دو پارامتر شعاع استوانه (r) و سرعت دورانی (n) می‌توانند تغییر داده‌شوند. با استفاده از نرم افزار اکسل شعاع استوانه با فواصلی به اندازه‌ی ۰/۰۰۵ متر افزوده شد و در هر سطح سرعت و شعاعی که زاویه‌ی پرتاب را به ۴۵ درجه می‌رساند محاسبه شد که نتایج در جدول ۳-۵ نشان داده شده است.

جدول ۳- ۵): تعیین مقادیر بهینه‌ی شعاع استوانه و سرعت دورانی

n (rpm)	r (m)	v (m/s)
47	0.26	1.279027
47.5	0.265	1.317492
48	0.27	1.35648
48.5	0.275	1.395992
49	0.28	1.436027
49.5	0.285	1.476585
50	0.29	1.517667
50.5	0.295	1.559272
51	0.3	1.6014
51.5	0.305	1.644052
52	0.31	1.687227
52.5	0.315	1.730925
53	0.32	1.775147
53.5	0.325	1.819892
54	0.33	1.86516
54.5	0.335	1.910952
55	0.34	1.957267
55.5	0.345	2.004105
56	0.35	2.051467

جدول ۳-۵ نشان دهنده‌ی مقدار بهینه‌ی سرعت دورانی و شعاع بهینه برای سرند دوار است. سازنده‌ی دستگاه می‌تواند اندازه‌ی مناسب سرند دوار را با توجه به اندازه و حجم تولید مزرعه‌ی ورمی‌کمپوست انتخاب نموده و شرایط بهینه‌ی کاری را با توجه به جدول ۳-۵ در دستور کار خود قرار دهد.

نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که حد اکثر ارتفاع لازم جهت سقوط و خرد شدن کلوخه‌های ورمی کمپوست که برابر ۳۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و با بررسی حرکت مواد درون سرند و نیز با ارزیابی میزان انرژی لازم برای فروپاشی کلوخه‌ها حداقل قطر لازم جهت ساخت استوانه‌ی دوار سرند ورمی‌کمپوست ۵۲ سانتی‌متر برآورد شد و نیز جدول ۳ برای انتخاب اندازه‌ی قطر استوانه‌دوار و سرعت متناسب با هر قطر حاصل شد. به طور مثال مطابق جدول یک سرند با استوانه ای به شعاع ۳۵ سانتی متر (قطر ۷۰ سانتی متر) می بایست در سرعت ۵۶ دور بر دقیقه کار کند، اکبری دیزجی و سیاه منصوری (۱۳۹۲) با نتایج حاصل از آزمایشات عملی سرعت بهینه برای سرند ورمی کمپوست به قطر ۷۰ سانتی متر را ۵۰ دور بر دقیقه ذکر کردند که این امر نشان دهنده ی انطباق قابل قبول نتایج نظری این پژوهش با نتایج عملی تحقیقات پیشین است.

منابع

پاشایی راد ج. خرمی م. بهاری م. ۱۳۸۱. فیزیک (ویراست چهارم). مرکز نشر دانشگاهی. تهران. ۳۵۸ صفحه.

اکبری دیزجی ح. سیاه منصوری ا. ۱۳۹۲. طراحی و ساخت دستگاه جداساز کرم از ورمی‌کمپوست. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون. بهمن ۱۳۹۲. دانشگاه فردوسی مشهد.

عابدینی طرقبه ج. آدینه نیا ع. علیزاده م. اوغازیان ع. اسماعیل‌زاده ح. ۱۳۹۱. بررسی انواع سرندهای مورد استفاده در سیستم‌های پردازش و تولید کمپوست با دیدگاه بهینه‌سازی. ششمین همایش ملی و اولین همایش بین‌المللی مدیریت پسماند. تهران.

عباسی ن. ارزانش م.ح. ۱۳۹۰. ورمی کمپوست از تولید تا مصرف.www.faravarshomag.ir.

علیخانی ح. ۱۳۸۵. پرورش کرم‌های مولد ورمی کمپوست و کشاورزی پایدار. آییژ. تهران. ۱۶۴صفحه.

Clive A.E. Norman Q.A. Rhonda L.S. 2010. Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental management. CRC Press.623p.

Edwards C.A. 2004. Earthworm Ecology. Boca Raton. Second revised edition. CRC Press. p 327-354.

Gupta P.K. 2003. Why vermicomposting? In: Vermicomposting for sustainable agriculture. Agro House Jodhpur. p 14-25

Halliday D. Walker J. Resnick R. 2010. Fundamentals of Physics. John Wiley & Sons.1328 p..

Ismail S.H. Joshi p. Grace A. 2003. The waste in your dustbin is scarring the environment. The technology of composting. Advancedbiotech (II): 30-34.

Joseph M.I. 1998. ASAE Standards S269.4 Cubes, Pellets and Crumbles-Definitions and Methods for Determining Density, Durability and Moisture Content ASAE DEC96. Standard S358.2 Moisture Measurement-forages. ASAE, St.

Stroshine R. 2004. Physical properties of agricultural materials and food products. R.Stroshine. 296 p.