

طراحی، ساخت و ارزیابی جداکننده گردابی آزمایشگاهی برای جداسازی سنگ‌ریزه از کاه گندم

فرهنگ سردارپور^۱، سید حسین کارپرور فرد^{۲*}، ناصر رضوی‌زاده^۳ و ملیکا باغویی^۱

چکیده

ماشینی کردن و بهبود عملیات کشاورزی به دلیل رفع نیازهای گوناگون و رو به رشد بشر از دیرباز مورد توجه متخصصان بوده است. یکی از فرآیندها در تولید محصولات کشاورزی، عملیات پس از برداشت است. در زمینه جابجایی و انتقال کاه به روش ماشینی، از دستگاه مکنده کاه (کاه جمع‌کن) استفاده می‌شود. در حین انجام این عملیات، احتمال مخلوط شدن سنگ‌ریزه و ذرات دیگر، از روی زمین به همراه کاه وجود دارد. این ذرات در نهایت موجب کاهش کیفیت کاه برداشت شده می‌گردد. در این پژوهش برای رفع چالش ذکر شده اقدام به ساخت و ارزیابی یک جداکننده گردابی آزمایشگاهی شد. نتایج این پژوهش بر پایه آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گردید. میزان باز بودن دهانه ورودی در سه نسبت (۱، ۰/۶ و ۰/۳)، استوانه خروجی در دو موقعیت ارتفاع (صفر و ۱۵ سانتی‌متر) و در دو دور مکنده (۲۵۷۴ و ۲۸۶۰ دور بر دقیقه) برای چهار نسبت مخلوط سنگ‌ریزه به کاه (۳/۵، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) در نظر گرفته شد. با انجام سه تکرار برای هر یک از آزمایش‌ها، در مجموع ۱۴۴ داده به دست آمد. عملکرد گرداب توسط محاسبه دو بازده میزان جداسازی سنگ‌ریزه از مخلوط و میزان جداسازی کاه از مخلوط به صورت جداگانه تعیین گردید. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین مقادیر حاصل شده با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد به کمک نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که مؤثرترین عامل در بازدهی جداسازی سنگ‌ریزه و کاه مربوط به میزان باز بودن دهانه ورودی گرداب است. همچنین برای دور مکنده، بیش‌ترین بازده جداسازی سنگ‌ریزه و کاه مربوط به ۲۸۶۰ دور بر دقیقه و برای موقعیت استوانه خروجی در وضعیت صفر است. همچنین عملکرد گرداب برای سنگ‌ریزه و کاه به ترتیب در نسبت‌های جرمی ۳/۵٪ و ۵٪ بیشینه بود.

واژه‌های کلیدی: انتقال کاه، گرداب آزمایشگاهی، دستگاه مکنده، مخلوط کاه و سنگ‌ریزه.

ارجاع: سردارپور ف. کارپرور فرد. س. ح. رضوی‌زاده. ن. و باغویی. م. ۱۴۰۳. طراحی، ساخت و ارزیابی جداکننده گردابی آزمایشگاهی برای جداسازی سنگ‌ریزه از کاه گندم. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۱: ۸۷-۱۰۰. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14621.689>

۱- دانشجوی آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۳- دانشجوی آموخته دکتری گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

* نویسنده مسئول: karparvr@shirazu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۷

مقدمه

بقایای گیاهی و سایر فرآورده‌های جانبی کشاورزی که زمانی به عنوان ضایعات دسته‌بندی می‌شدند، امروزه بخش مهم غذای دام در بسیاری از کشورهای در حال توسعه را تشکیل می‌دهند (Kumar *et al.*, 2017). در اکثر کشورهای جهان، گندم به عنوان یکی از اصلی‌ترین مواد غذایی شناخته می‌شود. کاه، مجموع ساقه و برگ خرد شده حبوبات و غلات است. به تعریف دیگر هر آنچه پس از کوبش و جدایش دانه گیاهان تیره حبوبات و غلات به جا می‌ماند، کاه نامیده می‌شود (Naserian, 1987). علاوه بر این کاه گندم در صنعت کاغذسازی، بسته‌بندی و در کشاورزی به صورت مالچ گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Iskhalieva *et al.*, 2012). برای تهیه کاه گندم، از دستگاه‌های کوبنده ثابت و متحرک با طرح‌های مختلف استفاده می‌شود (Kumar *et al.*, 2017). در راستای ماشینی شدن انتقال کاه به انبار در ایران نیز تلاش‌های زیادی از سوی شرکت‌های داخلی صورت گرفته و پیشرفت‌هایی در زمینه تولید دستگاه‌های مکنده کاه حاصل شده است.

مکنده کاه یا کاه جمع‌کن دستگاهی است که نیروی خود را از محور تواندهی تراکتور یا موتورهای برقی می‌گیرد و با استفاده از لوله انعطاف‌پذیر، کاه را از روی زمین مکش کرده و به داخل انبار منتقل می‌کند. انواع مختلف این مکنده‌ها عبارتند از: مکنده کاه با پروانه افقی، مکنده کاه با پروانه عمودی، مکنده کاه کیسه‌زن غبارگیر، مکنده کاه مخزن‌دار و مکنده کاه برقی.

در حین عملیات جمع‌آوری و انتقال کاه به وسیله دستگاه مکنده، احتمال ورود سنگریزه و ذرات دیگر، از روی زمین به همراه کاه وجود دارد. این ذرات باعث کاهش کیفیت کاه، کاهش بازدهی تولید، شکسته شدن دندان دام، ایجاد بیماری‌های گوارشی و در نتیجه افزایش هزینه در پرورش دام می‌گردد. جداکننده گردابی (گرداب) وسیله‌ای برای جداسازی ذرات معلق در سیال است. اساس کار این نوع جداکننده برای جداسازی ذرات جامد، استفاده از نیروی گریز از مرکز است. نیروی گریز از مرکز باعث حرکت ذرات جامد در مسیری مارپیچ به سمت پایین می‌گردد. ذرات جمع شده پایین مخروطی از لوله خروجی خارج شده و این در حالی است که حرکت محوری سیال به سمت بالا به صورت معکوس از لوله

استوانه خروج به سمت مخزن جمع‌آوری کننده خارج می‌گردد.

مطالعات بر روی طراحی ورودی و هندسه‌ی آن بر عملکرد گرداب از مواردی است که به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال؛ پژوهش محاسباتی (Elsayed & Lacor, 2010) نشان داد که تغییر عرض ورودی (به ویژه بر روی بازدهی جداسازی) تأثیر بیشتری از تغییرات طول ورودی بر جداسازی مخلوط در گرداب می‌گذارد. آن‌ها متوجه شدند که برهم‌کنش‌های قوی بین نسبت ابعاد ورودی و قطر استوانه خروج وجود دارد. همچنین دریافتند که چهار عامل ارتفاع کل گرداب، ارتفاع ورودی، عرض ورودی و قطر استوانه خروج تأثیر قابل توجهی بر روی عملکرد گرداب دارد (Elsayed & Lacor, 2010). در پژوهش‌های دیگری محققین تأثیر طول موقعیت قرارگیری لوله خروجی و قطرهای متفاوت استوانه آن را به روش شبیه‌سازی جریان داخل گرداب، مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند این فراسنجه‌ها نقش مؤثری در افت فشار و بازده جداسازی ذرات دارند (Elsayed & Lacor, 2013; Wei *et al.*, 2020; Wasilewski *et al.*, 2020). در این پژوهش با استفاده از سامانه مکنده انتقال مواد و استفاده از گرداب در مسیر مکش، میزان جداسازی سنگریزه از کاه گندم، مورد بررسی قرار گرفت.

گرداب‌های موجود در کارخانه‌های بوجاری و صنعت به صورت دو حالتی (محصول و گرد و خاک - سیال) در نظر گرفته شده است. ولی تاکنون گردابی سه حالتی شامل دو ماده جامد به همراه حالت سیالی مورد ارزیابی و توجه قرار نگرفته است. لذا ضرورت ساخت این گرداب با توجه به صدماتی از قبیل (کاهش کیفیت کاه، کاهش بازدهی تولید، شکسته شدن دندان دام، ایجاد بیماری‌های گوارشی در دام و ...) است.

مواد و روش

طراحی و ساخت گرداب

هندسه گرداب مهم‌ترین فراسنجه‌ای است که عملکرد الگوی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در حالت کلی هفت فراسنجه هندسی برای گرداب‌ها تعریف می‌شود (Vaziri Naein Nejad, 2016). این فراسنجه‌ها عبارتند از: a: ارتفاع دهانه ورودی، b: عرض دهانه ورودی، L: طول

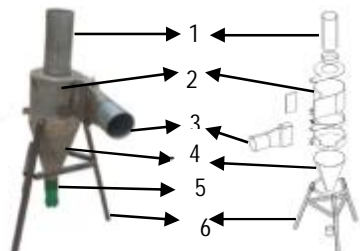
نسبت‌های درج شده در جدول ۱ و با در نظر گرفتن برخی ملاحظه‌ها و محدودیت‌های طراحی (قطر لوله مکش، ابعاد مکنده، دور مکنده، طول لوله مکش و ...)، ابعاد انتخابی گرداب آزمایشگاهی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- محدوده تغییرات نسبت ابعاد گرداب بر اساس قطر استوانه خروج (D_x=9.5 Cm)

ابعاد انتخابی برای ساخت (Cm)	D(Cm)	نسبت انتخابی بر اساس بازه نسبت D _x /D	فراسنجه‌ها
a=۱۵/۲	۱۹	۰/۵	a/D=۰/۷۵
b=۴/۶*	۱۲/۶	۰/۷۵	b/D=۰/۳۵
S=۱۵*	۱۹	۰/۵	S/D=۰/۸۵
h=۱۸*	۱۲/۶	۰/۷۵	h/D=۱/۵
L _c =۲۵/۲	۱۲/۶	۰/۷۵	L _c /D=۲
B _c =۴/۶	۱۲/۶	۰/۷۵	B _c /D=۰/۳۷

* اعداد انتخاب شده بر اساس محدودیت‌ها و ملاحظه‌های طراحی

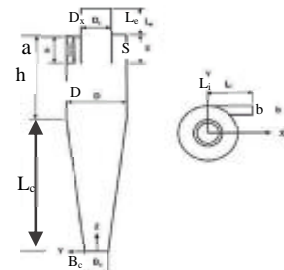
با توجه به جدول ۲، مناسب‌ترین مقدار عددی فراسنجه‌های مورد استفاده برای ساخت گرداب، انتخاب و نقشه گرداب مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks، نسخه ۲۰۱۸ طراحی گردید (شکل ۲).



شکل ۲- طرح‌واره گرداب طراحی شده در نرم‌افزار SolidWorks: ۱- استوانه خروجی ۲- بدنه استوانه‌ای ۳- لوله ورودی ۴- بدنه مخروطی ۵- ظرف جمع‌آوری سنگ‌ریزه ۶- شاسی نگهدارنده

بعد از اتمام شبیه‌سازی ساختار گرداب در محیط Sheet Metal نرم‌افزار SolidWorks، نقشه دوبعدی اجزای طراحی شده برای برش لیزری تهیه شد. جنس اجزای تشکیل‌دهنده گرداب از ورق آهن گالوانیزه با ضخامت ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد و بعد از انجام فرآیند برش‌کاری با لیزر، عملیات خم‌کاری و جوشکاری قطعات در کارگاه بخش مهندسی بیوسیستم دانشگاه شیراز انجام و قطعات مونتاژ گردید.

لوله ورودی، D_x: قطر استوانه خروجی، S: طول استوانه خروجی در داخل بدنه‌ی سیلندری، L_c: طول استوانه خروجی در خارج بدنه‌ی سیلندری، h: طول بدنه استوانه‌ای، L_c: ارتفاع بدنه‌ی مخروطی و B_c: قطر دهانه‌ی خروجی مخروطی. برای طراحی یک گرداب، محدوده تغییرات این فراسنجه‌ها متناسب با قطر داخلی گرداب (D) سنجیده می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- گرداب استاندارد Stairmand

در این پژوهش، یک گرداب طبق طراحی استاندارد Stairmand متناسب با نیاز کار انتخاب و ساخته شد. نسبت تغییرات این عوامل به قطر داخلی گرداب در جدول ۱ ارائه شده است (Siadaty et al., 2017).

جدول ۱- محدوده تغییرات نسبت ابعاد گرداب

محدوده تغییرات	نسبت ابعاد
۰/۷۵ تا ۰/۵	D _x /D
۰/۷۵ تا ۰/۵	a/D
۰/۳۵ تا ۰/۲	b/D
۰/۸۵ تا ۰/۵	S/D
۱/۷ تا ۱/۵	h/D
۲ تا ۲/۵	L _c /D
۰/۳۷ تا ۰/۴	B _c /D

باتوجه به این‌که قطر لوله خرطومی انتقال مواد ۱۰ سانتی‌متر بود، برای اتصال راحت‌تر لوله خرطومی به لوله استوانه خروج، لازم بود قطر استوانه خروج (D_x) کمتر از قطر لوله خرطومی باشد. به همین دلیل قطر استوانه خروج ۹/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای تعیین قطر بدنه (D)، با توجه به بازه نسبت D_x/D از جدول ۱ و مقدار عددی قطر استوانه خروجی، قطر بدنه معادل ۱۹ سانتی‌متر محاسبه شد. بقیه ابعاد گرداب نیز نسبت به قطر بدنه محاسبه شدند. لازم به ذکر است که با توجه به

۲۸۶۰rpm استفاده شد. برای انجام کار در محیط کارگاهی، لازم بود از یک مخزن برای ذخیره کاه بعد از جداسازی سنگریزه استفاده گردد. در ساخت مخزن از دو عدد مخزن گالوانیزه ۵۰۰ لیتری به هم جوش داده شده، استفاده گردید. به منظور جابجایی کاه توسط مکنده، از یک لوله‌ی خرطومی سیمی از جنس PVC قابل انعطاف با قطر ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد (شکل ۳). برای پیش سرعت ورودی هوا از یک اینورتر (Sanyu, model: SY8600, China) با بسامد متغیر استفاده می‌شد. این دستگاه دارای ورودی تک حالت و خروجی سه حالت بود که به موتور برقی متصل می‌شد و قادر به تأمین سرعت‌های مختلف و بسامدهای ۴۵ و ۵۰ هرتز مورد نظر بود. در بسامد ۵۰ هرتز دور مکنده ۲۸۶۰rpm و در بسامد ۴۵ هرتز دور مکنده ۲۵۷۴ rpm است. برای توزین مقدار کاه و سنگریزه از یک ترازو رقمی با ظرفیت ۴۰ کیلوگرم (ZDF, China) با دقت ± 1 گرم استفاده شد. سنگریزه‌های مورد استفاده در این پژوهش از نوع ماسه‌ای بودند. به دلیل محدودیت دستگاه مکنده و ابعاد گرداب، نباید اندازه سنگریزه‌ها از حد خاصی درشت‌تر یا ریزتر می‌شد. در نتیجه اندازه تقریبی سنگریزه‌ها در محدوده ۶/۵ تا ۱۰ میلی‌متر انتخاب شد.



شکل ۳- سامانه جداکننده گردابی مورد استفاده در پژوهش

با توجه به اهداف پیش‌بینی شده در این پژوهش، آزمایش‌ها به شیوه زیر انجام گرفت. به دلیل اینکه در شرایط مزرعه‌ای کاه توسط کمباین روی زمین ریخته

استوانه خروجی، قطعه‌ای جداشونده است که دارای مقطع دایره‌ای در دو انتها بوده و در بالای بدنه استوانه‌ای قرار می‌گیرد. قطر آن با قطر لوله ورودی برابر بوده و با قابلیت تغییر موقعیت ارتفاع در قسمت دهانه خروجی نقش اساسی در ایجاد طول گردابه و جداسازی سنگریزه از کاه را به عهده دارد. تغییر موقعیت استوانه خروجی نسبت به بدنه استوانه‌ای گرداب، به صورت تلسکوپی انجام می‌شد.

بدنه‌ی استوانه‌ای قسمتی است که سایر قطعات به آن متصل می‌گردد. این قطعه شامل دهانه ورودی، دهانه خروجی و از پایین محل اتصال به بدنه‌ی مخروطی گرداب به صورت کشویی بود که نقش اصلی در تشکیل گردابه را بر عهده داشت. لوله ورودی به‌عنوان رابط بین بدنه سیکلونی و لوله مکش خرطومی در نظر گرفته شد. این لوله از سمت بدنه سیکلونی دارای سطح مقطع مستطیلی و به جهت اتصال به لوله خرطومی دارای سطح مقطع دایره‌ای بود. لازم به ذکر است که سطوح یاد شده یکسان در نظر گرفته شده است. ساختار آن به گونه‌ای بود که جریان مواد ورودی را از مقطع دایره‌ای عبور داده و از مقطع مستطیلی به بدنه استوانه‌ای گرداب منتقل می‌کرد. در این قطعه با استفاده از صفحه‌ای کشویی در بخش مستطیلی لوله ورودی، دبی جریان مواد ورودی به داخل گرداب تغییر داده می‌شد. محدوده این تغییرات به ترتیب برای ورودی کاملاً باز، ۰/۶ و وضعیت کاملاً باز و ۰/۳ وضعیت کاملاً باز از قسمت پایین سطح مقطع مستطیلی در نظر گرفته شد.

بدنه‌ی مخروطی گرداب، قطعه‌ای جداشونده است که زیر بدنه استوانه‌ای سوار می‌شود و نقش اصلی آن انداختن و هدایت سنگریزه به خروجی مخروطی بود. ظرف جمع‌آوری سنگریزه به انتهای بدنه‌ی مخروطی نصب می‌شد. به منظور بر هم زدن جریان گردابی داخل مخروطی و جلوگیری از سقوط کاه، با آزمون و خطا ۶ عدد سوراخ به قطر ۳ میلی‌متر در اطراف قسمت پایینی آن ایجاد شد. سوراخ‌های ایجاد شده، هوا را از پایین مخروطی به داخل گرداب نفوذ داده و باعث جدایش سنگریزه از کاه می‌شدند.

برای تأمین جریان هوا از مکنده‌ای (ساخت شرکت شیراز فن، ایران) مجهز به موتور برقی سه حالت با توان ۳ کیلو وات (ساخت شرکت موتوژن تبریز، ایران) با

خروجی در بدنه‌ی استوانه‌ای گرداب در دو سطح (۰ و ۱۵ سانتی‌متر) و نسبت مقدار سنگ‌ریزه به کاه در چهار سطح (۳/۵٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) مورد بررسی قرار گرفت. بعد از انجام هر آزمایش مقادیر وزن کل مواد، وزن مواد به جامانده در سطل (سنگ‌ریزه و کاه)، وزن مواد منتقل شده به مخزن (سنگ‌ریزه و کاه)، وزن سنگ‌ریزه جدا شده در ظرف جمع‌آوری سنگ‌ریزه، بازدهی جداسازی سنگ‌ریزه، بازدهی جداسازی کاه و میانگین کل مقادیر به دست آمده به ازای سه تکرار برای هر آزمایش در جدول داده‌برداری به ثبت رسید و نتایج حاصل از جدول شامل ۱۴۴ آزمایش گزارش شد.

نتایج و بحث

نتیجه حاصل از تجزیه واریانس کل داده‌ها برای بازده جداسازی سنگ‌ریزه و کاه مکیده شده به داخل مخزن برای چهار نسبت سنگ‌ریزه به کاه در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول به ازای هر نسبت مشخص شده، اثر مؤلفه‌های میزان باز بودن دهانه ورودی (I)، دور مکنده (N) و موقعیت استوانه خروج (S) به صورت مجزا و اثر متقابل آن‌ها بر یکدیگر مقایسه شد.

با توجه به این جدول اثر تغییرات دهانه ورودی، دور مکنده و طول استوانه خروج در همه نسبت‌ها هم برای سنگ‌ریزه و هم برای کاه در سطح احتمال ۵٪ به جز اثر موقعیت استوانه خروج در نسبت ۱۰٪ برای کاه، معنادار شده است. اثرات متقابل دوتایی و سه‌تایی در سطح احتمال ۵٪ نیز در جدول ۳ مشاهده می‌گردد.

اثر تغییرات دهانه ورودی بر بازدهی جداسازی

سنگ‌ریزه و کاه از مخلوط

شکل ۴ اثر تغییرات دهانه ورودی بر بازدهی جداسازی سنگ‌ریزه و کاه از مخلوط به ازای هر چهار نسبت را نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان گفت در مورد سنگ‌ریزه اثر تغییرات دهانه ورودی، بر بازدهی جداسازی در هر نسبت مشهودتر از کاه است که این امر می‌تواند ناشی از اختلاف زیاد چگالی (حدود ۲۰ برابر) این دو ماده (سنگ‌ریزه و کاه) تلقی شود. کاهش در حجم مخلوط مواد ورودی سنگ ریزه و کاه، منجر به کاهش بازده در ورودی ۰/۳ کاملاً باز برای مخلوط در هر چهار نسبت می‌شود. در نتیجه با مقایسه بین کاه و سنگ‌ریزه، کاهش چشم‌گیری

می‌شود و در روش ماشینی توسط تراکتور و مکنده به انبار منتقل می‌گردد، لذا نسبت جرمی مخلوط متغیر است. بنابراین، در این پژوهش دامنه‌ای از نسبت‌های اختلاط کاه و سنگ‌ریزه در چهار سطح ۳/۵٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ (به ترتیب ۷۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ گرم سنگ‌ریزه در ۲۰۰۰ گرم کاه) تهیه شد. در هر آزمایش موقعیت استوانه خروج و میزان باز بودن ورودی تنظیم می‌شدند. سپس دور مکنده به ازای یکی از دو مقادیر ۲۵۷۴ و ۲۸۶۰ دور بر دقیقه انتخاب شده و مخلوط کاه و سنگ‌ریزه به وسیله لوله ورودی، وارد گرداب می‌گردید. به منظور ارزیابی بازده عملکرد گرداب در جداسازی سنگ‌ریزه و کاه از مخلوط از معادلات (۱) و (۲) استفاده شد (Brar et al., 2015).

$$\eta_g = \frac{(m_g)_S}{(m_g)_T} \quad (1)$$

در این معادله:

$(m_g)_S$: جرم سنگ‌ریزه جدا شده توسط گرداب و

$(m_g)_T$: جرم کل سنگ‌ریزه موجود در مخلوط است.

جهت محاسبه بازده گرداب در جداسازی کاه از مخلوط، بازده جداسازی کاه به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\eta_s = \frac{(m_s)_S}{(m_s)_T} \quad (2)$$

در این معادله:

$(m_s)_S$: جرم کاه جدا شده توسط گرداب و $(m_s)_T$:

جرم کل کاه موجود در مخلوط است.

کاوش داده‌ها

داده‌های به دست آمده بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل میزان باز بودن دهانه ورودی (I)، دور مکنده (N) و وضعیت استوانه خروج (S) برای چهار نسبت سنگ‌ریزه به کاه (۳/۵٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) با سه تکرار کاوش شدند. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین عوامل با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد به کمک نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ مورد مقایسه قرار گرفت و نمودارها با نرم‌افزار EXCEL (نسخه ۲۰۱۶) ترسیم شدند.

همان‌گونه که گفته شد در این پژوهش، میزان باز بودن دهانه ورودی گرداب در سه سطح (۱) ورودی کاملاً باز، ۰/۶ کاملاً باز و ۰/۳ کاملاً باز، دور مکنده در دو سطح (۲۵۷۴ و ۲۸۶۰ دور بر دقیقه)، وضعیت استقرار استوانه

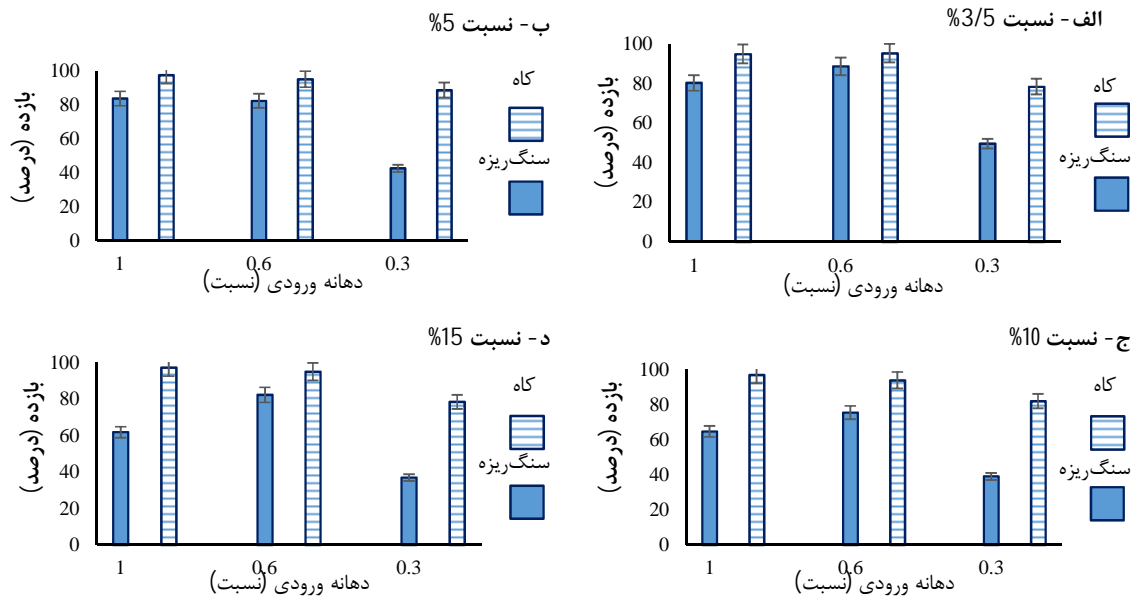
ورودی نسبت به وضعیت ۰/۳ کاملاً باز دهانه ورودی تلقی شود. از طرفی با افزایش سطح دهانه‌ی ورودی کاملاً باز، حجم بیشتری از سنگریزه صرف‌نظر از موقعیت استقرار استوانه‌ی خروجی، به طرف مخزن کاه مکیده می‌شود، لذا بازده جدایش سنگریزه از کاه در مخلوط با توجه به تغییر چگالی این دو ماده کاهش یافته است.

در بازده جدایش برای سنگریزه در این وضعیت از دهانه، کاملاً مشخص است. با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌گردد که بازده جدایش سنگریزه و کاه به ازای دو دهانه کاملاً باز و ۰/۶ کاملاً باز، برای هر چهار نسبت مخلوط دارای تفاوت معناداری هستند ولی مقدار آن قابل توجه نیست. این امر می‌تواند ناشی از تغییر مقدار در حجم ورودی سنگریزه در دو وضعیت کاملاً باز و ۰/۶ کاملاً باز از دهانه

جدول ۳- تجزیه واریانس بازده جداسازی سنگریزه و کاه از مخلوط

نسبت مخلوط		۳/۵٪		۵٪		۱۰٪		۱۵٪	
منبع تغییرات		F		F		F		F	
df	سنگریزه	کاه	سنگریزه	کاه	سنگریزه	کاه	سنگریزه	کاه	
۲	۱۷۷/۶۲۷*	۴۹۹/۰۶۷*	۲۰/۱۶۹۶*	۱۱۹/۲۷۳*	۵۶۷/۱۰۴*	۳۵۰/۸۲۱*	۸۵۹/۶۷۸*	۴۹۱/۶۶۹*	
۱	۱۰۸/۶۴۳*	۳۱۲/۷۵۵*	۴۹/۹۶۹*	۱۸۲/۹۷۷*	۱۹۳/۲۴۹*	۳۰۰/۴۱۸*	۳۴۴/۹۷۴*	۱۵۰/۵۱۵*	
۱	۹۰/۸۶۵*	۱۷/۳۴۸*	۸۱/۹۹۷*	۹/۳۳۳*	۷۱۹/۷۰۳*	۰/۲۸۶ ^{ns}	۱۸۷/۷۷۵*	۷/۹۶۲*	
۲	۱/۳۵۷ ^{ns}	۴/۰۱۸*	۳/۴۴۴*	۱۲/۰۲۸*	۵۱/۰۶۷*	۱۴/۰۸۵*	۱۸/۹۶۶*	۹/۰۱۰*	
۲	۱/۵۳۳ ^{ns}	۱/۴۶۸ ^{ns}	۲/۴۸۱*	۲/۹۰۸ ^{ns}	۶۸/۷۷۰*	۶/۹۵۱*	۴۱/۰۲۰*	۵/۸۵۷*	
۱	۱/۳۴۱ ^{ns}	۰/۰۱۳ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۶/۳۶۳*	۸۵/۸۸۸*	۳/۶۱۳ ^{ns}	۷/۴۲۱*	۲۰/۹۶۵*	
۲	۸۹/۹۱۳*	۸/۱۰۴*	۰/۸۴۳ ^{ns}	۳/۹۸۶*	۲۳/۲۴۵*	۰/۱۳۳ ^{ns}	۳۰/۰۰۵*	۲/۲۵۶*	
۲۴	-	-	-	-	-	-	-	-	
۳۵	-	-	-	-	-	-	-	-	

* وجود اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد و ns عدم وجود اختلاف معنادار است.



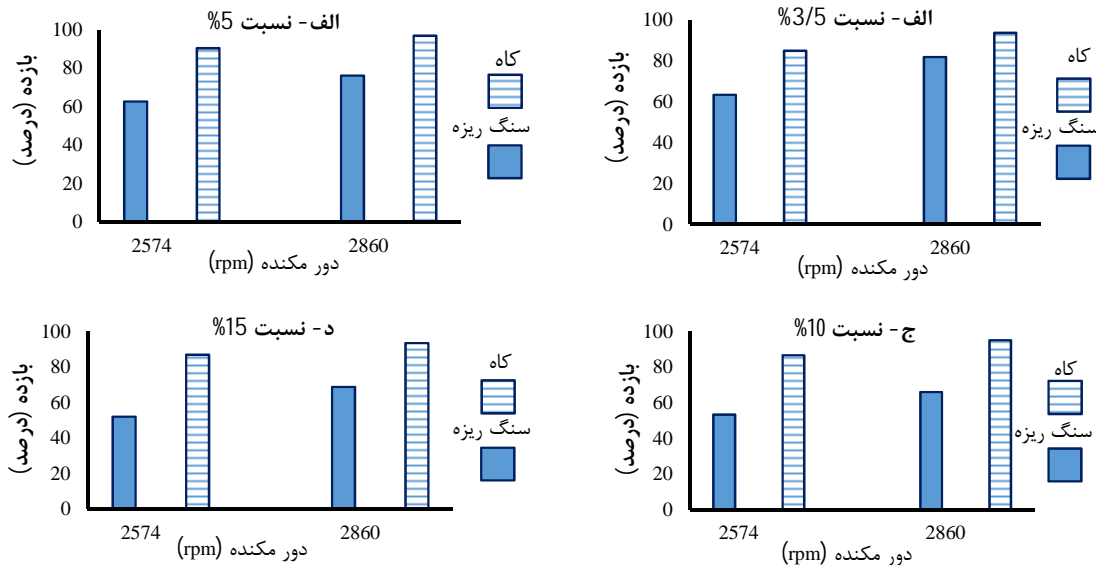
شکل ۴- اثر تغییرات دهانه ورودی بر بازده جداسازی سنگریزه و کاه از مخلوط

جداسازی سنگریزه و کاه از مخلوط مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است به دلیل سبک‌تر بودن کاه، درصد بازده جدایش این ماده نسبت به سنگریزه از مخلوط مورد نظر بیشتر است. نمودارها تقریباً برای هر چهار نسبت رفتار

اثر تغییرات دور مکنده بر بازده جداسازی سنگریزه و کاه از مخلوط با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌گردد در همه نسبت‌ها برای هر دو دور مکنده، اختلاف معناداری در بازده

سنگ‌ریزه از مخلوط افزایش پیدا کرده که دلیل آن افزایش سرعت مکش مخلوط است.

مشابهی را نمایش می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رفت و طبق نمودارها، با افزایش دور مکنده بازده جداسازی

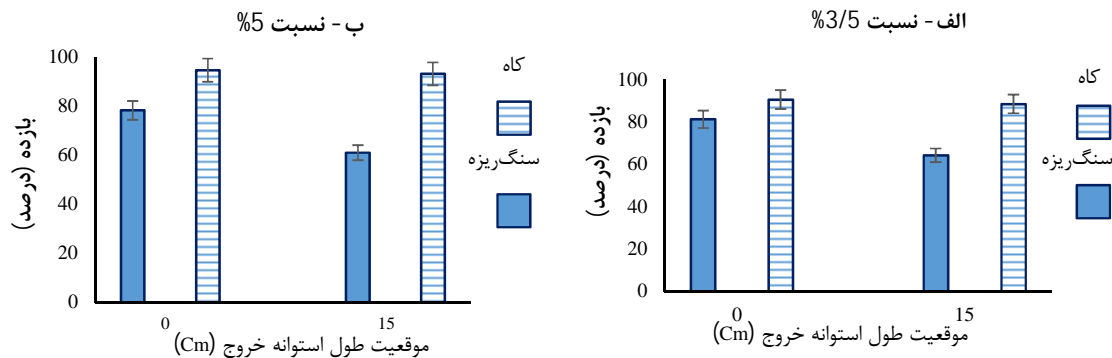


شکل ۵- اثر تغییرات دور مکنده بر بازده جداسازی سنگ‌ریزه و کاه از مخلوط

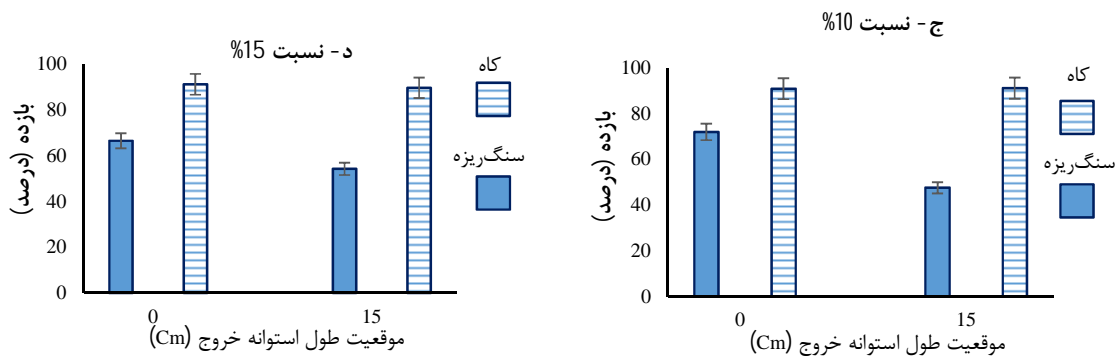
قسمت پایین‌تری از بدنه گرداب تشکیل شده که منجر به کاهش دور مؤثر و در نتیجه باعث کمتر شدن جدایش سنگ‌ریزه از مخلوط می‌گردد. در وضعیت صفر از استقرار استوانه خروج، فضای کافی برای تشکیل گردابه و چرخش مخلوط به وجود می‌آید که در نتیجه کاه به راحتی از لوله استوانه خروجی به سمت مخزن رفته و سنگ‌ریزه تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز و به کمک نیروی جاذبه به طرف پایین روانه می‌شود. این امر در وضعیت ۱۵ سانتی‌متری از استوانه خروج در داخل گرداب به نحوی است که گردابه در سمت پایین‌تر از بدنه گرداب تشکیل شده و لذا فضای کمتری برای چرخش مخلوط و در نتیجه جدایش سنگ‌ریزه از کاه به وجود می‌آید.

اثر تغییرات موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی سنگ‌ریزه و کاه از مخلوط

در شکل ۶ اثر تغییرات موقعیت استوانه خروج بر بازده جداسازی سنگ‌ریزه و کاه نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، این عامل، در جدایش کاه از مخلوط نسبت به سنگ‌ریزه از مخلوط، دارای اثر قابل توجهی بود. تغییرات قابل مشاهده برای هر چهار نسبت در هر دو وضعیت استوانه خروج به صورت کاملاً واضح تقریباً مشابه هم هستند. افزایش موقعیت استوانه خروج در داخل گرداب، بازده جداسازی سنگ‌ریزه را به طور چشم‌گیری کاهش می‌داد، زیرا در وضعیت ۱۵ سانتی‌متر از استوانه خروج در داخل گرداب، گردابه در



شکل ۶- اثر تغییرات موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی سنگ‌ریزه و کاه از مخلوط

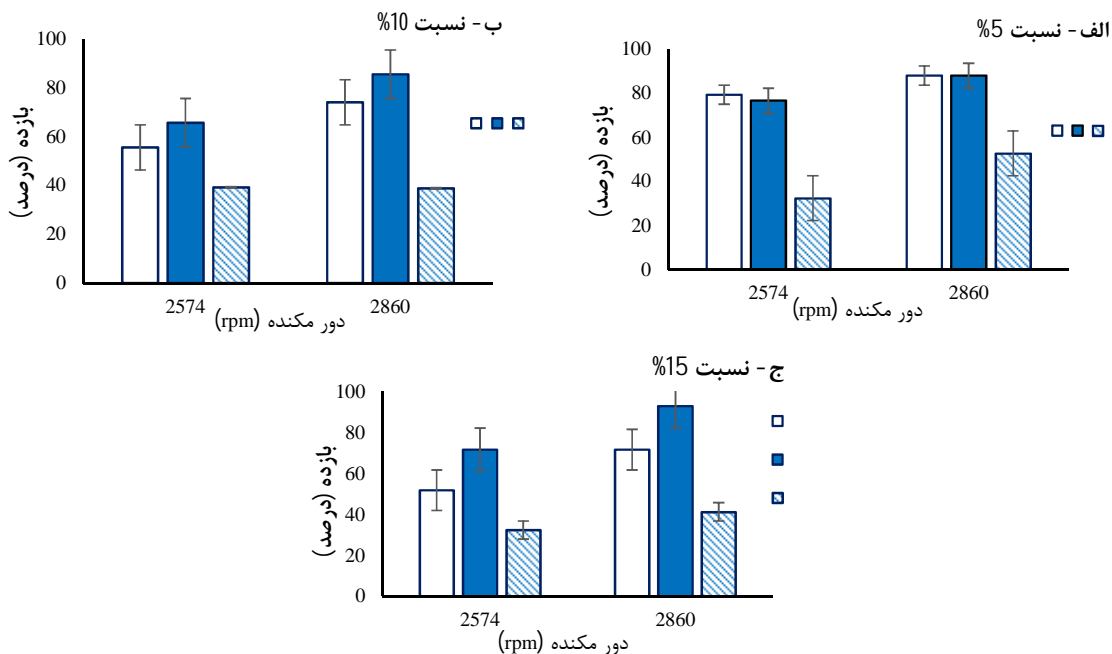


ادامه شکل ۶- اثر تغییرات موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی سنگریزه و کاه از مخلوط

قابل توجهی اتفاق افتاده است. این امر ناشی از وجود سطح ورودی کافی به همراه مکش مناسب می‌کند. همچنین اثر دهانه‌ی ورودی بر بازده جداسازی سنگریزه در دو نسبت ۱۰٪ و ۱۵٪ تقریباً مشابه هم بوده و بیش‌ترین بازده جداسازی در این دو نسبت مربوط به دهانه ۰/۶ کاملاً باز است که دلیل آن افزایش درصد نسبت کاه به سنگریزه نسبت به ۵٪ است.

اثر متقابل دهانه ورودی با دور مکنده بر بازده جداسازی سنگریزه از مخلوط

مطابق شکل ۷ تغییرات دهانه ورودی در هر دو دور مکنده اختلاف معناداری را در سه نسبت ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ نمایش می‌دهد؛ به نحوی که با افزایش دور مکنده بازده جداسازی کاه در هر سه نسبت برای ورودی‌های یک و ۰/۶ کاملاً باز نسبت به ورودی ۰/۳ کاملاً باز اختلاف



شکل ۷- اثر متقابل دهانه ورودی با دور مکنده بر بازده جداسازی سنگریزه

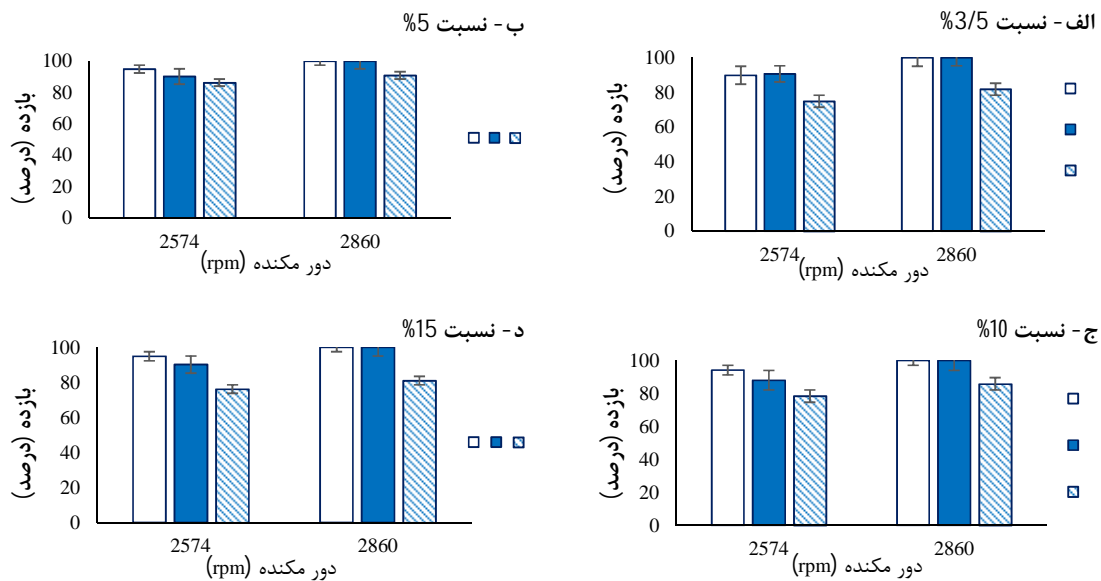
نسبت معنادار است. و در دور ۵۰ هرتز نسبت به دور ۴۵ هرتز بازده جداسازی کاه بیش‌تر است. همچنین در سرعت ۵۰ هرتز برای هر چهار نسبت ورودی‌های ۱ و ۰/۶ رفتاری مشابه با هم و با ورودی ۰/۳ اختلاف قابل توجهی

اثر متقابل دهانه ورودی با دور مکنده بر بازده جداسازی کاه از مخلوط

همان‌گونه که از شکل ۸ نمایان است، اثر متقابل دهانه ورودی با دور مکنده بر بازده جداسازی کاه در هر چهار

تأثیری مؤثر در افزایش بازده گرداب دارد.

داشته است. می‌توان گفت به دلیل سبک بودن کاه با افزایش دور مکنده سرعت مکش کاه نیز افزایش یافته و



شکل ۸- اثر متقابل دهانه ورودی با دور مکنده بر بازده جداسازی کاه از مخلوط

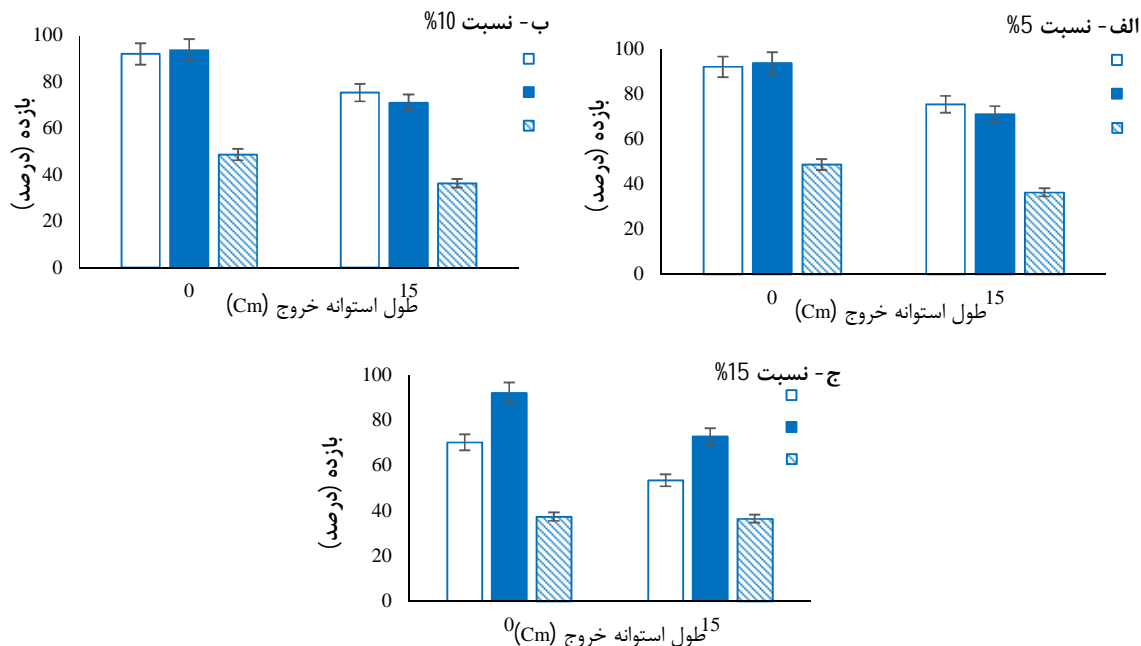
قبلی به دلیل کمتر شدن میزان ماده ورودی به داخل گرداب و در نتیجه کاهش حجم مواد ورودی، بازده جداسازی سنگ‌ریزه نیز کاهش یافته است.

اثر متقابل دهانه ورودی با موقعیت طول استوانه خروجی بر بازده جداسازی کاه از مخلوط

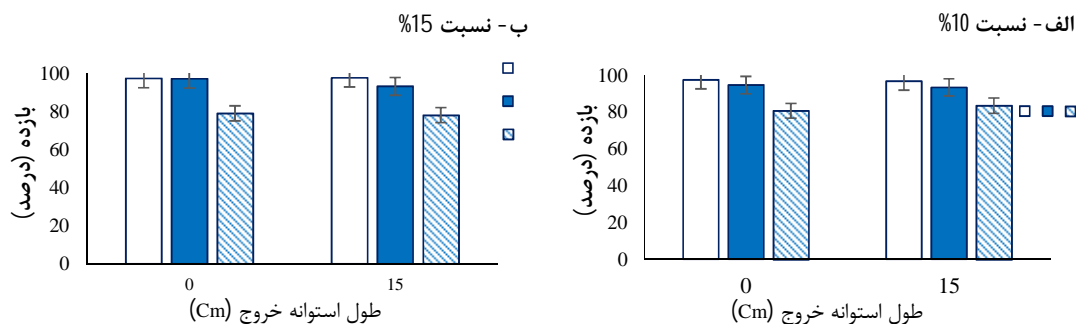
با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که اثر دهانه ورودی و موقعیت طول استوانه خروجی بر بازده جداسازی فقط در دو نسبت ۱۰٪ و ۱۵٪ معنادار شده و رفتاری مشابه با هم دارند. با کاهش سطح دهانه ورودی، در هر دو موقعیت از طول استوانه خروجی، درصد جدایش کاه کاهش یافته است این امر به واسطه‌ی کمتر شدن سطح دهانه ورودی، امکان ورود حجم بیشتری از مخلوط را سلب می‌کند. لازم به ذکر است با افزایش موقعیت طول استوانه خروجی، مسیر جداسازی کاه در داخل بخش مخروطی گرداب افزایش یافته که منجر به کاهش بازده جداسازی می‌گردد. این امر را می‌توان ناشی از افزایش مسیر طی شده توسط کاه دانست.

اثر متقابل دهانه ورودی با موقعیت طول استوانه بر بازده جداسازی سنگ‌ریزه از مخلوط

همان‌گونه که از شکل ۹ قابل مشاهده است اثر متقابل دهانه ورودی با طول استوانه بر بازده جداسازی سنگ‌ریزه معنادار بوده و با افزایش موقعیت طول استوانه خروجی در هر سه نسبت مخلوط ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ بازده جداسازی سنگ‌ریزه کاهش یافته است. در نسبت ۱۵٪ درصد بر خلاف دو نسبت دیگر به دلیل بیشتر بودن نسبت وزن سنگ‌ریزه، بازده جداسازی در سطح دهانه ورودی ۰/۶ کاملاً باز نسبت به دو دهانه یک و ۰/۳ کاملاً باز بیشتر است. در این نسبت هرچه سطح دهانه ورودی بازتر باشد، حجم مواد ورودی به داخل گرداب افزایش یافته و چون میزان درصد سنگ‌ریزه نیز بیشتر است بنابراین سنگ‌ریزه بیشتری همراه با کاه به داخل مخزن رفته و بازده جداسازی سنگ‌ریزه در این دهانه (سطح دهانه ۱) کاهش می‌یابد. و در دو دهانه دیگر (۱ و ۰/۶ کاملاً باز) بازده جداسازی تقریباً برابر و تنها با دهانه ۰/۳ کاملاً باز اختلاف دارند. در این حالت نیز مشابه توضیحات موارد



شکل ۹- اثر متقابل دهانه ورودی با موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی سنگریزه از مخلوط



شکل ۱۰- اثر متقابل دهانه ورودی با موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی کاه از مخلوط

گرداب، جدا شدن سنگریزه از کاه در قسمت پایین‌تری از گرداب رخ داده که احتمالاً به واسطه افزایش افت فشار داخل بدنه‌ی گرداب در قسمت مرکزی مخروطی است. بنابراین سرعت گردش سنگریزه به همراه کاه کاهش یافته، لذا منجر به کم شدن نیروی گریز از مرکز و در نهایت کاهش بازده جداسازی سنگریزه را در پی خواهد داشت.

اثر متقابل دور مکنده با موقعیت طول استوانه

خروج بر بازده جداسازی کاه از مخلوط

مطابق شکل ۱۲ اثر تغییرات دور مکنده با موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی کاه تنها در دو نسبت ۵% و ۱۵% اختلاف معناداری را نمایش می‌دهد. طبق

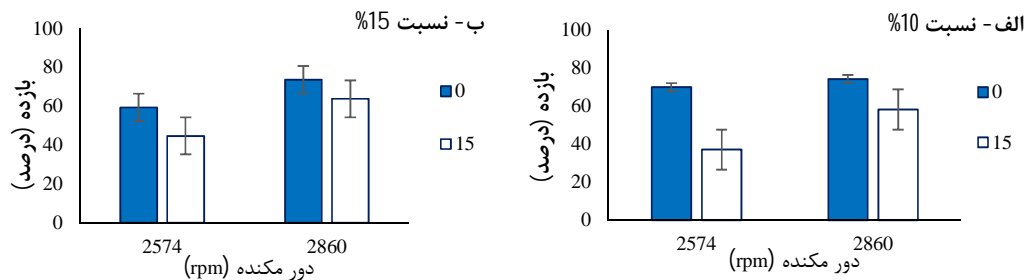
اثر متقابل دور مکنده با موقعیت طول استوانه

خروج بر بازده جداسازی سنگریزه از مخلوط

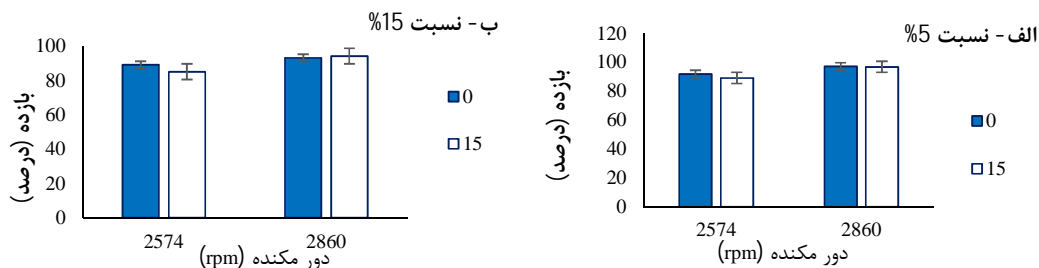
مطابق شکل ۱۱ اثر تغییرات دور مکنده با موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی سنگریزه فقط در دو نسبت ۱۰% و ۱۵% اختلاف معناداری را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشهود است در دور مکنده با سرعت ۲۸۶۰ دور بر دقیقه بازده جداسازی به دلیل افزایش سرعت ورودی مواد بیشتر از دور مکنده با سرعت ۲۵۷۴ دور بر دقیقه در هر دو موقعیت طول استوانه خروج است. طبق این نمودارها در موقعیت طول استوانه ۱۵ سانتی‌متر بازده جداسازی سنگریزه کمتر از موقعیت طول استوانه صفر است. می‌توان گفت، با افزایش طول استوانه خروج به دلیل طولانی‌تر شدن مسیر چرخش مواد در داخل

همان‌طور که مشخص است در موقعیت طول استوانه خروج صفر به دلیل کوتاه‌تر شدن مسیر حرکت کاه، بازده جداسازی افزایش یافته است.

نمودارها در دور مکنده با سرعت ۲۸۶۰ دور بر دقیقه بازده جداسازی به دلیل افزایش سرعت ورودی مواد و سبک بودن کاه، بیشتر از دور مکنده با سرعت ۲۵۷۴ دور بر دقیقه در هر دو موقعیت طول استوانه خروج است.



شکل ۱۱- اثر متقابل دور مکنده با موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی سنگ‌ریزه از مخلوط



شکل ۱۲- اثر متقابل دور مکنده با موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی کاه در نسبت از مخلوط

جدایش برای سنگ‌ریزه‌ها ملاحظه می‌گردد. این امر ناشی از تغییر نیروی گریز از مرکز و اثرات مشابه موقعیت طول استوانه خروجی به ازای وضعیت‌های مختلف از دهانه‌ی ورودی است که قبلاً به صورت تفکیکی اشاره شده است. از طرفی موقعیت استقرار استوانه‌ی خروجی در داخل گرداب در تغییر میزان مکش سنگ‌ریزه به طرف مخزن کاه نیز مؤثر است.

اثر متقابل سه‌تایی (دهانه ورودی و دور مکنده و موقعیت طول استوانه خروج) بر بازده جداسازی کاه از مخلوط

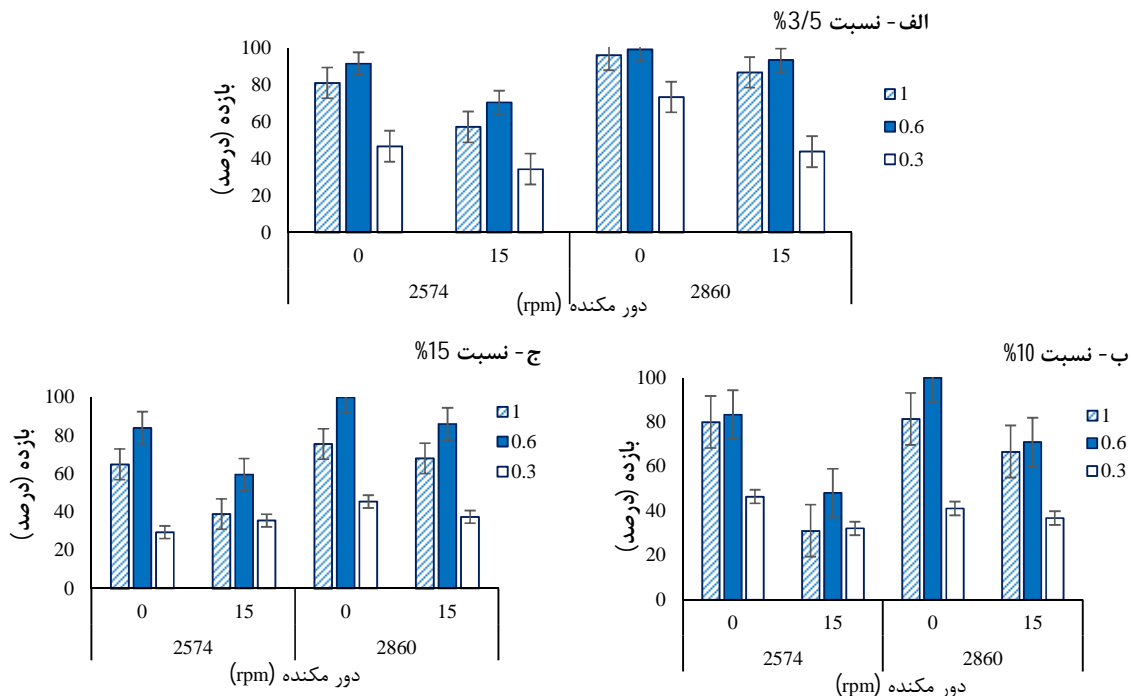
در شکل ۱۴ اثر متقابل سه‌تایی عوامل دهانه ورودی، دور مکنده و موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی کاه در نسبت‌های ۳/۵٪، ۵٪ و ۱۵٪ که معنادار است، نمایش داده شده است. به واسطه سبک‌تر بودن کاه از سنگ‌ریزه، بازده کلی جداسازی آن بیش‌تر شده و ضمن اینکه در دور مکنده با سرعت ۲۸۶۰ دور بر دقیقه، بازده تا ۱۰۰ درصد افزایش یافته است. کاهش سطح دهانه

اثر متقابل سه‌تایی (دهانه ورودی و دور مکنده و موقعیت طول استوانه خروج) بر بازده جداسازی سنگ‌ریزه از مخلوط

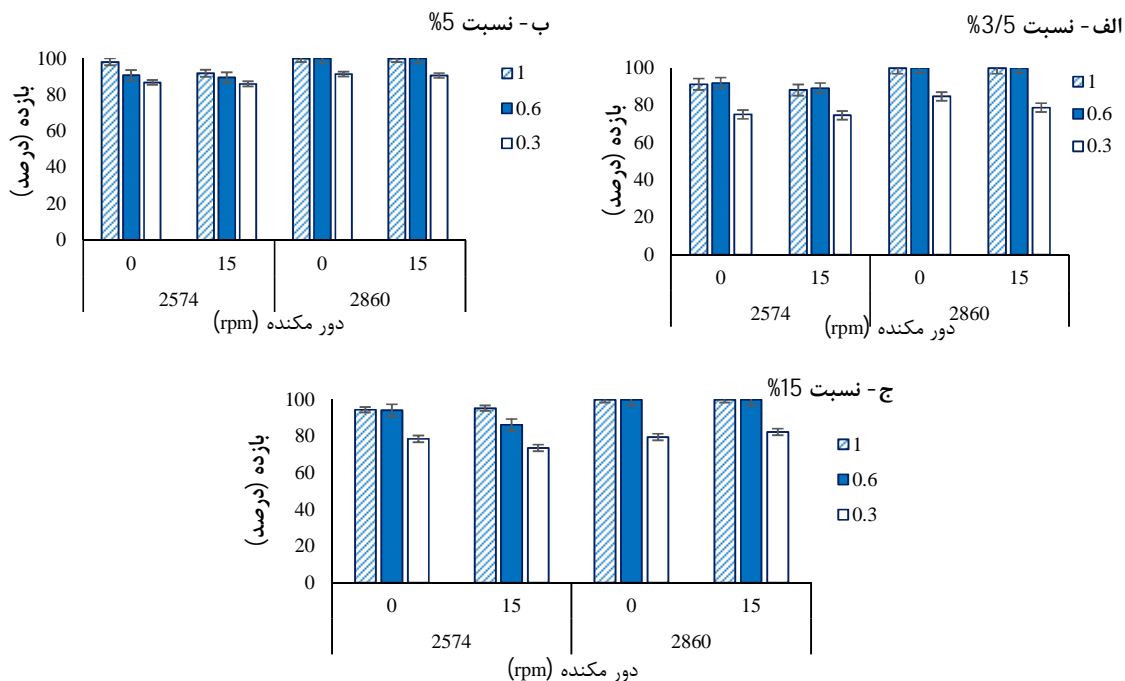
در شکل ۱۳ اثر بر هم‌کنش دهانه ورودی و دور مکنده و موقعیت طول استوانه خروج بر بازده جداسازی سنگ‌ریزه در نسبت ۳/۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ نمایش داده شده و معنادار است. بر این اساس، وقتی که موقعیت طول استوانه خروج برابر با صفر باشد با افزایش دور مکنده، در وضعیت دهانه ورودی ۰/۶ کاملاً باز، بیش‌ترین مقدار بازده جدایش سنگ‌ریزه از مخلوط را شاهد هستیم. علت آن کاهش مسیر پیمایش مخلوط در داخل بدنه‌ی گرداب است. این امر می‌تواند به واسطه‌ی اثرگذاری بیش‌تر نیروی گریز از مرکز در این وضعیت نسبت به حالت ۱۵ سانتی‌متر تلقی شود. بازتر بودن دهانه ورودی نیز اجازه ورود حجم مخلوط بیش‌تری از سنگ‌ریزه و کاه را به داخل گرداب مهیا می‌سازد. با مقایسه نمودارها در دو دور مکنده با سرعت‌های ۲۵۷۴ و ۲۸۶۰ دور بر دقیقه، در دهانه‌های ورودی متفاوت، رفتار مشابهی از نقطه نظر تغییرات بازده

موقعیت طول استوانه خروج، در هر دو دور مکنده رفتاری مشابه را نشان داده است. با افزایش موقعیت طول استوانه خروج، مسیر پیمایشی مخلوط در بدنه‌ی گرداب افزایش یافته که منجر به کاهش بازده جدایش کاه می‌گردد.

ورودی، در هر دو دور مکنده، درصد جدایش کاه را نیز کاهش داده است. این امر با توجه به کم‌تر شدن سطح دهانه ورودی، امکان ورود حجم بیشتری از مخلوط به داخل گرداب را سلب می‌کند. لازم به ذکر است که تغییر

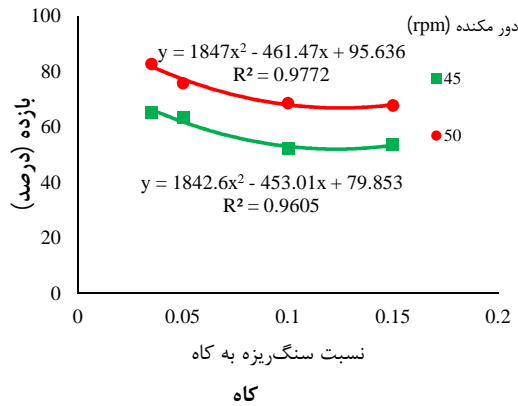


شکل ۱۳- اثر متقابل سه‌تایی (دهانه ورودی و دور مکنده و موقعیت طول استوانه خروج) بر بازده جداسازی سنگریزه از مخلوط

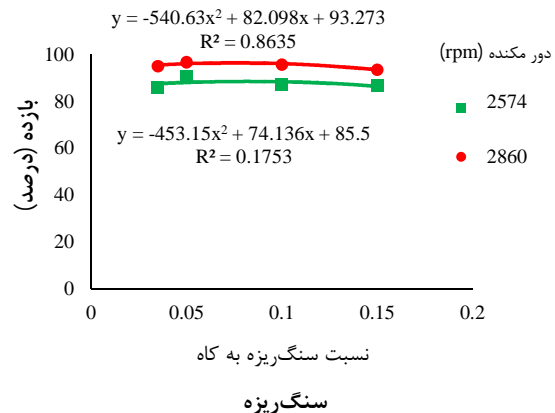


شکل ۱۴- اثر متقابل سه‌تایی (دهانه ورودی و دور مکنده و موقعیت طول استوانه خروج) بر بازده جداسازی کاه از مخلوط

جداسازی سنگ‌ریزه و کاه از مخلوط در هر دو دور مکنده با سرعت‌های ۲۵۷۴ و ۲۸۶۰ دور بر دقیقه به ترتیب در نسبت‌های جرمی ۳/۵٪ و ۵٪ حاصل شده است.



شکل ۱۵، عملکرد کلی برای جداسازی سنگ‌ریزه و کاه به ازای چهار نسبت جرمی (۳/۵٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) را نشان می‌دهد. حداکثر میانگین بازده گرداب در



شکل ۱۵- بازده کل گرداب برای جداسازی سنگ‌ریزه از مخلوط و کاه مکیده شده به مخزن

منابع

- Brar, L. S., Sharma, R. P., & Elsayed, K. (2015). The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone. *Powder Technology*, 286: 668-677.
- Elsayed, K., & Lacor, C. (2010). Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations. *Chemical Engineering Science*, 65(22): 6048-6058.
- Elsayed, K. & Lacor, C. (2013). The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES. *Computers & Fluids*, 71: 224-239.
- Iskhalieva, A., Yimmou, B. M., Gogate, P. R., Horvath, M., Horvath, P. G., & Csoka, L. (2012). Cavitation assisted delignification of wheat straw: a review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(5) 984-993.
- Kumar, A., Kumar, A., Khan, K., & Kumar, D. (2017). Performance evaluation of harvesting and threshing methods for wheat crop. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, 5(2): 604-611.
- Naserian, A. (1987). The effect of soda and urea on the use of wheat straw (Master's thesis, School of Agriculture, Tarbiat Modares University, Iran) (In Persian).
- Siadaty, M., Kheradmand, S., & Ghadiri, F., (2017). Improvement of the cyclone separation efficiency with a magnetic field. *Journal of Aerosol Science*, 114: 219-232.
- Vaziri Naein Nejad, J. (2016). *Numerical analysis and simulation of the performance of the cyclonic particle separator and*

نتیجه‌گیری

طبق نتایج به دست آمده، از مؤثرترین فراسنجه‌های تأثیرگذار بر عملکرد یک جداکننده گردابی عبارت است از تعیین بهترین مقدار سطح دهانه ورودی مواد (مخلوط) به داخل گرداب که این عامل می‌تواند در سرعت ورودی مواد به داخل گرداب و همچنین دور مکنده نقش به سزایی داشته باشد. مطابق شکل ۴ ملاحظه می‌گردد که با تغییر سطح دهانه ورودی به میزان ۰/۶ دهانه در وضعیت کاملاً باز، عملکرد جدایش سنگ‌ریزه از مخلوط حدود ۲۰٪ و برای کاه حدود ۱٪ افزایش را نشان می‌دهد. در مورد موقعیت قرارگیری طول استوانه خروج می‌توان گفت که این عامل براساس نوع مواد ورودی به داخل گرداب با توجه به چگالی آن تعیین می‌شود و اثر قابل توجهی بر بازده جداسازی دارد. با توجه به شکل ۶ اثر موقعیت قرارگیری طول استوانه خروجی در بدنه گرداب با افزایش نسبت‌های مخلوط کاهش‌ی حدود ۲۵٪ در بازده جدایش سنگ‌ریزه از مخلوط به وجود آمده است. این کاهش عملکرد در جدایش کاه از مخلوط حدود ۱/۵٪ است. این تفاوت می‌تواند ناشی از اختلاف چگالی سنگ‌ریزه و کاه باشد.

با توجه به فراسنجه‌ها و ابعاد محاسبه شده، بهترین جدایش در نسبت‌های ۳/۵٪ و ۵٪ حاصل گردید.

investigation of the effect of the cyclone tilt angle on the separation efficiency (Master's thesis, Mechanical-Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Iran) (In Persian).

- Wasilewski, M., Brar, L. S., & Ligus, G. (2020). Experimental and numerical investigation on the performance of square cyclones with different vortex finder configurations. *Separation and Purification Technology*, 239: 116588.
- Wei, Q., Sun, G., & Gao, C. (2020). Numerical analysis of axial gas flow in cyclone separators with different vortex finder diameters and inlet dimensions. *Powder technology*, 369: 321-333.