

ساخت و ارزیابی دستگاه تریبواپروالکترواستاتیک برای جداسازی ناخالصی‌های بذور گیاه خاکشیر

مجتبی افشاری پور^۱، کاظم جعفری نعیمی^{۲*}، علیرضا گنجوی^۳

۱. دانش آموخته‌ی مقطع کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲. استادیار، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳. استادیار، بخش فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۲/۳)

چکیده

به کارگیری تکنولوژی‌های مدرن در جداسازی، راهی نوین در رسیدن به بذرها و دانه‌های گیاهی با خلوص بالا می‌باشد. برای جداسازی دانه‌های خاکشیر از ناخالصی‌ها، دستگاه جداساز تریبواپروالکترواستاتیک طراحی و ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این دستگاه مواد اولیه در واحد تریبوشارژ بعد از دریافت بار ساکن به واحد جداساز تغذیه و تحت تأثیر ترکیبی از نیروهای گرانش و نیروی الکترواستاتیک ایجاد شده با ولتاژ بالای DC از هم جدا شدند. برای ارزیابی دستگاه، تأثیر سه فاکتور ولتاژ در سه سطح ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلو ولت، فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ در سه سطح ۹، ۱۵ و ۲۱ سانتی‌متر و زاویه الکترودهای واحد جداساز در سه سطح ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه، در سه تکرار بر روی وزن جعبه‌های جمع‌آوری مواد بررسی شد. داده‌های حاصل از آزمایش بر اساس آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، با استفاده از نرم افزار SAS تحلیل و ارزیابی شدند. نتایج نشان دادند، تأثیر سه فاکتور مورد بحث بر روی وزن هر چهار جعبه جمع‌آوری مواد جدا شده در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشند. هم‌چنین تأثیر برهم‌کنش آن‌ها در همه جعبه‌ها (به جز برهم‌کنش ولتاژ در فاصله و ولتاژ در زاویه مربوط به جعبه شماره ۴) در سطح ۱ درصد معنی‌دار گردید. با افزایش ولتاژ اعمالی، افزایش زاویه و کاهش فاصله بهترین خلوص با بالاترین وزن در جعبه شماره ۱، ۹۸٪ وزنی به دست آمد. و بالاترین میزان ناخالصی از نظر کیفیت و کمیت در جعبه شماره ۴ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: تریبوشارژ، جداسازی، زاویه الکترودها، فاصله الکترودها، ولتاژ بالا

مقدمه

برای طبقه‌بندی مخلوط‌های دانه دانه شده است و از نیروی الکترواستاتیکی بر روی ذرات باردار شده استفاده می‌شود که بر اساس تفاوت در نوع هدایت الکتریکی می‌باشد (Ralston, 1961; Bendimerad et al, 2013). در این روش ذرات بار الکتریکی پیدا می‌کنند. این ذرات هنگام عبور از میدان الکتریکی و تحت تأثیر نیروهای دیگر، مانند گرانش و گریز از مرکز، مسیرهای متفاوتی را طی می‌کنند و بر حسب اندازه، چگالی و رسانش الکتریکی از هم جدا می‌شوند (Li, & Ban, 1999). انتقال بار بین اجسام، باعث ایجاد بارهای مثبت و منفی در آنها می‌شود. این بار در اجسام عایق و نیز اجسام هادی که به زمین وصل نشده‌اند، باقی می‌ماند و به بار الکتریکی ساکن معروف است (Ward, 1999). قبل از انجام عمل جداسازی، باید ذرات به روشی باردار شوند تا تحت تأثیر میدان الکتریکی جداکننده قرار گیرند.

در جداکننده الکترواستاتیکی از توانایی ذرات در به دست آوردن و نگهداری بار الکتریکی، برای جداسازی آن‌ها استفاده شده است. روش‌های مختلفی برای باردار کردن ذرات مورد

محصولات کشاورزی جمع‌آوری شده از مزرعه اغلب دارای ناخالصی‌های گوناگونی از قبیل: مواد زاید، بذر علف‌های هرز، ساقه، برگ، بذرها آسیب‌دیده و ناقص و بذرها کوچک می‌باشند (McDonald & Copeland, 1997). از روش‌های گوناگونی برای جدا کردن ذرات مواد خشک استفاده می‌شود، متداول‌ترین آن‌ها جداکننده‌های مکانیکی هستند. این جداکننده‌ها (مانند الک‌ها، جداسازهای گریز از مرکز و غیره) اگرچه کاربردهای فراوانی در صنعت دارند، اما دارای محدودیت‌هایی از قبیل صدمه زدن به مواد حساس، قرارگیری تحت نیروهای مکانیکی و آلوده شدن مواد به ناخالصی‌هایی مانند غبار، ذرات فلزی و حتی بخار روغن می‌باشند (Kawamoto, 2008). روش‌های دیگری از جداسازی نیز موجود است که یکی از آنها روش الکترواستاتیکی می‌باشد (Vaughan & Delouche, 1967). جداسازی الکترواستاتیک روشی اساسی

* نویسنده مسئول: jafarinaemi@uk.ac.ir

(PET^۱)، پلی اتیلن (PE^۱)، پلی متیل متاکریلات (PMMA^۲) و آلومینیوم (Al) ساخته شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده با این جداساز الکترواستاتیک نشان داد، بهترین راندمان هنگامی به دست می‌آید که دانه‌های پلاستیک در لوله PVC ریخته شده و در قسمت سقوط آزاد از هم جدا شوند. در پژوهشی دیگر عملکرد یک جداساز تریبوالکترواستاتیک برای بازیافت مخلوط پلاستیک‌های اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS^۳) و پلی استایرن (PS^۴) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند، افزایش ولتاژ و زمان شارژ تریبوالکتریک باعث خلوص بالا و راندمان بالای بازیافت می‌شوند (Saeki, 2010).

Aman *et al.* (2004) به بررسی موقعیت و مکان الکتروود ولتاژ بالا به عنوان یک عامل موثر در جداسازی الکترواستاتیک پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد با کاهش فاصله الکتروود متصل به ولتاژ بالا جدایش مواد با خلوص بالاتری صورت می‌پذیرد.

Dascalescu *et al.* (2009) از دستگاهی برای جداسازی تریبوایروالکترواستاتیک (ABS) از دانه‌های زباله‌های الکتریکی و تجهیزات الکترونیک استفاده کردند. به این صورت که مواد دانه شده ضمن عبور از روی غربال دمنده هوا در واحد تریبو شارژ باردار می‌شوند. مقدار هوا به وسیله یک توربودمنده با سرعت متغیر تنظیم می‌شود. بنابراین دانه‌ها معلق شده و به دو صورت برخوردی دارند: برخورد ذره با ذره و ذره با دیواره. در این حالت دانه‌ها فرصت کافی برای قرار گرفتن در تریبوشارژ را پیدا می‌کنند. دو الکتروودی که انرژی خود را از دو مولد با ولتاژ بالای DC می‌گیرند، دارای بار مخالف شده و بنابراین دانه‌های باردار شده جذب این الکتروودها می‌شوند، و در جعبه جدایش ریخته می‌شوند. در نهایت جرم مواد هر جعبه به وسیله یک ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری و تجزیه تحلیل گردید. همچنین مشخص گردید با افزایش ولتاژ اعمالی درصد خلوص مواد جدا شده بیشتر می‌شود.

Park & Jeon (2009) جداسازی تریبوالکترواستاتیک را در مقیاس آزمایشگاهی برای جدا کردن (PP) و (ABS) انجام دادند. در این تحقیق از لوله پلی اتیلن با دانسیته بالا (HDPE^۵) برای انتقال شارژ مواد PP و ABS به روش تریبو استفاده گردید. در حضور میدان الکتریکی بالاتر از ۳۸۵ کیلو

استفاده قرار می‌گیرد: (۱) القا در یک رسانا (۲) بمباران یونی (۳) باردار کردن مالشی (Knool & Taylor, 1984; Leonov, 1984). جداکننده‌های الکترواستاتیکی با توجه به روش انتقال مخلوط مواد به درون میدان الکتریکی به چهار دسته جداکننده‌های استوانه‌ای یا تسمه‌ای، جداکننده‌های دارای صفحه با شیب ثابت، جداکننده‌های دارای صفحه لرزان و جداکننده‌های با جریان مواد به صورت سقوط آزاد تقسیم‌بندی می‌شوند (Ralston, 1961). یکی از روش‌های سقوط آزاد نیز روش تریبوایروالکترواستاتیک^۴ است. در این جداکننده هم‌زمان از دو روش سقوط آزاد و جریان باد استفاده می‌شود. تریبوالکترواستاتیک یک پدیده فیزیکی شامل انتقال شارژ بین دو جسم در تماس است. در واقع به پدیده ایجاد بار ساکن از طریق تماس و مالش، پدیده تریبوالکتریک می‌گویند. عوامل مؤثر بر میزان بار تولید شده در این پدیده شامل سطح تماس، سرعت مالش، رطوبت نسبی محیط و نوع مواد می‌باشد (Tilmatine & Bendimerad, 2009). از میان جداسازهای مورد استفاده در صنعت، جداسازی تریبوالکتریک ذرات عایق با استفاده از تکنولوژی سقوط آزاد به طور گسترده‌ای در بازیافت زباله و صنایع معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Tilmatine & Bendimerad, 2009).

جداسازی تریبوالکترواستاتیک راه حل فنی پیشرفته است که مشکلات زیست محیطی را برطرف می‌نماید و در این روش اثر جدایش متکی بر توانایی کنترل تریبوشارژ ذرات است (Dodbibia *et al.*, 2003; Dascalescu, 2001). جداسازی تریبوالکترواستاتیک مواد معدنی از زغال‌سنگ در پژوهشی توسط Xin-xi *et al.* (2009) بررسی شد. برای این منظور زغال-سنگ با چگالی ۱/۳۵ gr/cm³، کوارتز^۵، کائولن^۶ و پیریت^۷ با توجه به نسبت‌های مختلف به ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرومتر پودر شده و مخلوط شدند. نتایج نشان داد در روند جداسازی تریبوالکترواستاتیک، زغال‌سنگ بار مثبت و کوارتز، کائولن و پیریت بار منفی به خود جذب می‌کنند. Iuga *et al.* (2005) یک دستگاه تریبوایروالکترواستاتیک را برای جداسازی پلاستیک مورد ارزیابی قرار دادند. این دستگاه برای اندازه‌گیری نسبت بار به جرم، از شش لوله تریبوشارژ و از جنس پلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC^۸)، پلی پروپیلن (PP^۹)، پلی اتیلن ترفتالات

9. Polypropylene
10. Polyethyleneterephthalate
11. Polyethylene
12. Polymethyl methacrylate
13. Acrylonitrile Butadiene Styrene
14. Polystyrene
15. High Density Polyethylene

1. Conductive Induction
2. Ion Bombardment
3. Corona
4. Ion Bombardment
5. Quartz
6. Kaolin
7. Pyrite
8. Polyvinyl Chloride

الکتریکی و نیروی گرانش سقوط کرده و از یکدیگر جدا می-شوند. جداکننده تریبوایروالکترواستاتیک ساخته شده (شکل ۱) شامل: قیف یا مخزن تغذیه مواد، واحد باردارکننده مواد، واحد جداکننده، توربودمنده با لوله‌های انتقال هوا، واحد جمع‌آوری و منبع تغذیه ولتاژ بالا متصل به الکترودها می‌باشد. مخزن تغذیه قیفی با مقطع مربعی و از جنس آهن گالوانیزه است. از یک هم-زن به منظور رفع انباشت و عدم انسداد مواد در نزدیکی مجرای خروجی و هم‌چنین تغذیه یکنواخت استفاده شده است. واحد باردارکننده مواد شامل محفظه‌ای به شکل مکعب مستطیل است. در دو وجه بالا و پایین آن چند شیار برای تغییر مکان الکترودها تعبیه شده است. این الکترودها از جنس آلومینیوم می‌باشند. هدایت الکتریکی مطلوب آلومینیوم و خواص هدایت الکتریکی بهتر این فلز نسبت به عناصر و فلزات دیگر، به خصوص در مقایسه با مس، دلیل اصلی استفاده از الکترودها آلومینیومی است (Kaufman, 2000).

هر الکترودها به وسیله کابل ۴ میلی‌متری که از سوراخ‌های تعبیه شده در دو وجه چپ و راست عبور می‌کند، به قطب مثبت و الکترودها دیگر به قطب منفی منبع تغذیه متصل شده است. از یک لوله پلی اتیلن برای عبور مواد در واحد باردار کننده استفاده شده است (Iuga et al, 2005). واحد جداکننده دستگاه نیز شامل محفظه‌ای به شکل مکعب مستطیل می‌باشد و دیواره جلوی آن به منظور مشاهده فرآیند جداسازی از جنس شیشه انتخاب شد. این طبقه شامل دو صفحه آلومینیومی با قابلیت تغییر زاویه بین ۰ تا ۴۵ درجه است و اتصال این الکترودها به منبع تغذیه ولتاژ بالا نیز مشابه واحد باردارکننده می‌باشد. از یک توربودمنده برای معلق ماندن بیشتر مواد و افزایش زمان قرارگیری آن‌ها در میدان الکتریکی استفاده گردیده است.

واحد جمع‌آوری مواد جدا شده به صورت چهار جعبه به هم پیوسته می‌باشد، در قسمت میانی شکافی برای عبور لوله ایجاد گردیده است. این جعبه به صورت کشویی و در پایین واحد جداکننده قرار می‌گیرد. میدان الکتریکی با اعمال ولتاژ بر روی الکترودهای موجود در دستگاه ایجاد می‌گردد. قطب مثبت به یک الکترودها و قطب منفی به الکترودها دیگر متصل است. شدت میدان الکتریکی با توجه به تغییر ولتاژ توسط منبع تغذیه مدل PS 3050 ساخت شرکت پویا مبدل دماوند ایران تغییر می-کند.

ولت بر متر و رطوبت نسبی کمتر از ۳۰٪، درجه خلوص PP، ۹۹/۷۰٪ و مقدار باز یافت ۹۲/۳۰٪ بدست آمد. در یک پژوهش به شبیه سازی عددی از عملکرد جداساز تریبوایروالکترواستاتیک برای مخلوط مواد جامد دانه‌ای پرداخته شد. آزمایش جداسازی تریبووالکترواستاتیک بر روی دانه‌های پلی آمید (PA) و پلی کربنات (PC) مورد استفاده در صنعت پلاستیک صورت گرفت. این مخلوط دوتایی با ترکیب‌های مختلف تهیه شد. نتایج به دست آمده نشان دادند، استفاده از جداسازها برای طیف وسیعی از نرخ تغذیه، موثر است و بستگی به ترکیب مواد از هم جدا شده دارد (Rahou et al, 2013).

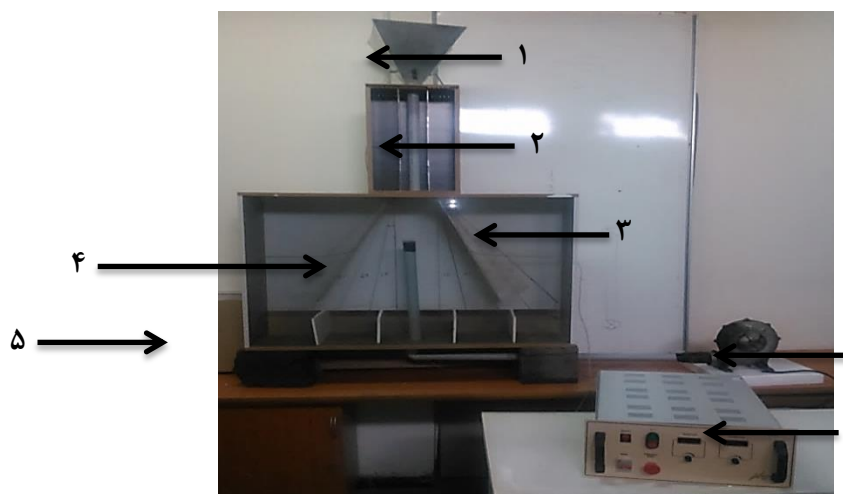
برای جداسازی اجزای مختلف سیوس گندم از روش الکترواستاتیک استفاده شده است. به این صورت که ابتدا سیوس گندم آسیاب شده، سپس با روش تماسی باردار شد. ذرات باردار شده تحت تأثیر میدان الکتریکی قوی به سمت الکترودهای مثبت و منفی جذب و از یکدیگر جدا شدند. نتایج تحقیق بیانگر عملکرد مناسب دستگاه جداساز مورد استفاده بود (Hemery et al., 2011).

با توجه به اندازه بسیار کوچک بذره‌های خاکشیر و وجود ناخالصی‌های فراوان در زمان برداشت آن، استفاده از روشی که بتواند جداسازی ناخالصی از بذر را با درصد خلوص بالایی انجام دهد، می‌تواند نقش ارزنده‌ای در فرآوری این محصول داشته باشد. روش‌های مکانیکی مرسوم به دلیل آسیب‌های فیزیکی که به بذر وارد می‌کنند و ظرفیت پائین، دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. در این راستا، استفاده از روش‌های الکترواستاتیک در تحقیق حاضر، مورد نظر قرار گرفت. بررسی تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که تاکنون گزارش‌های چندانی در خصوص استفاده از جداسازی ناخالصی‌های خاکشیر با روش الکترواستاتیک ارائه نگردیده است. لذا می‌توان هدف از اجرای این طرح را به طور خلاصه ساخت دستگاه تریبوایروالکترواستاتیک برای جداسازی ناخالصی‌های خاکشیر و بررسی اثر تغییر ولتاژ، فاصله الکترودهای واحد باردارکننده و زاویه الکترودهای واحد جداساز بر عملکرد دستگاه ساخته شده، بیان کرد.

مواد و روش‌ها

ساخت دستگاه تریبوایروالکترواستاتیک

در روش تریبوایروالکترواستاتیک، مواد از هر دو طریق مالش (تریبو) و بمباران یونی باردار می‌شوند. آنگاه تحت تأثیر میدان



شکل ۱: اجزای تشکیل دهنده جداکننده تریبووالکترواستاتیک (۱) قیف یا مخزن تغذیه (۲) واحد باردارکننده مواد (۳) واحد جداکننده (۴) لوله انتقال هوا (۵) واحد جمع آوری مواد (۶) دمنده (۷) منبع تغذیه الکتریکی DC ولتاژ بالا.

می‌گردد. جعبه جمع آوری مواد متشکل از چهار قسمت است (شکل ۲). در هر یک از جداکننده‌های الکترواستاتیکی نیروی اولیه جداکننده، از معادله (۱) محاسبه می‌شود (Nayfeh & Brussel, 1985).

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این معادله F با فرض ثابت بودن q و E با توجه به رابطه (۲) با ولتاژ رابطه مستقیم دارد (Moore, 1973).

$$E = \frac{V}{d} \quad (\text{رابطه ۲})$$

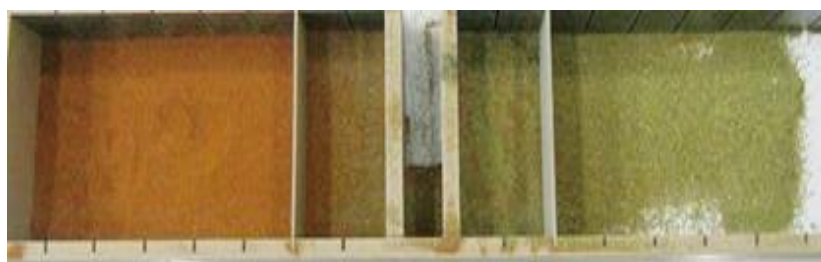
نیروهایی که به یک جسم در حال سقوط در میدان الکتریکی وارد می‌شوند، عبارتند از: نیروی الکتریکی (F_e) و نیروی گرانشی (F_g). این نیروها، به ترتیب در جهت‌های افقی و قائم اثر می‌کنند و از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌گردند (Moore, 1973).

$$F_e = qE = 4\pi r^2 \sigma E \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$F_g = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \quad (\text{رابطه ۴})$$

آزمون و ارزیابی

در این تحقیق آزمایش‌ها با دانه‌های خاکشیر که از مزارع اطراف شهر ماهان در استان کرمان جمع‌آوری شدند، انجام گردید. پس از جدا کردن شاخ و برگ و غشای روی این دانه‌ها، از الک با مش ۱۶ عبور داده شدند. با انجام این عمل دانه‌های خاکشیر از برگ و ناخالصی‌های با اندازه بزرگ جدا می‌شوند (خلوص این مواد ۵۳٪ می‌باشد). برای جدا کردن ناخالصی‌های باقی مانده به کمک دستگاه ساخته شده، نخست مواد اولیه با ترازوی آزمایشگاهی کیا مدل AHK۶۲۰۰ با دقت ۰/۱ گرم به نمونه‌های یک کیلوگرمی تقسیم شد. در تمامی آزمایش‌ها سرعت دمنده هوا ۱۳۰۰۰ rev/min، رطوبت نسبی هوا $RH = 21 \pm 2\%$ ، رطوبت بر پایه وزن خشک مواد ۴/۵ درصد، دمای هوای اتاق 23 ± 1 درجه و نرخ تغذیه $D = 3/1$ g/s بود. مواد اولیه با قیف تغذیه‌کننده به درون دستگاه تغذیه گردیدند. در قسمت بالایی دستگاه دانه‌ها ضمن سقوط از درون لوله PVC از میان دو الکترود متصل به منبع ولتاژ بالا باردار می‌شوند (تریبووالکتریک و بمباران یونی) سپس در طبقه پایین خاکشیر تحت ترکیبی از نیروهای گرانش و نیروی الکترواستاتیک از ناخالصی جدا



شکل ۲. تقسیم‌بندی جعبه جمع آوری (۱) محصول خالص ۲ و ۳ مخلوط دانه‌های خاکشیر و ناخالصی (۴) ناخالصی

الکترودهای واحد جداساز در سه سطح (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه) بر وزن مواد درون جعبه‌های جمع‌آوری در عملیات جداسازی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

هنگام عبور مواد از لوله PVC برخوردهای مواد با همدیگر و با لوله موجب ایجاد بار بر اثر پدیده تریبو می‌شود همچنین عبور این مواد از مقابل ولتاژ بالای ایجاد شده موجب ایجاد بار بر روی مواد مختلف بر اثر پدیده بمباران یونی می‌شود که در همه مواد در هنگام عبور از میدان الکتریکی ایجاد شده با ولتاژ بالا اتفاق می‌افتد. قطبش مواد بسته به موقعیت‌شان در واحد تریبو الکتریک متفاوت می‌باشد. در این پژوهش مشخص گردید، دانه‌های خاکشیر بار منفی به خود گرفته و به سمت الکتروود مثبت واحد جداساز دستگاه حرکت می‌کنند، سپس تحت نیروی گرانش درون جعبه جمع‌آوری سقوط می‌نمایند. ناخالصی‌های موجود، بار مثبت می‌گیرند و به سمت الکتروود منفی دستگاه متمایل می‌شوند. محاسبه خلوص مواد در هر بار تکرار آزمایش تحت سطوح مختلف پارامترهای ولتاژ، زاویه و فاصله نشان داد میانگین خلوص مواد جعبه شماره ۱، ۹۸٪، مواد جعبه شماره ۲، ۷۵٪، جعبه شماره ۳، ۵۰٪ و جعبه شماره ۴، ۴٪ است. ضمن این‌که بهترین خلوص در ولتاژ ۴۰، فاصله ۹ و زاویه ۴۰ با خلوص جعبه شماره ۱، ۹۹/۵ درصد به دست آمد. با توجه به این‌که هدف در ساخت این دستگاه رسیدن به خلوص بالای خاکشیر است، لذا در ادامه به طور مفصل‌تر راجع به جعبه شماره ۱ با حداکثر خلوص و جعبه شماره ۴ با حداکثر ناخالصی نسبت به سایر جعبه‌ها بحث خواهد شد. نتایج تجزیه واریانس و میانگین داده‌های مربوط به متغیرهای اندازه‌گیری شده به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ درج گردیده است.

جرم مواد جدا شده در هر کدام از ۴ قسمت جعبه جمع‌آوری توسط ترازوی ترازو آزمایشگاهی کیا مدل FRH و با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. به منظور تعیین خلوص مواد جدا شده در هر یک از تقسیم‌های چهارگانه ابتدا تصویر دیجیتالی نمونه‌های مواد جمع‌آوری ۴ جعبه در ۸۱ آزمایش انجام شده، گرفته شد (شکل ۳) و با توجه به تفاوت در رنگ دانه‌ها و ناخالصی‌ها، با برنامه‌ای که در محیط MATLAB 6.5 و با استفاده از ابزار پردازش تصویر تهیه شد، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و در نهایت میانگین خلوص در هر جعبه به دست آمد.



شکل ۳. نمونه تصویر ورودی در پردازش تصویر

طرح آماری مورد استفاده و روش آنالیز نتایج

در این تحقیق بررسی و تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار با استفاده از نرم افزارهای SAS 9.1.3 و MSTATC انجام شد و از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد نیز برای مقایسه میانگین‌ها استفاده گردید. اثر ولتاژ در سه سطح (۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلو ولت)، فاصله الکترودهای واحد باردارکننده در سه سطح (۹، ۱۵ و ۲۱ سانتی‌متر) و زاویه

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس آزمون اثر متقابل سه عامل ولتاژ، فاصله و زاویه.

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن مواد جعبه شماره ۱ (g)	وزن مواد جعبه شماره ۲ (g)	وزن مواد جعبه شماره ۳ (g)	وزن مواد جعبه شماره ۴ (g)
		میانگین مربعات	F	میانگین مربعات	F
ولتاژ	۲	۱۸۰۳۴/۳۷	۴۹۳/۰۱**	۱۳۹۲۰/۷۷	۴۶۲/۹۴**
فاصله	۲	۳۶۹۳۱/۵۹	۱۰۰۹/۶۱**	۱۳۸۵۵۴/۱۱	۴۶۰۷/۷۱**
زاویه	۲	۶۸۴۷۷/۷۷	۱۸۷۲/۰۱**	۵۴۴۰۸/۲۶	۱۸۰۹/۳۸**
ولتاژ×فاصله	۴	۴۱۵/۶۲	۱۱/۳۶**	۲۰۲۱/۳۹	۶۷/۲۲**
ولتاژ×زاویه	۴	۳۸۰۵/۱۴	۱۰۴/۰۲**	۱۶۶۱/۲۶	۵۵/۲۴**
فاصله×زاویه	۴	۶۶۶۴/۰۹	۱۸۲/۱۷**	۳۶۶۲/۸۱	۱۲۱/۸۰**
ولتاژ×فاصله×زاویه	۸	۳۰۰۸/۴۶	۸۲/۲۴**	۲۶۰۸/۴۲	۸۶/۷۴**
اشتباه آزمایش	۵۴	۳۶/۵۸		۳۰/۰۷	۴۳/۸۷

ns نبود اختلاف معنی‌دار.

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

گردد. با توجه به رابطه ۱ و ۲، چون نیروی وارده به یک جسم در حالت سقوط با ولتاژ رابطه مستقیم دارد، در نتیجه غلبه نیروی الکترواستاتیک بر نیروی گرانش بیشتر شده و تمایل دانه‌های خاکشیر به سمت الکتروود مثبت بیشتر می‌شود. این نتیجه‌گیری با نتایج (2009) Dascalescu *et al* برای جداسازی تریبوایروالکترواستاتیک ABS و ABS-PC از دانه‌های زباله‌های الکتریکی و تجهیزات الکترونیک، & Tilmatine (2009) Bendimerad در زمینه بازیافت تریبوالکترواستاتیک پلاستیک-ها و Saeki (2010) برای بازیافت اکریلونیتریل بوتادین استایرن و پلی استایرن مطابقت دارد.

در مقایسه بین سه ولتاژ با آزمون دانکن (جدول ۱) به روشنی مشخص شد، افزایش ولتاژ منجر به افزایش وزن خاکشیر با خلوص بالا گردید به طوری که در ولتاژهای ۳۰ و ۴۰ کیلو ولت نسبت به ولتاژ ۲۰ کیلو ولت افزایش ۱۶ و ۲۷ درصدی در وزن جعبه شماره ۱ شد. این ولتاژها دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد می‌باشند و در سطوح مختلفی قرار می‌گیرند. با افزایش ولتاژ اعمالی به الکتروودهای هر دو واحد تریبوشارژ و جداساز، مواد اولیه درون میدان الکتریکی قوی‌تری قرار می‌گیرند. قرارگیری این مواد در میدان الکتریکی قوی‌تر، باعث جذب بیشتر دانه‌های خاکشیر توسط الکتروود منفی می‌-

جدول ۲: میانگین مربوط به متغیرهای اندازه‌گیری شده در سه ولتاژ، سه فاصله الکتروود واحد تریبوشارژ و زاویه الکتروودهای واحد جداکننده

میانگین وزن (گرم)	ولتاژ اعمالی (کیلو ولت)			فاصله الکتروودهای واحد تریبوشارژ (سانتی‌متر)			زاویه الکتروودهای واحد جدا کننده (درجه)		
	۲۰	۳۰	۴۰	۹	۱۵	۲۱	۲۰	۳۰	۴۰
جعبه شماره ۱	۱۹۱/۴۱ ^c	۲۲۱/۷۸ ^b	۲۴۲/۸۱ ^a	۲۵۷/۷۹ ^a	۲۱۳/۹۶ ^b	۱۸۴/۲۶ ^c	۱۶۰/۵۲ ^b	۲۴۸/۲۹ ^a	۲۴۷/۱۸ ^a
جعبه شماره ۲	۳۹۷/۵۶ ^a	۳۶۱/۷۸ ^b	۳۵۵/۴۴ ^c	۲۸۹/۲۲ ^c	۴۰۶/۲۲ ^b	۴۱۹/۳۳ ^a	۴۲۳/۴۱ ^a	۳۴۴/۴۴ ^b	۳۴۶/۹۳ ^b
جعبه شماره ۳	۳۲۹/۴۸ ^a	۳۲۶/۵۶ ^a	۳۱۱/۳۰ ^b	۳۵۷/۳۷ ^a	۲۹۴/۲۶ ^c	۳۱۵/۷۰ ^b	۳۳۹/۳۷ ^a	۳۱۸/۹۳ ^b	۳۰۹/۰۴ ^c
جعبه شماره ۴	۸۱/۶۷ ^b	۹۰/۰۷ ^a	۹۰/۴۸ ^a	۹۵/۵۶ ^a	۸۵/۶۷ ^b	۸۱/۰۰ ^c	۷۶/۷۰ ^c	۸۸/۴۸ ^b	۹۷/۰۴ ^a

برای هر متغیر، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

به سمت الکتروود مثبت این واحد، باعث می‌گردد خاکشیرهای باردار شده در طول سقوط دائماً تمایل به جذب به سمت الکتروود مثبت را داشته باشند، بنابراین در فاصله بیشتری از مرکز سقوط می‌کنند.

اثر متقابل ولتاژ در فاصله الکتروودهای واحد تریبوشارژ در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۱). بررسی مقایسه میانگین‌های اثر متقابل ولتاژ در فاصله الکتروودهای واحد تریبوشارژ (جدول ۳) نشان داد، با افزایش فاصله الکتروودهای واحد تریبوشارژ، وزن مواد درون جعبه شماره ۱ می‌شود. هم‌چنین با در نظر گرفتن فاصله ثابت با افزایش ولتاژ اعمالی به تمامی الکتروودهای دستگاه وزن مواد افزایش می‌یابد. بیشترین وزن خاکشیر با خلوص بالا در جعبه شماره ۱ مربوط به ولتاژ ۴۰ کیلو ولت و فاصله الکتروود ۹ سانتی‌متر با میانگین ۲۸۹/۳ گرم و کمترین مقدار آن مربوط به ولتاژ ۲۰ کیلو ولت و فاصله الکتروود ۲۱ سانتی‌متر با میانگین ۱۵۹/۷ گرم می‌باشد. با توجه به معادلات ۱ و ۲، دو راه افزایش نیروی وارد بر ذرات، اعمال ولتاژ بالاتر و کاهش فاصله بین الکتروودها است.

نتایج مقایسه میانگین‌های اثر متقابل ولتاژ در زاویه الکتروودهای واحد جداساز گواه بر این است، هر چه زاویه الکتروودهای واحد جداساز افزایش یابد وزن مواد درون این جعبه افزایش می‌یابد. بیشترین وزن خاکشیر با خلوص بالا (۹۸

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد فواصل مختلف دو الکتروود در واحد تریبوشارژ، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد دارند (جدول ۱). نتایج آنالیز با آزمون دانکن در جدول ۲ نیز نشان داد فاصله‌های مختلف این الکتروودها، دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند. به‌طوری‌که در فاصله ۲۱ سانتی‌متر نسبت به ۹ سانتی‌متر، کاهش ۴۰ درصدی در وزن جعبه شماره ۱ مشاهده می‌گردد. نیروی وارده به یک جسم در حالت سقوط با فاصله بین دو الکتروود رابطه عکس دارد. (2004) Aman *et al* به بررسی موقعیت و مکان الکتروودها به عنوان یک عامل موثر در جداسازی الکترواستاتیکی پرداختند، نتایج آن‌ها با یافته‌های این تحقیق هم‌سو است.

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، زاویه‌های مختلف الکتروود در واحد جداساز تأثیر معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر وزن مواد در جعبه شماره ۱ دارند. در مقایسه بین سه زاویه انتخابی مشخص گردید، بیشترین وزن مواد در این جعبه مربوط به زاویه ۳۰ و ۴۰ درجه به ترتیب با ۲۴۸/۲۹ و ۲۴۷/۱۸ گرم بوده و اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند، در حالی‌که زاویه ۲۰ درجه در گروه b قرار می‌گیرد و با دو زاویه قبلی اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد (جدول ۲). با افزایش زاویه بین الکتروودهای واحد جداساز، هدایت خاکشیرهای با بار منفی

نشان داد، بیشترین وزن خاکشیر با خلوص بالا در جعبه شماره ۱ مربوط به ترکیب فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ ۹ سانتی‌متر در زاویه الکترودهای واحد جداساز ۴۰ درجه با میانگین ۳۰۶/۸ گرم و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ ۱۵ و ۲۱ سانتی‌متر در زاویه الکترودهای واحد جداساز ۲۰ درجه در گروه h با میانگین‌هایی به ترتیب ۱۵۷/۱ و ۱۵۳/۱ گرم می‌باشد (جدول ۵).

درصد) در جعبه شماره ۱، مربوط به ترکیب ولتاژ ۴۰ کیلو ولت و زاویه الکترودهای ۴۰ درجه با میانگین ۲۹۳/۴ گرم و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب ولتاژ ۲۰ کیلو ولت و زاویه الکترودهای ۲۰ درجه با میانگین ۱۵۳/۶ گرم می‌باشد و ترکیب‌های دیگر در گروه‌های بعدی قرار می‌گیرند که نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است. بررسی مقایسه میانگین‌های اثر متقابل این دو فاکتور

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های وزن مواد جعبه شماره ۱ در اثر متقابل ولتاژ در فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ

میانگین‌های وزن مواد جعبه شماره ۱ (گرم)			ولتاژ (کیلو ولت)
فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ (سانتی‌متر)			
۲۱	۱۵	۹	
۱۵۹/۷ ^f	۱۸۹/۶ ^e	۲۲۵/۰ ^c	۲۰
۱۸۴/۸ ^e	۲۲۱/۶ ^c	۲۵۹/۰ ^b	۳۰
۲۰۸/۳ ^d	۲۳۰/۸ ^c	۲۸۹/۳ ^a	۴۰

برای هر متغیر، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های وزن مواد جعبه شماره ۱ در اثر متقابل ولتاژ در زاویه الکترودهای واحد جداساز

میانگین‌های وزن مواد جعبه شماره ۱ (گرم)			ولتاژ (کیلو ولت)
زاویه الکترودهای واحد جداساز (درجه)			
۴۰	۳۰	۲۰	
۲۰۷/۱ ^d	۲۱۳/۶ ^d	۱۵۳/۶ ^f	۲۰
۲۴۱/۰ ^c	۲۶۲/۱ ^b	۱۶۲/۲ ^{ef}	۳۰
۲۹۳/۴ ^a	۲۶۹/۲ ^b	۱۶۵/۸ ^e	۴۰

برای هر متغیر، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۵. مقایسه میانگین‌های وزن جعبه شماره ۱ در اثر متقابل فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ در زاویه الکترودهای واحد جداساز

میانگین‌های وزن مواد جعبه شماره ۱ (گرم)			فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ (سانتی‌متر)
زاویه الکترودهای واحد جداساز (درجه)			
۴۰	۳۰	۲۰	
۳۰۶/۸ ^a	۲۹۵/۲ ^b	۱۷۱/۳ ^g	۹
۲۵۰/۳ ^c	۲۳۴/۰ ^d	۱۵۷/۱ ^h	۱۵
۱۸۴/۴ ^f	۲۱۵/۲ ^e	۱۵۳/۱ ^h	۲۱

برای هر متغیر، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

بین سه ولتاژ (جدول ۲) نشان می‌دهد، افزایش ولتاژ منجر به کاهش وزن مواد موجود در این جعبه می‌گردد. با توجه به مطالب گفته شده در بحث تأثیر ولتاژ در جعبه شماره ۱ این

نتایج تحلیل با آزمون دانکن نشان داد ولتاژها، فاصله‌ها و زاویه‌های مختلف دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بر وزن مواد جعبه شماره ۲ می‌باشند (جدول ۱). مقایسه

اختلاف معنی داری وجود ندارند. از آنجا که فراهم کردن ولتاژ ۳۰ کیلو ولت ساده تر و کم هزینه تر است، این ولتاژ ترجیح داده می شود. بین این ولتاژها و ولتاژ ۲۰ کیلو ولت اختلاف به صورت معنی دار است. این نتیجه گیری با نتایج (2009) Dascalescu *et al* و (2010) Saeki و (2009) Tilmatine & Bendimerad *al* مطابقت دارد.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد فواصل مختلف الکتروتود در واحد باردارکننده باعث ایجاد اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد می گردد (جدول ۱). در مقایسه بین سه فاصله الکتروتود مشخص گردید، با کاهش فاصله الکتروتودها وزن مواد موجود در جعبه شماره ۴ افزایش می یابد، به طوری که در فاصله ۲۱ و ۱۵ سانتی متر نسبت به ۹ سانتی متر کاهش ۱۸ و ۱۱/۵ درصدی در وزن جعبه شماره ۴ مشاهده می گردد (جدول ۲). نتایج آنالیز با آزمون دانکن در جدول مقایسه میانگینها نیز نشان داد فاصله های مختلف الکتروتود دارای اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد می باشند (جدول ۲). در مقایسه بین سه زاویه الکتروتود مشخص است، با افزایش زاویه الکتروتودها وزن مواد در جعبه شماره ۴ افزایش می یابد، به طوری که در زاویه ۳۰ درجه نسبت به ۲۰ درجه افزایش ۱۵/۳ درصدی و در فاصله ۴۰ درجه نسبت به ۲۰ درجه افزایش ۲۶/۵ درصدی مشاهده می گردد. نتایج آنالیز با آزمون دانکن در جدول مقایسه میانگینها نیز نشان داد زاوایای مختلف الکتروتود دارای اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد می باشند (جدول ۲). بررسی مقایسه میانگینهای اثر متقابل فاصله الکتروتودهای واحد تریبوشارژ در زاویه الکتروتودهای واحد جداساز نشان داد با افزایش زاویه در فواصل ثابت الکتروتودهای واحد تریبوشارژ، وزن مواد با ناخالصی حداکثر در جعبه شماره ۴ افزایش می یابد. همچنین با ثابت در نظر گرفتن زاویه، هر چه فاصله الکتروتودها افزایش یابد وزن مواد در این جعبه افزایش می یابد. بیشترین وزن مواد مربوط به ترکیب فاصله ۹ سانتی متر در زاویه ۴۰ درجه با میانگین ۱۱۰/۱ گرم و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب فاصله ۲۱ سانتی متر در زاویه ۲۰ درجه با میانگین ۷۲/۷ گرم می باشد (جدول ۶). بنابراین با کاهش فاصله الکتروتودهای واحد تریبوشارژ، چون ناخالصی های مواد اولیه تحت میدان الکتریکی بار مثبت بیشتری می گیرند و همچنین با افزایش زاویه الکتروتودهای واحد جداساز، گرایش این مواد به سمت الکتروتود منفی باعث سقوطشان در فاصله دورتری از مرکز می شود، وزن مواد در جعبه شماره ۴ افزایش می یابد.

کاهش وزن به دلیل افزایش وزن مواد در جعبه شماره ۱ است. در مقایسه بین سه فاصله الکتروتود مشخص گردید، با افزایش فاصله الکتروتودها وزن مواد موجود در جعبه شماره ۲ افزایش می یابد (جدول ۲). همچنین با افزایش زاویه بین الکتروتودها از ۲۰ به ۳۰ درجه وزن مواد در این جعبه کاهش می یابد و با افزایش زاویه از ۳۰ به ۴۰ درجه کمی افزایش می یابد.

مواد جمع آوری شده در جعبه شماره ۳ دارای میانگین خلوص ۴۰ درصد بود و نیاز است، مجدداً از دستگاه عبور داده شوند. نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان می دهد، اثر اصلی متغیرهای مستقل و اثرات متقابل بر وزن مواد جعبه شماره ۳، در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار می باشند. در مقایسه بین سه ولتاژ به روشنی مشخص است، افزایش ولتاژ منجر به کاهش وزن مواد در جعبه شماره ۳ گردید، همچنین فواصل مختلف دو الکتروتود واحد تریبوشارژ دارای اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد می باشند (جدول ۱). به طوری که در فاصله ۲۱ سانتی متر نسبت به ۹ سانتی متر کاهش ۱۳ درصدی و در فاصله ۱۵ سانتی متر نسبت به ۹ سانتی متر کاهش ۲۱/۴ درصدی مشاهده می گردد، با کاهش فاصله بین دو الکتروتود واحد باردارکننده مواد بار بیشتری دریافت می کنند و هنگام عبور در واحد جداساز تمایل بیشتری به سمت الکتروتودها پیدا می کنند و در فاصله دورتری از مرکز جعبه جمع آوری مواد سقوط می کنند. نتایج حاصل از جدول ۲ مقایسه میانگینها نشان دهنده ی این موضوع است.

خلوص مواد در جعبه شماره ۴ کمتر از ۶ درصد است. تجزیه واریانس وزن های اندازه گیری شده جعبه شماره ۴ مربوط به سه ولتاژ اعمال شده به الکتروتودها در فواصل الکتروتودهای واحد شارژ کننده و زاوایای مختلف الکتروتودهای واحد جداساز در جدول ۱ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، اثرات ساده تمام فاکتورهای مورد مطالعه و تنها اثر متقابل دو متغیر فاصله الکتروتودهای واحد شارژ کننده و زاویه الکتروتودهای واحد جداساز در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار شد. جدول ۲ نتایج آزمون چند دامنه ای دانکن را برای مقایسه میانگین وزن مواد جعبه شماره ۴ در سطوح فاکتورهای مختلف در سطح ۵ درصد نشان می دهد. به طور کلی افزایش ولتاژ منجر به افزایش وزن مواد موجود در این جعبه گردید به طوری که در ولتاژ ۳۰ و ۴۰ کیلو ولت نسبت به ولتاژ ۲۰ کیلو ولت افزایش ۱۰/۳ و ۱۰/۸ درصدی در وزن جعبه شماره ۴ مشاهده می گردد (جدول ۲). بین ولتاژهای ۳۰ و ۴۰ کیلو ولت در سطح احتمال ۵ درصد

جدول ۶. مقایسه میانگین‌های وزن جعبه شماره ۴ در اثر متقابل فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ در زاویه الکترودهای واحد جداساز

میانگین‌های وزن مواد جعبه شماره ۴ (گرم)			فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ (سانتی‌متر)
۴۰	۳۰	۲۰	
۱۱۰/۱ ^a	۹۴/۹ ^b	۸۱/۷ ^c	۹
۹۴/۸ ^b	۸۶/۴ ^c	۷۵/۸ ^d	۱۵
۸۱/۷ ^c	۸۴/۱ ^c	۷۲/۷ ^d	۲۱

برای هر متغیر، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

نتیجه گیری

با استفاده از دستگاه تریبوایروالکترواستاتیک برای جداسازی دانه‌های گیاهی ریز (خاکشیر) از ناخالصی‌ها، می‌توان دانه‌هایی با خلوص بالای ۹۸٪ تولید کرد.

در ارزیابی کار دستگاه مقدار بهینه فاکتورهای موثر در عملکرد دستگاه ولتاژ و فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ تعیین گردید و نتایج نشان داد که در محدوده ولتاژها و فواصل الکترودهای بررسی شده، ولتاژ ۴۰ کیلو ولت و فاصله ۹ سانتی-متر بالاترین وزن و بهترین خلوص را در جعبه شماره ۱ و بالاترین میزان ناخالصی از نظر کیفیت و کمیت در جعبه شماره ۴ را دارا می‌باشند.

نمادها

- F نیروی وارد بر ذره (نیوتن)
 E شدت میدان الکتریکی (نیوتن بر کولن)
 q بار ذره (کولن)
 V ولتاژ اعمالی به الکترودها (ولت)
 d فاصله بین دو الکترودها (سانتی متر)
 F_e نیروی الکتریکی (نیوتن)
 F_g نیروی گرانشی (نیوتن)
 r شعاع (سانتی متر)
 σ چگالی بار سطحی (کولن بر سانتی متر مربع)
 ρ جرم مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
 g شتاب جاذبه ثقل (متر بر مجذور ثانیه)

REFERENCES

- Aman, F. Morar, R. Kohnlechner, R. Samuila, A. & Dascalescu, L. (2004). High-voltage electrode position: a key factor of electrostatic separation efficiency. *Journal of IEEE Transactions. on Industry Applications*, 40(3), 905 – 910.
- Bendimerad, S. E., Tilmatine, A., Karim Medles, K., Miloudi, M., Brahami, Y. & Dascalescu, L. (2013). Robustness testing of a free-fall triboelectric separation process for plastic waste recovery. *Journal of Sustainable Engineering*, 7(4), 284-292.
- Dascalescu, L., Fati, O., Dragan, C., Radu, M., Calin, L. & Samuila, A. (2009). Tribo-aero-electrostatic Separation of ABS and ABS-PC from Granular Waste Electric and Electronic Equipment. France.
- Dodbiba, G., Shibayama, A., Miazaki, T. & Fujita, T. (2003). Triboelectrostatic separation of ABS, PS and PP plastic mixture. *Journal of Transactions*, 44, 161-166.
- Iuga, A., Calin, L., Neamtu, V., Mihalcioiu, A. & Dascalescu, L. (2005). Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device. *Journal of Electrostatics*, 63, 937 – 942.
- Hemery, Y., Holopainen, U., Lampi, A. M., Lehtinen, P., Nurmi, T., Piironen, V., Edelmann, M. & Rouau, X. (2011). Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part II: Electrostatic separation of particles. *Journal of Cereal Science* 53: 9-18.
- Kaufman, J.G. (2000) *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. ASM International.
- Kawamoto, H. (2008). Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic traveling-wave field. *Journal of Electrostatics* 66: 220-228.
- Knoll, F. S. & Taylor, J. B. (1984). Advanced in Electrostatic Separation. In: SME Preprint. 21, 84 – 71.
- Leonov, V. S. (1984). Divisibility Criteria During Electrical Separation. 4, 47-49.
- Li, T. X., Ban, H., Hower, J. C., Stencel, J. M. & Sario, K. (1999). Dry Triboelectrostatic Separation of Mineral Particles: A Potential Application in Space Exploration. *Journal of electrostatics*, 47, 133 – 142.

- McDonald, M. B. & Copeland, L. O. (1997) *Seed Production: Principles and Practices*. International Thomson Publishing. New York.
- Moore, A. D. (1973) *Electrostatics and its Applications*. New York: Wiley.
- Nayfeh, M. H. & Brussel, M. K. (1985). *Electricity and magnetism*. New York: Wiley
- Park, C. H. & Jeon, H. S. (2009). Triboelectrostatic Separation for Recycling of Seaweed-Drying Net Frame Plastic Wastes. *Journal of Materials Transactions*, 50(3), 644 – 649.
- Rahou, F., Tilmatine, A., Bilici, M. & Dascalescu, L. (2013). Numerical Simulation of the Continuous Operation of a Tribo-aero-electrostatic Separator for Mixed Granular Solids. *Journal of Electrostatic*, 71(5), 867–874.
- Ralston, O. C. (1961). Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids. *Journal of Elsevier*, Amsterdam.
- Saeki, M. (2010). Triboelectric separation of binary plastic mixture. *Journal of Engineering and Technology*, 47, 922.
- Tilmatine, A. & Bendimerad, S. (2009). Plastic wastes recovery using electrostatic forces. *Journal of Springer*. 4(4), 446–450.
- Vaughan, C. & Delouche, J. (1967). *Seed Processing and Handling*. Missouri Agricultural press. Handbook. USA.
- Ward, D. D. (1999). Electrostatic Discharge. In: *Proceedings IEE Seminar on The How and Whys of EMC Design*, 41 – 48.
- Xin-xi, Z., Dai-yon, D., Bing, T., Jin-song, W., Feng, D., Hai-sheng, L. & Rui-xin, M. (2009). Research on the triboelectrostatic separation of minerals from coal. *Journal of Procedia Earth and Planetary Science*, 1, 845 – 850.