

## Design, Fabrication and Evaluation of Electrostatic Separator System for Separating of Material Other Grain (MOG) in Agriculture Crops (A Case Study of Wheat Straw Separation from Wheat Grain)

MOHAMMAD JAFARI<sup>1</sup>, GOLAMREZA CHEGINI<sup>2\*</sup>

1. Agriculture Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran
2. Agrotechnology Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran  
(Received: Aug. 26, 2019- Revised: Sep. 16, 2019- Accepted: Sep. 18, 2019)

### ABSTRACT

Seed and grain separation is one of the most important steps in the post-harvest process of agriculture crops. The electrostatic method is applicable for the separation of seed from impurities when conventional methods cannot be used. In this study, a rotating electrostatic separating system with a corona electrode using a high-voltage electric field was designed and evaluated to separate grain from straw particles. The wheat and straw particles vent on belt conveyor and passed through the corona zone under the wired electrode. Each particle gained a certain amount of charge based on its electrical properties. The charged particles passed through the electric field generated by the static electrode as they moved along the ground and rotating cylinder. The resultant force due to the difference in the charge of the particles and the difference in their volume mass caused the difference in the direction of movement of the particles and poured them down into four groups of different boxes. Experiments were carried out at four levels of voltage and three levels of rotational speed of cylinder. Results showed that increasing the voltage from 10 to 25 kV and increasing the speed up to 70 rpm achieved the highest recovery and purity of grain and straw in the specified boxes embedded under the machine.

**Keywords:** Electric Field, Corona Discharge, Rotating Cylinder, Rotational speed

## طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه جداکننده الکترواستاتیکی ناخالصی‌های غیردانه‌ای محصولات کشاورزی (مطالعه موردی: جداسازی ذرات کاه از دانه گندم)

محمد جعفری<sup>۱</sup>، غلامرضا چگینی<sup>۲\*</sup>

۱. گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، و محقق مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، خرم آباد، ایران

۲. گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۶/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۲۷)

### چکیده

جداسازی بذر و دانه از مهمترین مراحل فرآوری در فرآیند پس از برداشت محصولات کشاورزی است. روش الکترواستاتیکی برای جداسازی ذرات در محصولاتی که به روش معمول قابل جداسازی نیستند؛ کاربردی و قابل توسعه است. در این پروژه یک سامانه جداساز الکترواستاتیکی چرخان با الکتروود کرونا و میدان الکتریکی فشار قوی برای جداسازی ذرات دانه و کاه، طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت. ذرات دانه و کاه ریخته شده بر روی یک نقاله تسمه‌ای از ناحیه کرونا، در زیر الکتروود سیمی عبور می‌کرد. هر ذره بر اساس خواص الکتریکی و بار مشخص ضمن حرکت بر روی استوانه چرخان زمینی، از داخل میدان الکتریکی نیز می‌گذشت. نیروی برآیند ناشی از اختلاف بار الکتریکی ذرات و تفاوت جرم حجمی آن‌ها منجر به اختلاف مسیر حرکت ذرات شده و آن‌ها را در چهار گروه از جعبه‌های متفاوت از هم قرار می‌داد. آزمایش‌ها در چهار سطح ولتاژ و سه سطح سرعت دورانی انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ولتاژ از ۱۰ تا ۲۵ کیلوولت و افزایش سرعت تا ۷۰ rpm بیشترین بازیابی و خلوص دانه و کاه در جعبه‌های مشخص تعبیه‌شده در زیر دستگاه را در بر داشت.

واژه‌های کلیدی: میدان الکتریکی، تخلیه کرونا، استوانه چرخان، سرعت دورانی

### مقدمه

دارای پیچیدگی‌های خاص خود هستند (Strakšas, 1994). لذا جدایش آن‌ها مستلزم شناسایی اندازه سطوح رویه و خواص الکتریکی آن‌هاست. به‌منظور جداسازی مؤثرتر بذرهای نامطلوب، باید ترکیبی از روش‌های الکتریکی و مکانیکی را به کار برد روش‌های نوین در فرآیند جداسازی بذر از ناخالصی‌ها استفاده از جداکننده‌های الکترواستاتیکی است. در این جداکننده‌ها، از اختلاف در خصوصیات الکتریکی بذرهای سالم و سایر ناخالصی‌ها استفاده شده و محصولاتی را که با روش‌های معمول دیگر قابل جداسازی نیستند، جدا می‌نمایند. این جداکننده‌ها قادرند بذرهایی را که دارای خصوصیات فیزیکی مشابه با بذر اصلی اما در رفتار الکتریکی متفاوت هستند؛ جدا نماید. علاوه بر آن درصد جوانه‌زنی آن‌ها را نیز بهبود یابد (Sarmadnia et al., 1997). اصولاً جداسازی الکترواستاتیکی روشی بر اساس جذب یا دفع متفاوت ذرات باردار، بر اساس خواص دی‌الکتریک آن‌ها در یک میدان الکتریکی بسیار قوی است که علاوه بر قابلیت رسانایی ذره به مقدار رطوبت آن نیز بستگی دارد (Harmond et al., 1968). در این روش علاوه بر نیروهای مکانیکی وارد بر ذره، نیروی مؤثر

تولید دانه، بنیاد کشاورزی اولیه و تمدن‌های بشری را تشکیل می‌دهد (سرمدنی، ۱۳۷۶). اهمیت بذر نه تنها برای کشت، بلکه منبع اصلی و ماده خام بسیاری از صنایع غذایی نیز به حساب می‌آید (Harmond et al., 1968). در تولیدات کشاورزی، درجه مطلوبیت تولید و جایگاه کیفی هر محصول به عنوان کیفیت تعریف می‌شود. این مشخصه‌ها وابسته به خلوص، خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی و متأثر از حجم مواد مغذی و زمان انبارداری آن‌ها است (Miller and Copeland, 1997). اصلی‌ترین خواص مؤثر بر خالص‌سازی دانه‌ها ابعاد، شکل، جرم حجمی، بافت، سرعت حد، ضریب ارتجاعی، رنگ و هدایت الکتریکی است (Basiry et al., 2012). انواع تمیزکننده‌های بذور که بر اساس مشخصه‌های فیزیکی و ابعادی دانه‌ها کار کرده و در بعضی موارد به مکانیسم‌های بادی نیز مجهز می‌شوند، توانایی جداسازی بذور از ناخالصی‌ها را دارند؛ اما در مواردی که ابعاد و وزن ناخالصی‌ها نزدیک به بذور می‌شود تمیز کردن بذور مطلوبیت لازم را دارا نیست (Basiry et al., 2012., Zakareckas et al., 1999). همچنین این ترکیب الک و صفحه‌های بادی علاوه بر گران بودن

در این پژوهش مشخص شد که در دو نوع کرونا منفی و مثبت کرونا منفی به دلیل داشتن ولتاژ تخلیه بالاتر در فرآیندهای جداسازی با روش کرونا؛ بر نوع مثبت ترجیح داده می‌شود. در آزمون بارداری به روش کرونا، ولتاژ ۱,۳ برابری کرونا منفی نسبت به نوع مثبت در شرایط کاملاً یکسان را گزارش گردید (Dascalescu *et al.*, 1994). بیشینه جریان کرونا الکترود سوزن - صفحه در یک رابطه تجربی توسط لاما و همکاران به صورت زیر ارائه شد:

$$I_{Max} \propto \frac{V_s(V_s - V_t)}{d^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $V_s$  و  $V_t$  به ترتیب ولتاژ تخلیه و ولتاژ آستانه کرونا،  $d$  فاصله بین دو الکترود سوزن با صفحه و  $I_{Max}$  بیشینه جریان قبل از تخلیه می‌باشد. بنابراین در این فرآیند افزایش ولتاژ منجر به افزایش جریان مجاز می‌گردد (Lama *et al.*, 1974). ترکیب انواع الکترودهای کرونا در جداسازی الکترواستاتیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. در هر دو نوع جداکننده استوانه‌ای و تسمه‌ای بارداری شدن ذرات نارسا با الکترود دوگانه استوانه و سیم متصل به آن؛ که هر دو متصل به ولتاژ بالاست شکل می‌گیرد (Reguig *et al.*, 2017). لارنتو ماریوس با کاربرد یک الکترود تک سیم متصل به استوانه فلزی (شکل ۲-۱۰) بر روی یک سیلندر چرخان به عنوان جداکننده الکترواستاتیکی مواد دانه‌ای، مشخص نمود که کارکرد این الکترود نسبت به نوع سوزنی در هندسه توزیع متفاوت بار یونی شامل فواصل اتصال و ولتاژ تغذیه الکتریکی بر روی محصول عملکرد بهتری داشته است. حداکثر ولتاژ کرونا در این سامانه جداکننده در دامنه ۱۸ تا ۳۰ کیلوولت در نظر گرفته و در ارتفاع و فاصله‌های مختلف الکترود از صفحه و ولتاژهای متفاوت، مقدار جریان کرونا، اندازه‌گیری گردید (Dumitran *et al.*, 2010). در کاربرد وسیع جداکننده الکترواستاتیکی کرونا با استوانه چرخان، یک میدان الکتریکی قوی بین یک الکترود متصل به زمین و یک یا چند الکترود که به منبع تغذیه ولتاژ بالا وصل شده باشند به وجود می‌آید. در این سیستم تخلیه الکترونی از الکترود کرونا برای بردار کردن مواد نارسا استفاده می‌شود و کنترل و ردیابی ذرات رسانای دارای بار الکتریکی القایی نیز تأمین می‌شود (Dascalescu, 1998). این جداکننده‌ها به نوعی در جداسازی ذرات فلزی ریز و ذرات دانه‌ای پلاستیک در بازیافت مواد صنعتی استفاده شده است (Li *et al.*, 2007; Reguig *et al.*, 2017). در هر دو نوع جداکننده تسمه‌ای و استوانه‌ای بردار کردن ذرات با الکترودهای دوگانه (سیم و نگه‌دارنده) متصل به جریان ولتاژ بالا

الکتریکی ناشی از بردار شدن ذرات به روش‌های مختلف بمباران یونی، القایی و مالشی است. دامنه کاربرد این روش علاوه بر دانه‌های کشاورزی در جداسازی ذرات معدنی، بازیافت و استخراج مواد آلی در صنایع غذایی است (Reguig *et al.*, 2017). فن جداسازی الکترواستاتیک همچنان در تمیز کردن نهایی دانه‌ها و بذور مورد استفاده قرار گرفته است (Kazimirchuk and Xziretdinov, 1995; Pozeliene and Lynikiene, 1998). بمباران یونی به روش کرونا سریع‌ترین روش برای بردار کردن ذرات است. البته این بردار شدن ذرات ممکن است در دو یا سه مرحله نیز انجام گیرد؛ یا اینکه ترکیبی از تخلیه کرونا و تریبوالکترواستاتیک باشد (Niels, 2005). بیشترین امکان بردار شدن سطوح ذرات در روش بمباران یونی (تخلیه کرونا) وجود دارد (Knoll *et al.*, 1988; Kelly *et al.*, 1989). در این روش یک الکترود یونیزه کننده متصل به منبع ولتاژ بالا مولکول‌های گاز (هوا) را در محدوده اطراف خود یونیزه نموده و این یون‌ها ذرات را با بمباران یونی بردار می‌کنند. در یک تحقیق دو روش جداسازی تریبوالکترواستاتیک و تخلیه کرونا برای جداسازی آلومین از سیوس گندم از ترکیب پلاسمایی لیپولایز (رطوبت ۲٪) و ترکیب معمولی (رطوبت ۱۰٪) آن استفاده شد. که در آن جداسازی ۹۷,۶ درصد سیوس و ۶۷,۳ درصد آلومین از ترکیب عادی آن در جداسازی به روش کرونا ممکن شد (Dascalescu *et al.*, 2010). مقاومت جریان الکتریکی در مواد نارسا نسبی بوده و این مقاومت با افزایش ولتاژ الکتریکی کاهش پیدا می‌کند. گازها هم که عموماً از زمره مواد نارسا به شمار می‌روند، بسته به نوع گاز، دما و فشار دارای نارسایی متفاوتی هستند. هوا از زمره این گازهاست که در معرض افزایش اختلاف پتانسیل مشخص در بین دو الکترود رسانایی آن افزایش یافته و چنانچه این افزایش پتانسیل از حدی فراتر رود، تخلیه کرونا به شکل هاله الکترونی اتفاق افتاده و مولکول‌های آن بسته به شدت پتانسیل الکتریکی و فواصل آن‌ها از الکترود کرونا با شدت‌های متفاوتی یونیزه می‌شوند. کرونا در قسمت‌های نازک و باریک الکترود، به دلیل افزایش گرادین میدان الکتریکی، با شدت بیشتری اتفاق افتاده و ناحیه روشن‌تری را به وجود می‌آورد که در بعضی موارد قابل رؤیت است. لذا بر اساس همین پدیده سه نوع الکترود؛ سوزنی، سیمی و صفحه‌ای با لبه تیز در فرآیندهای جداسازی بیشتر وجود دارند (Bendaoud *et al.*, 2005). بر اساس تحقیقات (Iuga 2001) *et al.* جریان شکست الکترود سیمی نسبت به دو نوع تیغه‌ای و سوزنی کمتر بوده اما آستانه ولتاژ تخلیه بالاتر و ولتاژ شکست پایین‌تری نسبت به دو نوع دیگر خصوصاً سوزنی داشت که منجر به افزایش شدت کرونا و یونیزه شدن سریع‌تر شده است. همچنین

با سه جفت سیم افقی و در نوع سقوط آزاد یک ردیف ۹ تایی سیم افقی استفاده شد. نتایج نشان داد که هم در فرآیند جدایش و هم در فرآیند افزایش جوانه‌زنی، مکانیسم نوع غلتکی عملکرد بهتری در همه شرایط داشته است (Butunoi, 2011). آزمایشی بر روی پروسه جداسازی الکتریکی کلزای زمستانه بر روی یک نمونه اولیه انجام شد. دستگاه مجهز به یک نوار نقاله تخلیه بود که ذرات از مخلوط (دانه) را با یک پتانسیل الکتریکی مناسب شارژ می‌کرد. دانه‌های خارج شده از مخزن بر روی نوار نقاله جداسازی قرار می‌گرفتند و از ناحیه زیر الکتروود کرونا حرکت می‌کردند. سطح ولتاژ بالای الکتروود از منبع تغذیه تأمین‌شده و دانه‌ها با تخلیه الکترونی کرونا باردار شدند. در این فرآیند، دانه‌های آسیب‌دیده بار بیشتری دریافت کرده و توسط میدان الکتریکی تسمه با بار مخالف جذب شده و با حرکت تسمه به سمت بالا حرکت نموده و در ظرف بالایی قرار گرفتند. دانه‌ها بدون آسیب دارای بار کمتری بودند و غلبه نیروی ثقل بر نیروی جذب الکتریکی آن‌ها را به طرف پایین تسمه غلتاند و در ظرف پایین تسمه جداکننده ذخیره شدند (Kovalyshyn et al., 2018). این روش جداسازی برای کاربرد جداسازی محصولاتی نظیر گیاهان دارویی که با روش‌های معمول مکانیکی و پنوماتیکی امکان جداسازی کامل نداشته و یا به دلیل ابعاد ریز دانه احتمالاً ارزش اقتصادی آن مقرون به صرفه نباشد، قابلیت کاربرد با بازده اقتصادی قابل قبولی را دارد. در پژوهش‌هایی که بر روجداسازی خاکشیر از ناخالصی‌ها (افشاری‌پور و همکاران، ۲۰۱۳) انجام دادند از باردار کردن به روش مالشی در مخازن پلاستیکی استفاده شده که در حجم کم قابل قبول است. اما اگر در جداسازی تجاری حجم جداسازی افزایش پیدا کند و یا اگر در یک محصول این ناخالصی‌ها افزایش پیدا کند، روش القای بار الکتریکی با الکتروود کرونا موثرتر بوده و کاربرد بهتری خواهد داشت. مزایای این سامانه، در مقایسه با روش‌های توأم مکانیکی و پنوماتیکی، قابلیت کاهش بسیاری از مکانیزم‌های دینامیکی و همین‌طور کاهش مصرف انرژی را داشته و نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه کمتری را خواهد داشت. همچنین در روش جدایش الکترواستاتیکی می‌توان امکان تمیزش، بوجاری و بهبود آنها برای تولید بذر و افزایش جوانه زنی آن‌ها را به وجود آورد.

### مواد و روش‌ها

در تحلیل رفتار نیرویی ذرات در جداکننده‌های الکترواستاتیکی وقتی در میدان الکتریکی قرار می‌گیرند، اگر فرض بر تقریباً کروی

تأمین می‌گردد (Reguig et al., 2017). با چرخش الکتروود استوانه‌ای، در شرایط بدون میدان الکتریکی، ذرات تمایل به ترک صفحه (استوانه) رادارند؛ چراکه در سرعت‌های معمول، نیروی گریز از مرکز در سطح افق استوانه، بزرگ‌تر از نیروی ثقل بوده و ذره را از صفحه بالایی استوانه جدا می‌کند (در نقطه بالای استوانه نیروی ثقل با نیروی عکس‌العمل سطح خنثی می‌شود). در این حالت با وجود نیروی ثقل در یک مکان مشخص و بر اساس جهت و زاویه بردار برآیند سقوط می‌کند. با حضور میدان الکتریکی ذرات باردار تحت نیروی الکتریکی، ثقل و نیروی گریز از مرکز در اثر دوران استوانه قرار دارند و با توجه به مشخصات جداکننده، این نیروها شرایط جدا شدن ذره از صفحه را تعیین می‌کند. از آنجائی میزان باردارشدن الکتریکی ذرات به سطح ( $d^2$ ) آن بستگی دارد، اندازه ذرات در مقدار نیروی بلند کننده، مؤثر خواهد بود و لذا جدا کردن دامنه وسیعی از این ذرات با سطوح متفاوت را میسر خواهد نمود. در چنین شرایطی عامل جدا شدن با نسبت برآیند نیروهای الکتریکی و نیروهای گریز از مرکز، به نیروی ثقل در دو راستای عمود بر هم تعریف می‌شود (Kelly et al., 1989). در یک مطالعه بر روی هدایت الکتریکی ذرات پودری در یک جداکننده تسمه‌ای و یک استوانه چرخان باردار در یک فاصله خاص از تسمه چرخنده، مشخص شد که افزایش ولتاژ تا محدوده ۱۷ کیلوولت، درصد جدایش را بهینه نمود؛ اما سرعت خطی چرخش استوانه از ۲ تا ۱۲ سانتیمتر بر ثانیه، خلوص جدایش را از ۹۰ به ۸۳ درصد کاهش داد (Toth, R.t., et al., 2014).

در یک جداکننده الکتریکی نقاله‌ای طراحی شده (شکل ۲-۱۸) توسط Pozeliene et al. (2009) برای جداسازی بذر استفاده شد. با توجه به حجم تغذیه، شدت میدان الکتریکی حداکثر ۳۰۰ کیلوولت بر متر بود. در این سامانه جداسازی ۸۰ درصد دانه‌های کلزا<sup>۱</sup> ممکن شد. شدت میدان تخلیه کرونای الکتریکی (CDF) بر دینامیک جوانه‌زنی با کشت بذور، آزمایش و در مقایسه با شاهد تأثیر مثبت آن گزارش گردید. (Basiry et al., 2012) یک جداکننده الکترواستاتیکی نوع تسمه‌ای با دامنه ولتاژ ۸/۵ تا ۱۱/۵ کیلوولت برای جداسازی دانه‌های گندم، جو و کلزا و افزایش توان جوانه‌زنی آن‌ها بکار بردند. نتایج نشان داد که بهترین ولتاژ برای جداسازی دانه‌های چروکیده از سالم برای گندم و جو در دامنه ۱۱/۵ کیلوولت و برای کلزا ۱۰ کیلوولت است. در یک پژوهش برای تمیز و جدا کردن گندم از ضایعات آن مانند دانه چروکیده، جو دوسر و یولاف وحشی از دو روش غلتک باردار و سقوط در میدان الکتریکی استفاده شد. در نوع غلتکی از یک الکتروود کرونا

(۶) نیروی مقاومت هوا بر روی ذره

$$F_d = \frac{1}{8} \pi f_d d_v^2 \rho_f v_\infty^2 = \frac{1}{2} f_d A \rho_f v_\infty^2$$

حال اگر الکتروود (استوانه) اتصال زمین در حال دوران باشد،

یک نیروی گریز از مرکز  $F_c$  وارد بر ذره داریم که از رابطه (۳)

قابل محاسبه است. نیروی جاذبه یا گرانش مؤثر بر ماده از رابطه

(۵) به دست می‌آید. در این روابط  $d_v$  قطر متوسط ذره،  $\rho_s$

دانسیته ذره،  $m$  جرم ذره،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای روتور و  $r$  شعاع

دورانی روتور است. در رابطه (۶)  $f_d$  ضریب کشش و مقدار آن

به صلیبیت و غلظت جریان اطراف ذره بستگی دارد (Kelly et al.,

1982).  $\rho_f$  دانسیته سیال اطراف ذره،  $A$  سطح متوسط برخورد

ذره با سیال،  $v_\infty$  سرعت حرکت نسبی سیال و ذره می‌باشد. نیروی

مزبور با بزرگ شدن ذرات به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد اما در

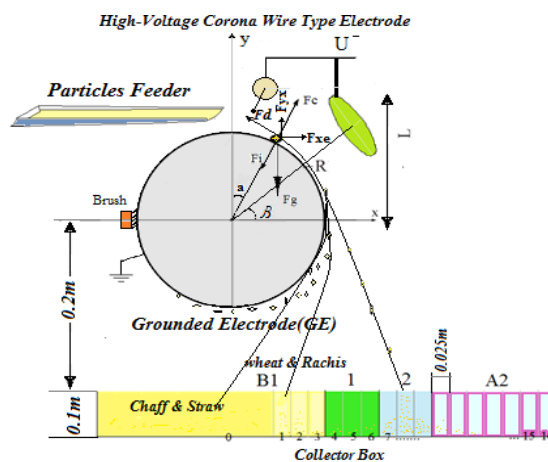
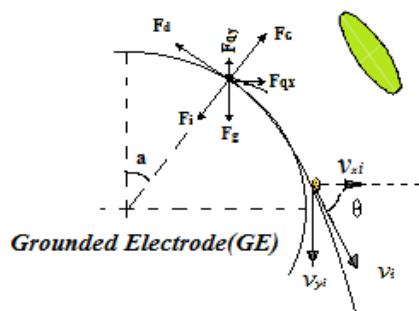
ذرات کوچک‌تر، این نیرو دارای یک محدودیت ویژه است (Kelly

et al., 1989)

شماتیک بردارهای نیرویی و بردار سرعت وارد بر ذره

در روی استوانه و بعد از جدا شدن آن در شکل (۱) نمایش

داده شده است.



شکل-۱- شماتیک پیکربندی سامانه جداکننده الکترواستاتیک با الکتروود کرونا (بردار نیروها و مسیر)

انجام گردید. نقشه ترکیبی و گسسته جداکننده الکترواستاتیک استوانه دوار در شکل ۲ آورده شده است. طرح کامل قطعات سامانه آزمایشگاهی با توجه به مشخصات تجهیزات مورد استفاده در منابع در نظر گرفته شد. اولویت طراحی با فرض اولیه در عرض ۴۰۰ میلی‌متر تغذیه مخلوط کاه و دانه در ابعاد تسمه انتقال، پهنای استوانه افقی، پهنای الکترودهای کرونا و القای میدان الکتریکی و عرض مخزن صورت گرفت. تجهیزات دوران تسمه‌نقاله و الکتروود متصل به زمین شامل موتور الکتریکی به‌عنوان منبع تأمین نیرو، تسمه‌های انتقال، پولی و یاتاقان‌های بود. این تجهیزات شامل یک منبع تغذیه DC با دامنه ولتاژ متغیر از ۵ تا

بودن آن‌ها باشد دینامی الکتریکی بر آن وارد می‌شود که اولی ( $F_e$ ) ناشی از میدان الکتریکی و در جهت خطوط میدان عمل می‌کند و دومی نیروی برهم‌کنش ذرات باردار و صفحه یا استوانه که به نیروی چسبندگی ( $F_i$ ) معروف است (Kelly et al., 1989).

نیروی ناشی از میدان و نیروی ربایش بار الکتریکی ذرات، به ترتیب از روابط (۲) و (۳) و نیروهای مکانیکی مؤثر بر ذره از روابط (۴)، (۵) و (۶) به دست می‌آید.

(۲) نیروی الکتریکی میدان

$$F_e = Q.E$$

(۳) نیروی ربایش یا چسبندگی ذرات باردار

$$F_i = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon r^2}$$

(۴) نیروی گریز از مرکز ناشی از دوران

$$F_c = \frac{1}{6} \pi d_v^3 \rho_s \omega^2 r = m r \omega^2$$

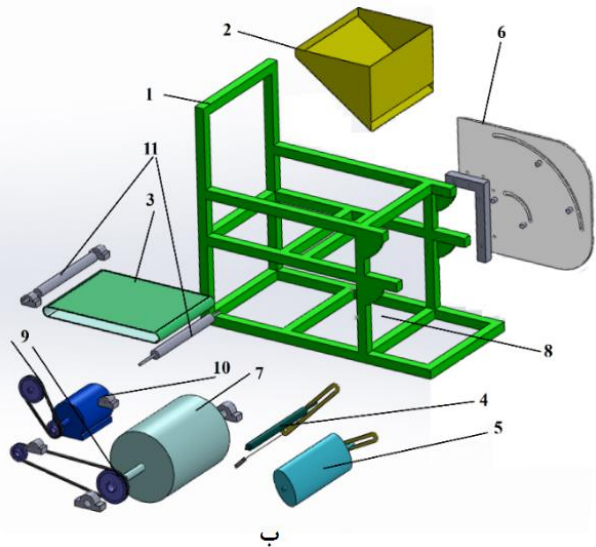
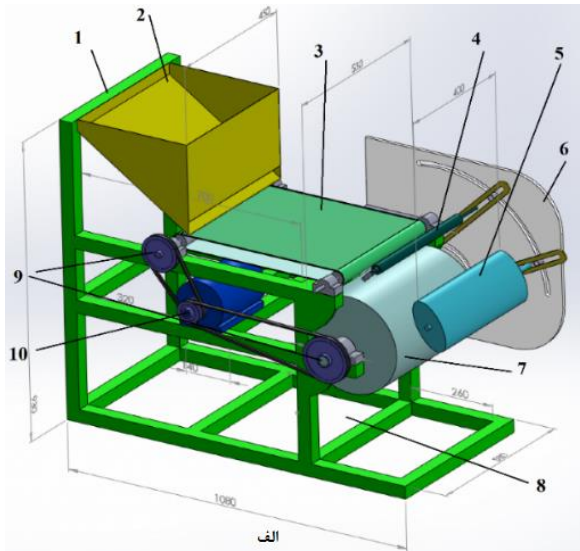
(۵) نیروی ثقل وارد بر ذره

$$F_g = \frac{1}{6} \pi d_v^3 \rho_s g = m g$$

طرح اولیه جداکننده الکترواستاتیک استوانه دوار با الگوی جداکننده‌های استوانه دوار با الکتروود کرونا و سایر تجهیزات مورد نیاز برای فرآیند باردار نمودن ذرات جداشونده با استفاده از یونیزه کردن هوا در مقطعی از مسیر عبور آن‌ها پیش‌بینی شد. برای به دست آوردن ایده کلی ساخت دستگاه ابتدا با مراجعه به منابع و سامانه‌هایی که در پژوهش‌های مشابه مورد استفاده قرار گرفته بود، ترکیبی از تجهیزات مورد نیاز برای فرآیند بارگیری و یونیزاسیون دانه‌های گندم و کاه، پیش‌بینی و اندازه و ابعاد کلی دستگاه تخمین زده شد و سپس ترسیم قطعات متناسب با این ابعاد و رعایت نکات فنی در محیط نرم‌افزاری solid work 2013

قاب و شاسی، یاتاقان و اتصالات، مخزن تغذیه مخلوط ذرات با دریچه قابل تنظیم کنترل خروجی و جعبه‌های شانزده‌گانه جمع‌آوری مواد جداشده محصول به‌اضافه یک برس جداکننده کاه و ذرات سبک چسبیده به استوانه چرخان بود.

۳۰ کیلوولت، الکتروستاتیکی تخلیه کرونا با عرض برابر با عرض تسمه تغذیه (۴۰ سانتی‌متر)، یک الکتروستاتیکی شکل القای میدان الکترواستاتیکی برای تدارک میدان الکتریکی، تسمه انتقال محصول دانه و کاه، استوانه فولادی متصل به زمین، یک موتور الکتریکی با جعبه‌دنده کاهش دور برای دوران تسمه و استوانه،

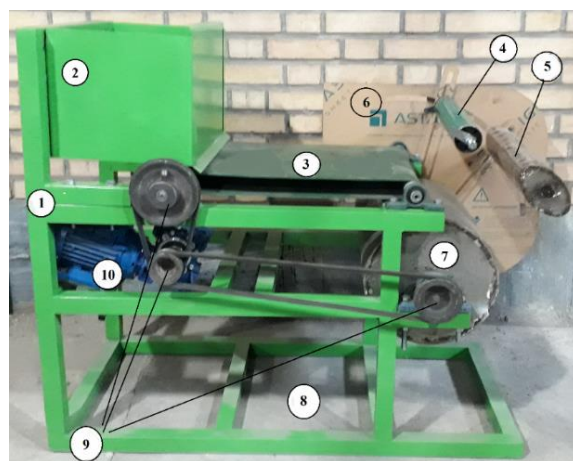


شکل ۲- الف: طرح ترکیبی و ب: گسسته سامانه جداکننده الکترواستاتیکی (کرونا) ۱- شاسی و قالب ۲- مخزن تغذیه ۳- نوار نقاله ۴- الکتروستاتیکی کرونا ۵- الکتروستاتیکی میدان (الکترواستاتیکی) ۶- صفحه مدرج عایق و بازوهای نگهدارنده ۷- استوانه (الکتروستاتیکی) زمین و منبع تغذیه ۸- محل نصب مخازن جمع‌آوری ۹- اجزای انتقال توان (تسمه و پولی) ۱۰- موتور الکتریکی

حرکت نقاله بودند. به‌منظور تأمین سرعت‌های متفاوت تسمه انتقال و دوران استوانه از یک موتور الکتریکی گیربکس دار به انضمام یک دستگاه مبدل سرعت (اینورتر) برای تغییر سرعت استفاده گردید. برای امکان جابجایی و تغییر زوایای الکتروستاتیکی نسبت به استوانه بازوهای شیاردار باقابلیت چرخش حداقل ۶۰ درجه بر روی یک صفحه عایق پلکسی گلس مدرج (قطعه ۶ شکل ۳) طراحی و ساخته شد.

### ساخت قطعات و مونتاژ سامانه آزمایشگاهی

به دلیل آزمایشگاهی بودن سامانه، سعی در ساختن دستگاه در حداقل ابعاد گردید. مهم‌ترین متغیرهای سامانه، به استناد منابع موجود (Younes et al., 2007)، زوایای الکتروستاتیکی کرونا و الکترواستاتیکی نسبت به محور استوانه دوار، زاویه محور الکتروستاتیکی نسبت به محور عمودی استوانه، قطر و سرعت استوانه چرخان، فاصله سیم کرونا تا الکتروستاتیکی چرخان و سرعت



شکل ۳- طرح سامانه ساخته شده جداکننده الکترواستاتیکی (کرونا) ۱- شاسی و قالب ۲- مخزن تغذیه ۳- نوار نقاله ۴- الکتروستاتیکی کرونا ۵- الکتروستاتیکی میدان (الکترواستاتیکی) ۶- صفحه مدرج عایق و بازوهای نگهدارنده ۷- استوانه (الکتروستاتیکی) زمین و منبع تغذیه ۸- محل نصب مخازن جمع‌آوری ۹- اجزای انتقال توان (تسمه و پولی) ۱۰- موتور الکتریکی

نگه‌دارنده الکتروود از جنس عایق شفاف ساخته شده تا موقعیت محل الکتروود را مشخص نماید. بازوهای عایق اتصال الکتریکی الکتروودها به شاسی و بدنه را قطع می‌کند.

۷- الکتروود استوانه‌ای متصل به زمین: از جنس استیل صیقلی ضدزنگ با قطر ۳۰۰ میلی‌متر طراحی شد (Younes *et al.*, 2007) که بر روی شاسی نصب شده و با اتصال تسمه و پولی توسط الکتروموتور دارای سرعت‌های دورانی متغیر می‌گردد.

۸- فضای جمع‌آوری ذرات: متناسب با ابعاد جعبه‌های جمع‌آوری ذرات جدا شده در روی شاسی برای استقرار آن و منبع تغذیه ولتاژ.

۹- قطعات جانبی: شامل پولی، تسمه و یاتاقان‌ها برای انتقال توان می‌باشند.

۱۰- موتور الکتریکی با توان ۴۰۰ وات دارای جعبه‌دنده تغییر سرعت و قابلیت تغییر سرعت دورانی

۱۱- استوانه‌های انتقال توان و هرزگرد نوار نقاله از جنس پلی‌اتیلن فشرده دارای اصطکاک لازم برای انتقال توان و کاهش سرش تسمه.

منبع تغذیه DC - 0-30 kV از چندین قسمت تشکیل شده است. اولین بخش، ترانسفورماتور فشارقوی طراحی شده‌ای است که پالس‌های ولتاژ ۱۲ ولت اعمال شده به سیم‌پیچ اولیه آن در سیم‌پیچ ثانویه به ۳۰ کیلوولت تبدیل می‌شود. بخش دوم منبع، مدار کنترل است. این مدار با استفاده از یک پتانسیومتر که روی جعبه تعبیه شده است، یک سیگنال کنترلی دریافت می‌کند و بر مبنای آن میزان ولتاژ اعمالی به مدار اولیه ترانسفورماتور را کنترل می‌کند. بخش سوم دستگاه، شامل مدار اندازه‌گیری ولتاژ فشارقوی است. در این دستگاه از یک مقسم فشارقوی با نسبت ۱:۲۰۰۰ استفاده شده است. بلوک دیاگرام منبع تغذیه در شکل (۴) نشان داده شده است.

مهم‌ترین قسمت منبع، ترانسفورماتور است که ولتاژ اعمال شده به سیم‌پیچ اولیه آن را، ۲۰۰۰ برابر می‌کند. ولتاژ اولیه، یک موج مربعی با فرکانس ۱۵ کیلوهرتز است. به منظور تحمل ولتاژ و جلوگیری از شکست الکتریکی در داخل ترانسفورماتور، بایستی از لحاظ عایق بودن اطمینان حاصل نمود. شماتیک این مدار در شکل (۶) نشان داده شده است. وظیفه مدار کنترل تولید موج مربعی با قطعه الکترونیکی IC 555 است. این مدار می‌تواند یک موج مربعی با فرکانس و دامنه قابل تنظیم تولید و کنترل نماید. با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری و انتخاب درست مقادیر خازن‌ها و مقاومت‌ها، می‌توان شکل موج مطلوب را تولید کرد

بعد از مشخص شدن ابعاد و ترسیم و سرهم‌بندی قطعات در محیط نرم‌افزاری اقدام به تهیه و ساخت و مونتاژ قطعات گردید که شکل کلی دستگاه در شکل (۳) آورده شده است. این تجهیزات شامل:

۱- قاب (شاسی) نگاه‌دارنده تجهیزات: از قوطی ۴۰×۴۰ میلی‌متر و جنس فولاد ST37 تا مقاومت لازم برای حمل قطعات دینامیکی و شرایط اتصالات را داشته باشد.

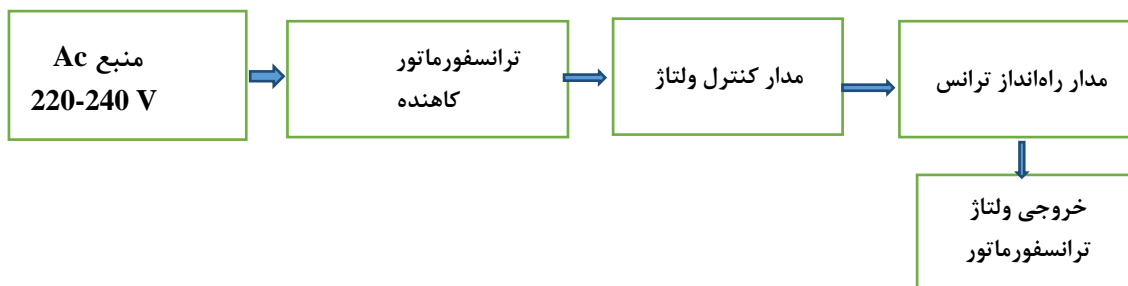
۲- مخزن تغذیه: برای تخلیه پیوسته مخلوط ذرات با دریچه کنترل کشویی و زاویه ریبوز متناسب با اکثر محصولات کشاورزی

۳- نوار نقاله: انتقال تک‌لایه ذرات به سمت الکتروودها با عرض ۴۰۰ میلی‌متر متناسب با ابعاد دستگاه و نرخ تغذیه خروجی مخزن با این مکانیسم صورت می‌گیرد. انتقال توان این نقاله از طریق تسمه و پولی و با موتور الکتریکی تأمین می‌شود.

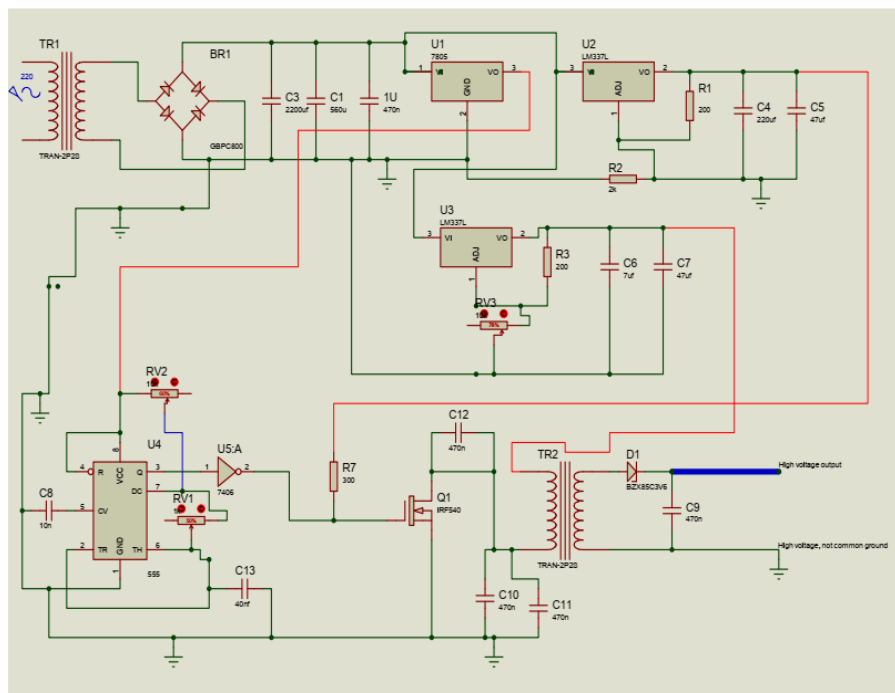
۴- الکتروود کرونا: یک استوانه فلزی به قطر ۴۰ میلی‌متر و به طول ۴۰۰ میلی‌متر برابر با پهنای تسمه است. این الکتروود که در منابع علمی به الکتروود دوگانه<sup>۱</sup> کرونا<sup>۱</sup> سیمی معروف است به منبع تغذیه ولتاژ بالا متصل می‌شود با تخلیه الکترون از سیم نازکی که به همین منظور انتخاب شده است هوای اطراف سیم را با ایجاد هاله الکترونی در یک حجم با مقطع سهمی به طرف استوانه متصل به زمین یونیزه نموده و امکان باردار شدن ذرات را میسر می‌سازد. عوامل مؤثر بر عملکرد این الکتروود قطر الکتروود و سیم، فاصله اتصال سیم به الکتروود، فاصله سیم از سطح استوانه و زاویه استقرار الکتروود کرونا نسبت به محور عمودی گذرنده از مرکز استوانه است. در این طرح قطر الکتروود و سیم و فواصل آن‌ها به استناد منابع علمی اختیار گردید (Younes *et al.*, 2007., Reguig *et al.*, 2017., Dumitran *et al.*, 2010). فاصله سیم از الکتروود کرونا ۲۰ میلی‌متر و از الکتروود زمینی ۴۰ میلی‌متر قرار داده شد.

۵- الکتروود میدان: این الکتروود که به آن الکتروود الکترواستاتیک هم می‌گویند نقش ایجاد میدان نسبتاً یکنواخت در فاصله بین خود و الکتروود زمینی یعنی فضای حرکت ذرات را به عهده دارد. برای یکنواختی میدان با مقطع بیضی‌شکل و متناسب با عرض تغذیه از جنس فلز سبک آلومینیوم طراحی گردید. این الکتروود هم به منبع تغذیه ولتاژ بالا متصل و ایجاد میدان همانم یا غیر همانم با بار ذرات، تولید می‌کرد تا مسیر حرکت ذرات را تحت تأثیر قرار دهد.

۶- صفحات عایق: صفحات مدرج به همراه بازوهای



شکل ۴- بلوک دیاگرام منبع تغذیه طراحی شده



شکل ۵- شماتیک مدار کنترل الکتریکی منبع تغذیه DC

$$MC_{wb} \% = \frac{w_t - w_p}{w_t} \times 100 \quad (\text{رابطه ۸})$$

بعد از راه اندازی اولیه دستگاه، دور و ولتاژ مورد نظر هر آزمایش در آن تنظیم و مخلوط نمونه در مخزن اولیه ریخته و در مسیر نوار نقاله به سمت الکترود حرکت می کرد. از آنجایی که ولتاژ منفی مقدار بیشتری از مولکول های هوا را یونیزه می کند به الکترود کرونای سیمی ولتاژهای منفی متصل شد. با توجه به آزمایش های صورت گرفته مشخص شد که همانام بودن الکترود میدان با الکترود کرونا ذرات کاه را که دارای بار منفی بودند به طور بهتری به عقب رانده و از ذرات دانه جدا می نمود. لذا هردوی الکترودها به یک منبع با ولتاژ منفی متصل شدند. الکترود کرونا و الکترود استاتیک به منبع ولتاژ DC متصل و به ترتیب در یک زاویه ثابت ۲۰ و ۶۰ درجه نسبت به محور عمود گذرنده از مرکز الکترود متصل به زمین تثبیت شدند. حجم تغذیه طوری در نظر گرفته شد که ذرات به صورت تک لایه از زیر الکترود کرونا عبور و

#### تهیه نمونه آزمایشی و آزمون جداسازی

مخلوط توده گندم و کاه با نسبت وزنی کاه و دانه در خوشه گندم در محدوده  $50 \pm 2$  گرم دانه و  $20 \pm 1$  گرم کاه (Kim et al., 2015) و با نسبت حجمی ۵۶ سانتی متر مکعب دانه و ۳۳۶ سانتی متر مکعب کاه (شامل کاه ساقه، کاه پوشینه و کزل) در نمونه های جداگانه آماده گردید قبل از شروع آزمایش های اصلی برای تعیین رطوبت، از دستگاه رطوبت سنج هالوژنی مدل Moisture Meter PCE-MB 210C برای اندازه گیری دقیق و سریع رطوبت مواد با روش وزن سنجی حرارتی بکار می رود استفاده شد. مخلوط نمونه های ۲۰۰ میلی گرمی دانه و کاه در داخل دستگاه در ظرف مخصوص مقاوم به حرارت قرار داده شد. مبنای کار دستگاه بر اساس افت وزن نمونه در جریان خشک شدن بر اثر تابش اشعه هالوژن به نمونه می باشد. توزین دقیق نمونه قبل و بعد از اعمال تابش در این دستگاه، مقدار رطوبت توده بر پایه تر را با رابطه (۸) محاسبه و نمایش می داد.



آن‌ها در این فواصل از استوانه با روابط (۹) و (۱۰) به شکل زیر به دست آمد.

$$REC_{gBi} = \frac{m_{gBi}}{m_{Tg}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$PUR_{gBi} = \frac{m_{gBi}}{m_{TBi}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

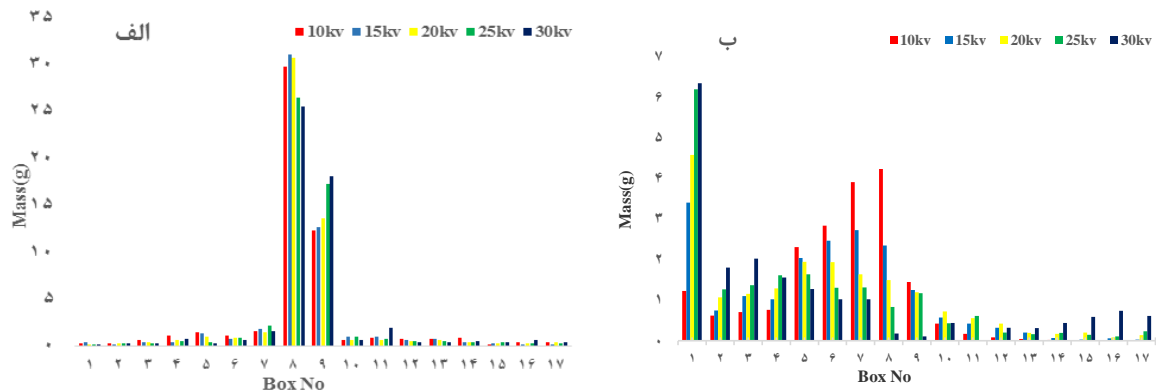
روابط  $m_{gBi}$  جرم ذرات دانه گندم در جعبه  $B_i$ ،  $m_{Tg}$  کل جرم گندم نمونه و  $m_{TBi}$  کل جرم کاه و دانه در جعبه  $B_i$  است. روابط مشابهی برای محاسبه بازیافت و خلوص ذرات کاه بکار برده شد.

### نتایج بحث

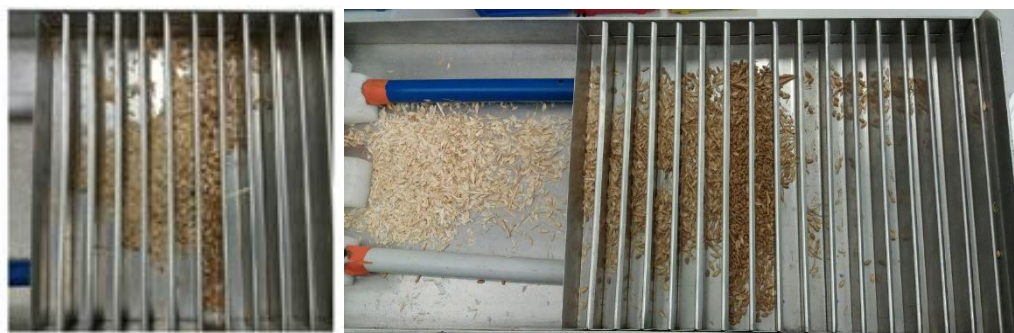
نتایج آزمایش جداسازی ذرات با اندازه‌گیری وزن ذرات دانه گندم و کاه در هرکدام از جعبه‌های شماره یک تا ۱۷ در ۵ گروه ولتاژ (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ کیلوولت) اعمالی در سرعت دورانی ۷۰ دور بر دقیقه و رطوبت ۱۰٪ دانه و ۱۵٪ کاه خوشه و همین‌طور در ولتاژ اعمالی ۱۰ کیلوولت و سه سرعت دورانی ۵۰، ۷۰ و ۹۰ دور بر دقیقه در همان سطح رطوبتی، در نمودارهای شکل ۶ و ۸ آورده شده است.

روی استوانه بریزند. از این سیستم برای بررسی تجربی موقعیت مکانی دانه‌های گندم و ذرات کاه استفاده شد. اعمال سطوح ولتاژ بالا [U(kV)] و سرعت چرخش دورانی الکتروود متصل به زمین [N(rpm)] از عوامل قابل کنترل جداساز الکترواستاتیک چرخان (RES) بود.

برای بررسی وضعیت مکانی ذرات دانه و کاه جعبه‌هایی در پایین دستگاه تعبیه شده بود. شماتیک موقعیت الکتروودها، جعبه‌های جمع‌آوری و نیروهای وارد بر ذره در شکل ۹ نشان داده شده است. مجموعه جعبه‌های جمع‌آوری با ابعاد  $400 \times 700 \times 100$  میلی‌متر، دارای ۱۶ خانه ۲۲ میلی‌متری با ضخامت لبه ۱٫۵ میلی‌متر از هر طرف، شامل ۱۳ خانه جلوتر از راستای مماس عمودی بر لبه استوانه و سه خانه به‌اضافه یک بخش ۳۰۰ میلی‌متری در انتهای عقب استوانه بود. این خانه‌ها از یک تا ۱۷ به سمت جلو شماره‌گذاری گردید. آزمایش در سه تیمار تغییر سرعت دورانی ۵۰، ۷۰ و ۹۰ دور در دقیقه استوانه دوآر، پنج دامنه ولتاژ ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ کیلوولت و با کنترل رطوبت ذرات و محیط در سه تکرار انجام شد. مجموع توده ذرات دانه و کاه هر خانه توزین و خلوص و بازیابی دانه و کاه، از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های در ولتاژ و سرعت چرخش استوانه



شکل ۶- توزیع ذرات الف: دانه گندم با رطوبت ۱۰٪ و ب: کاه با رطوبت ۱۵٪ در جعبه‌های ۱۷ تایی با سطوح ۵ گانه ولتاژ



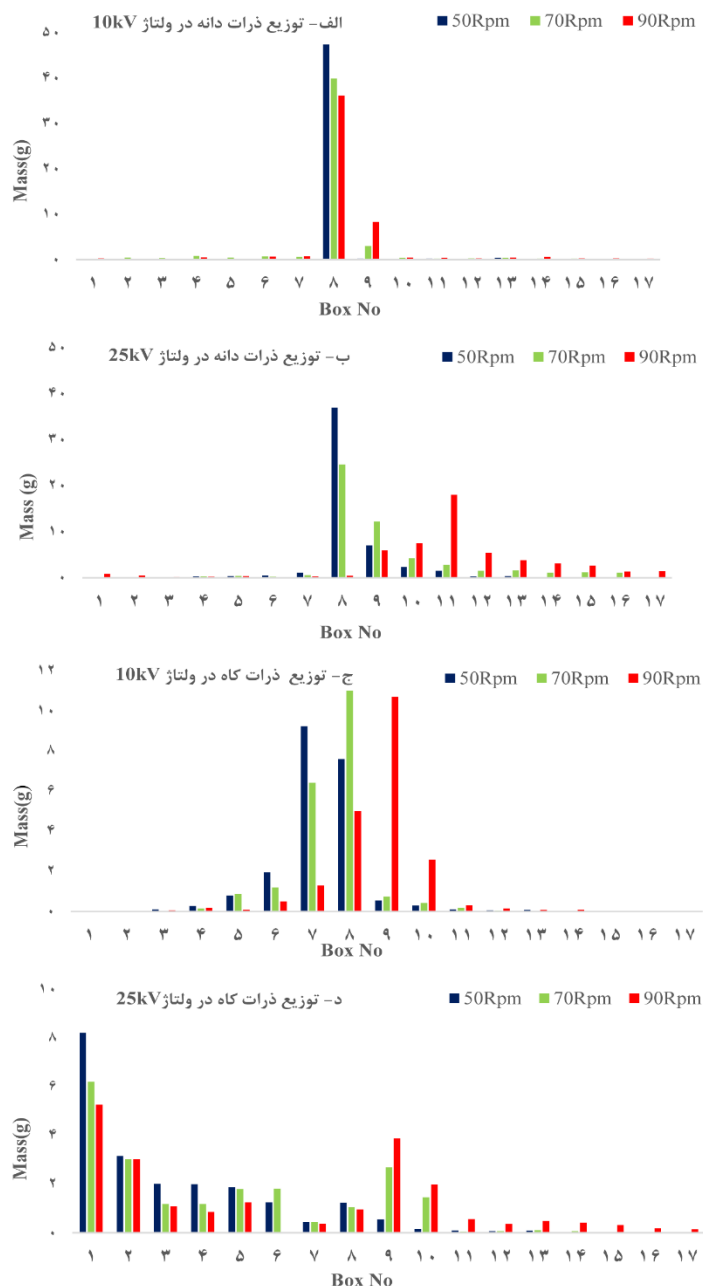
شکل ۷- تصویر توزیع ذرات دانه گندم و کاه خوشه در جعبه‌های ۱۷ تایی در سرعت دورانی ۷۰ rpm و ولتاژهای ۱۰ و ۲۵ کیلوولت

ذرات کاه به سمت عقب استوانه چرخان شد. این تغییر ناشی از افزایش نیروی الکتریکی چسبندگی ذرات کاه بوده که نهایتاً از

با توجه به نمودارهای شکل ۶ افزایش ولتاژ از ۱۰ تا ۳۰ کیلوولت منجر به حرکت ذرات دانه به سمت جلو استوانه و تمایل

دورانی منجر به افزایش ذرات دانه در جعبه‌های انتهایی و کاهش ذرات گاه در جعبه‌های اولیه در سمت چپ جداکننده گردید؛ اما افزایش ولتاژ در الکتروود کرونا و الکترواستاتیک از ۱۰ به ۲۵ کیلوولت منجر به کاهش تمرکز دانه در جعبه شماره ۸ و هدایت آن‌ها به سمت جلو به اندازه دو تا سه عدد از جعبه‌ها با عرض ۲۲ میلی‌متر گردید. همچنین این تغییر ولتاژ منجر به هدایت ذرات گاه خوشه به سمت جعبه‌های ابتدایی و نهایتاً جداسازی بهتر دانه و گاه گردید که این موضوع در سرعت دورانی ۵۰ دور در دقیقه محسوس‌تر بود.

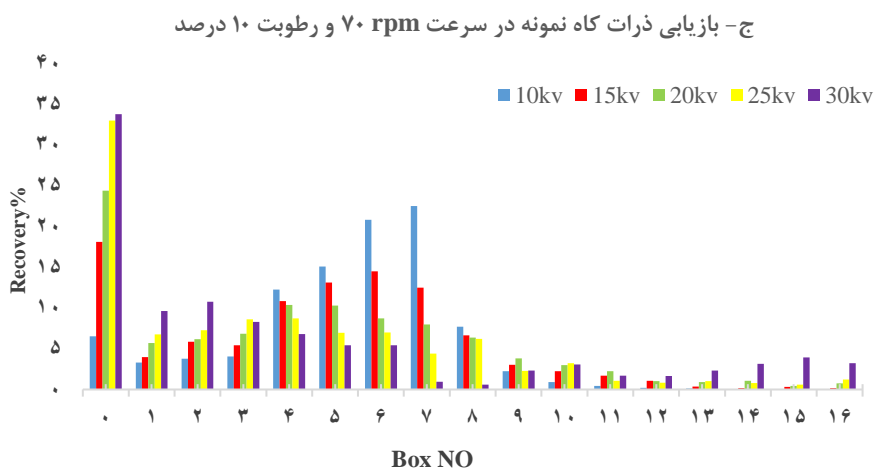
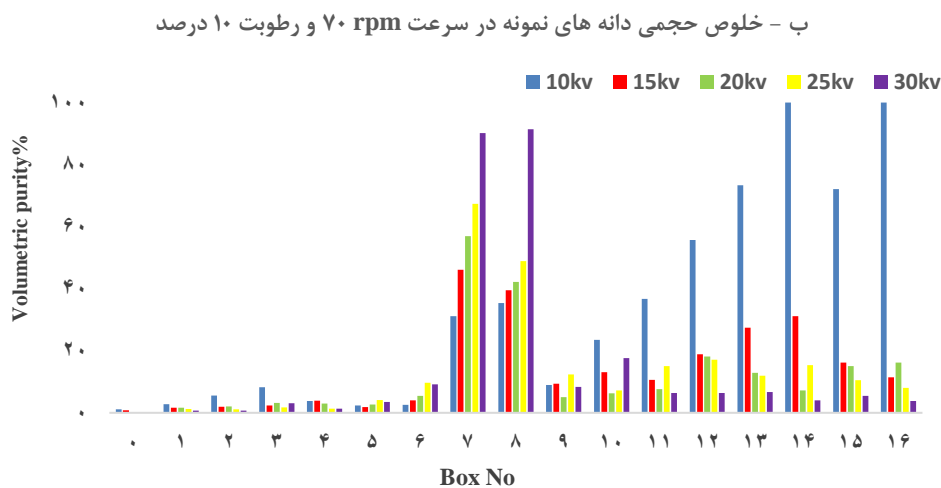
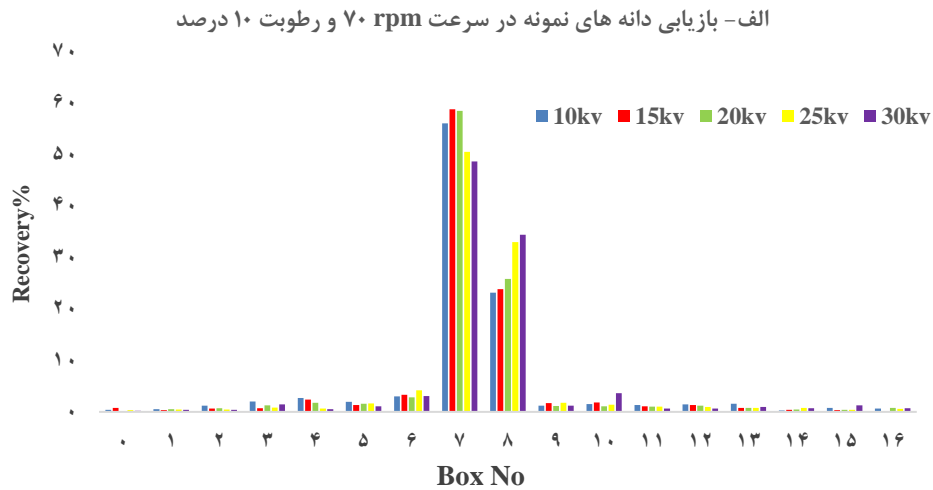
روی استوانه با برس تمیزکننده به داخل جعبه‌های انتهایی سقوط می‌کنند. تصویر شکل ۷ و نمودار شکل ۸، اثر تغییر سرعت دورانی بر جداسازی جرمی ذرات دانه و گاه را نشان می‌دهد. در این نمودارها توزیع ذرات دانه و گاه به ترتیب با رطوبت ۱۰ و ۱۵ درصد و اعمال سه سرعت دورانی ۵۰، ۷۰ و ۹۰ دور بر دقیقه در دو ولتاژ ۱۰ و ۲۵ کیلوولت مقایسه شده است. در این مقایسه مشخص شد که افزایش سرعت منجر به افزایش تمایل ذرات دانه و گاه به سمت جلو استوانه شده که این موضوع ناشی از افزایش نیروی سانتریفیوژ ناشی از دوران و تأثیر آن بر برآیند نیروهای وارد بر روی ذره در فرآیند جداسازی است. لذا افزایش سرعت



شکل ۸- توزیع ذرات دانه گندم (الف: ۱۰kV و ب: ۲۵ kV) و ذرات گاه خوشه (ج: ۱۰kV و د: ۲۵ kV) در جعبه‌های ۱۷ تایی با سه سطح سرعت دورانی

ذرات با روابط (۹) و (۱۰) محاسبه و در نمودارهای شکل ۹ نمایش داده شدند.

به دلیل اینکه نسبت حجمی و وزنی ذرات دانه و کاه دارای اختلاف عمده‌ای بود، مقادیر بازیابی و خلوص حجمی هر کدام از



شکل ۹- بازیابی و خلوص ذرات دانه گندم (الف و ب) و بازیابی ذرات کاه (ج) در ۵ سطح ولتاژ

کاه، روندی معکوس برقرار بود؛ به طوری که افزایش ولتاژ منجر به افزایش نسبی ذرات کاه در جعبه‌های صفر تا ۳ و کاهش آن در جعبه‌های بعد از ۳ گردید. با افزایش ولتاژ خلوص ذرات دانه در

همان‌طور که مشخص است افزایش ولتاژ منجر به کاهش تعداد ذرات دانه در جعبه شماره ۷ و قبل از آن و افزایش تعداد ذرات دانه در جعبه شماره ۸ و بعد از آن گردید. در خصوص ذرات

دستگاه گردید. به دلیل اختلاف ظرفیت در جذب بار الکتریکی ذرات و رانش ذرات کاه، در اثر نیروهای الکتریکی الکتروود میدان به عقب سامانه، عمل جداسازی بابازیابی و خلوص قابل قبولی برای ذرات دانه و کاه در ولتاژ و سرعت توصیه شده داشتیم. نتیجه اینکه به طور کلی الکتروود میدان الکترواستاتیک باید همانم بار الکتریکی ذرات سبک تر مخلوط جداسازی بوده تا اثر رانش و هدایت به عقب سامانه جداسازی بهتر صورت پذیرد. در آزمایش‌های تجربی با این سامانه جداسازی، افزایش سرعت دورانیستوانه با ابعاد ذکر شده تا محدوده ۷۰ دور در دقیقه منجر به بهبود جداسازی دانه گندم در جعبه‌های مورد نظر تا مرز ۹۰ درصد می‌گردد، اما افزایش سرعت از یک محدوده معلوم در افزایش کیفیت جداسازی مؤثر نیست. افزایش ولتاژ برای جداسازی ذرات دانه و کاه در این سامانه تا مرز مشخصی، منجر به بهبود کیفیت جداسازی و خلوص دانه تا محدوده ۸۰ درصد در جعبه‌های جدا می‌گردد. به طور عمومی برای محصولات دانه‌ای مشابه، دامنه ولتاژ اعمال شده ۱۵ تا ۲۰ کیلوولت توصیه می‌گردد. در مجموع به نظر می‌رسد این سامانه در محدوده ولتاژ منبع تغذیه و سرعت‌های قابل کنترل مؤثر و نهایتاً سامانه جداسازی توانایی جداسازی مواد و محصولات کشاورزی که در تمیزش نهایی با روش‌های موجود قابل جداسازی نیستند، با انجام پژوهش‌های لازم می‌تواند کاربرد وسیعی داشته باشد.

## REFERENCES

- Basiry M. & Esehaghbeygi, A. (2012) Cleaning and charging of seeds with an electrostatic separator. *Applied engineering in agriculture*, 28(1): 143-147.
- Bendaoud A., Dascalescu L., Blajan M., Samuila A., Stochita A. & Notingher P. V. (2005) Corona charging of granular layers of insulating particles at the surface of a grounded electrode. *Journal of electrostatics*, 63(6-10): 643-647.
- Bendaoud A., Dordizadeh P., Salama A. R., Messal S. & Dascalescu L. (2017) Experimental study of a modified dual-type high-voltage electrode for electrostatic separation applications. *Journal of Electrostatics*, 88: 232-235.
- Butunoi T., Buda G., Dragos C., Samuila A. & Neamtu V. (2011) Wheat Seeds Separation in High-Intensity Electric Field *The 7th International symposium on Advanced Topic In Electrical Engineering ;The Faculty of Electrical Engineering*, U.P.B., Bucharest.
- Dascalescu L. (1998) Optimal high-voltage energization of corona-electrostatic separators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(2): 286-293.
- Dascalescu L., Dragan C., Bilici M., Belega R., Hemery Y. & Rouau, X. (2010) Electrostatic basis for separation of wheat bran tissues. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(2): 659-665.
- Dascalescu L., Morar R., Iuga A., Samuila A., Neamtu V. & Suarasan I. (1994) Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27(6): 1242-1251.
- Dumitran L. M., Badicu L. V., Ploeanu M. C., & Dascalescu L. (2010) Efficiency of dual wire-cylinder electrodes used in electrostatic separators. *Revue Roumain des Sciences Techniques*, 55(2): 171-180.
- Harmond J. E., Brandenburg N. R. & Klein L. M. (1968) Mechanical seed cleaning and handling. Mechanical seed cleaning and handling, USDA, Washington, D.C.
- Harmond J., Brandenburg R. & Klein M. (1968) Mechanical Seed Cleaning and Handling. Agricultural Handbook No: 334. Washington D.C. Agricultural Research Service,
- Iuga A., Morar R., Samuila A. & Dascalescu, L. (2001) Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 148(2): 47-54.
- Kazimirchuk D. A. & Xziretdinov V. X. (1995) Dielectric Equipment for Grading and Cleaning of

جعبه‌های ۶ تا ۸ افزایش و بعداز آن به طور نسبی کاهش یافت که این روند مؤید این موضوع است که در ولتاژهای بالا ذرات کاه پوشینه خرد شده قبل از گرفتن بار الکتریکی منفی به سمت الکتروودهای کرونا و القایی حرکت کرده و در جعبه‌های جلویی سقوط نمودند و به همین دلیل در جداسازی ذرات دانه و کاه گندم با این سامانه دارای محدودیت افزایش ولتاژ هستیم. در تحقیقی مشابه در بابازیابی مواد مفید سه نوع باتری لیتیومی با روش الکترواستاتیک، سیلوریا و همکاران (۲۰۱۷) افزایش درصد ذرات رسا در مخزن سمت الکتروود و افزایش ذرات نارسا در جعبه اول سمت عقب جداکننده را در اثر افزایش ولتاژ جداسازی تا ۳۰ کیلوولت را گزارش نمودند (Silveira et al, 2017). لذا می‌توان استنباط نمود در یک سرعت دورانی خاص افزایش ولتاژ از ۱۰ کیلوولت به بعد منجر به جداسازی بهتر ذرات دانه و کاه می‌شود؛ اما این افزایش ولتاژ دارای محدودیت بوده و در این آزمایش بیشتر از ۲۵ کیلوولت توصیه نمی‌شود.

## نتیجه‌گیری

به دلیل اینکه یونیزه شدن مولکول‌های هوا در هاله (کرونا) منفی بهتر انجام می‌گیرد، لذا اتصال الکتروود کرونا و الکتروود میدان به بار منفی منبع تغذیه و یونیزه شدن بیشتر هوا، منجر به باردار شدن بهتر ذرات و رانش بهتر ذرات با بار همانم به سوی عقب

- Seeds. Sugar-beet. 6: 12-13.
- Kelly E. G. & Spottiwood, D. J. (1989) The theory of electrostatic separations: A review part II. Particle charging. *Minerals Engineering*, 2(2): 193-205.
- Knoll F. S. & Taylor J. B. (1985) Advances in electrostatic separation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2(2): 106-114.
- Kovalyshyn S. & Shvets O. (2018) Study of Extra Cleaning of Rapeseeds in an Electric Frictional Separator. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 66(3): 677-683.
- Li J., Lu H., Guo J., Xu Z. & Zhou Y. (2007) Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards. *Environmental science & technology*, 41(6): 1995-2000.
- Miller, B., M. McDonald, and L. Copeland. 1997. Seed Production: Principles and Practices. International Thomson Publishing, New York.
- Niels J. (2005) Useful static electricity. *Mr. Static* 4(1): 65-69. Pozeliene, A., & S. Lynikiene. 1998. Special cleaning of seeds on the cylindrical electro-separator. *Agric. Tech.* 35(5): 6-9
- Pozeliene A. & Lynikiene S. (1998) Special cleaning of Seeds on the Cylindrical Electro-separator. *Agricultural Techniques*. 35(5): 6-9.
- Požėliienė A., Lynikienė S., Šapailaitė I. & Sakalauskas A. (2008) Utilization of strong electric field for special cleaning buckwheat seeds. *Agronomy Research*, 6(Special issue): 291–298.
- Reguig A., Bendaoud A., Dordizadeh P., Salama, A. R., Messal S. & Dascalescu L. (2017) Experimental study of a modified dual-type high-voltage electrode for electrostatic separation applications. *Journal of Electrostatics*, 88: 232-235.
- Sarmadnia Gh. (1997) Seed Technology, Jahad Daneshgahi Mashhad press.
- Silveira A. V. M., Santana M. P., Tanabe E. H. & Bertuol D. A. (2017) Recovery of valuable materials from spent lithium ion batteries using electrostatic separation. *International Journal of Mineral Processing*, 169, 91-98.
- Silveira A. V. M., Santana M. P., Tanabe E. H., & Bertuol D. A. (2017) Recovery of valuable materials from spent lithium ion batteries using electrostatic separation. *International Journal of Mineral Processing*, 169, 91-98.
- Strakšas A. (1994) Gathering of buckwheat crop. Lithuanian agricultural advisory service. Academy, 40 pp. (in Lithuanian). Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan
- Toth R. T., Opren A., Saplontai V., Samuila A., Dascalescu L., Gheorghe M. & Cojocaru I. (2014) Electrostatic Separation of Plastic Materials Recycled from End of Life Vehicles *Materiale Plastice*; 51, No.1.
- Younes M., Tilmatine A., Medles K., Rahli M. & Dascalescu, L. (2007) Numerical modeling of conductive particle trajectories in roll-type corona-electrostatic separators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(5), 1130-1136.
- Zakareckas R. (1999) Buckwheat. Lithuanian agricultural institute, 29 pp. (in Lithuanian).