

بررسی اثر بارگذاری الکترو استاتیکی بر ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی پسته بخش اول: ضریب

## اصطکاک دینامیکی

محمد حسین آق خانی<sup>۱</sup>، جلال برادران مطیع<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار و عضو هیات علمی گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد aghkhani@um.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

فرآیند جداسازی و درجه بندی محصولات کشاورزی در روند تولید تا عرضه، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. جداسازی می تواند بر اساس مشخصات فیزیکی، الکتریکی، مغناطیسی، اپتیکی و غیره انجام شود. لازمه هر گونه طراحی سیستم های جدید مطالعه کافی بر روی مشخصات و رفتار محصولات کشاورزی است. در این مقاله با فرض تاثیر پذیری ضریب اصطکاک دینامیک از بار الکتریکی ایجاد شده روی نمونه ها، شرایطی مد نظر بود که بیشترین اختلاف بین ضریب اصطکاک پسته های خندان و سربسته به منظور طراحی سیستم جداساز مشخص شود. ضرایب اصطکاک دینامیکی نمونه پسته های خندان و سربسته در طی یک طرح فاکتوریل  $2 \times 3 \times 3 \times 3 \times 2$  در سه تکرار بروی سه سطح اصطکاکی آهن گالوانیزه، آلومینیوم و لاستیک و فاکتور های شدت میدان الکتریکی، رطوبت و سرعت کشش اندازه گیری شد. نمونه های پسته مورد آزمایش از رقم کله قوچی با رطوبت های ۸، ۱۴ و ۲۴ درصد انتخاب شدند. نتایج از تاثیر پذیری همسوی ضریب اصطکاک دینامیک با شدت میدان الکتریکی حکایت دارد. همچنین افزایش رطوبت موجب افزایش ضریب اصطکاک در فاکتور سطح اصطکاکی لاستیک گردید. بیشترین اختلاف بین ضریب اصطکاک نمونه های خندان و سربسته در رطوبت ۸ درصد بر روی سطح لاستیک و در رطوبت های ۱۴ و ۲۴ درصد بر روی سطح آلومینیوم هر سه با شدت میدان ۷۰۰۰ ولت نمایان شد. با توجه به رسانا بودن آلومینیوم و تخلیه سریع بارالکتریکی با قطع میدان از روی آن و همچنین نتایج این طرح، سطح اصطکاکی آلومینیوم به همراه شدت میدان ۷۰۰۰ ولت برای طراحی سیستم جداساز پیشنهاد گردید.

**کلمات کلیدی:** ضریب اصطکاک دینامیکی، پسته، بارالکتریکی، سطوح اصطکاکی

### مقدمه

فرآیند جداسازی و درجه بندی محصولات کشاورزی در روند تولید تا عرضه از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. به عنوان مثال جداسازی یکی از بخش های مهم در مجموعه تکنولوژی بذر جهت دستیابی به کیفیت بالای ارقام بذرهای اصلاح شده، محسوب می شود (سرمدنی، ۱۳۷۶). بذرهای جمع آوری شده از مزرعه اغلب دارای ناخالصی های گوناگونی از قبیل: مواد زاید، بذر علف های



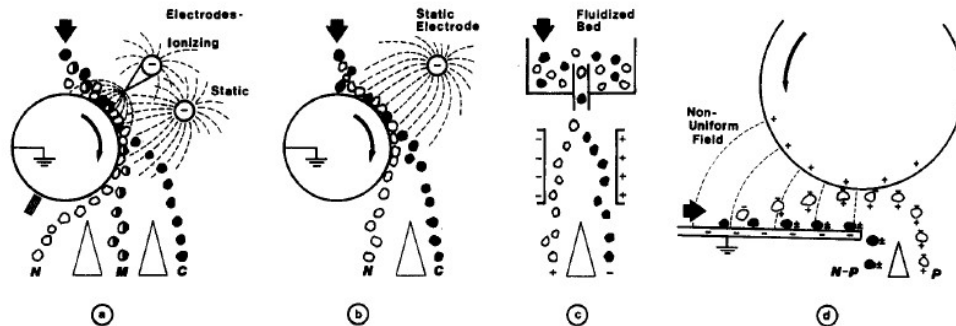
هرز، ساقه، برگ، بذرها آسیب دیده و ناقص و بذرها کوچک می‌باشند. بعضی بذرها با تمیزکردن اولیه به صورت کامل پاک شده و به محصول نهایی تبدیل می‌شوند اما در بعضی دیگر عملیات اضافی برای پاک کردن ناخالصی‌ها لازم است (میلر و همکاران، ۱۹۹۷). جداسازی می‌تواند بر اساس مشخصات فیزیکی، الکتریکی، مغناطیسی، اپتیکی و غیره انجام شود. لازم به یاد آوری می‌باشد که دقت و راندمان کمی و کیفی جداسازی و درجه بندی بستگی به توجه کافی به خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات دارد. بنابراین لازمه طراحی هر گونه سیستم‌های جدید، مطالعه کافی بر روی مشخصات و رفتار محصولات کشاورزی است. از جمله این مشخصات می‌توان به اندازه (طول، عرض و ضخامت)، سختی، شکل، وزن مخصوص، زبری سطحی، رنگ، خصوصیات آیرودینامیکی و سرعت حد، هدایت الکتریکی، خاصیت ارتجاعی و ضریب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی اشاره کرد. تاکنون خواص اصطکاکی محصولات کشاورزی بر روی سطوح مختلف یا اصطکاک داخلی آنها در فرآیند های جداسازی بکار گرفته شده اند، اما تاثیر باردار کردن الکترواستاتیکی محصولات بر روی ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی به منظور جداسازی و درجه بندی بسیار کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق بررسی تاثیرات متقابل خواص الکترواستاتیکی و خواص اصطکاکی به منظور یافتن راهکاری برای جداسازی محصولاتی که جداسازی آنها با روش های مرسوم امکان پذیر نبوده یا از دقت کافی برخوردار نیست، می‌باشد که به عنوان نمونه در این مقاله بر روی جداسازی پسته های خندان از سرپسته این بررسی انجام شده است.

پسته یکی از محصولات اصلی خشکبار می‌باشد که در بخشهایی از جهان از قبیل ایران، آمریکا، ترکیه و سوریه کشت می‌شود. بر اساس آمار سازمان خوار و بار جهانی (FAO)، ایران در سال ۲۰۰۹ در حدود ۲۵۵ هزار تن پسته تولید کرده است که در بین کشور های جهان مقام اول را به خود اختصاص داد. برداشت، انتقال، پوست کنی، جداسازی تمیز کاری، خشک کردن و انبارداری از جمله مراحل فرآوری پسته می‌باشد که در سالهای اخیر به دلیل اهمیت این محصول استراتژیک بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از عواملی که می‌تواند کیفیت محصول ارائه شده به بازار را افزایش دهد، بازدهی مرحله جداسازی می‌باشد. هدف از این مرحله جداسازی پسته های سرپسته، پوک، نارس و ... از پسته های خندان می‌باشد. در روش معمول جداسازی پسته برداشت شده از درخت که رطوبت بالایی دارد، پوست گیری شده، پس از شستشو خشک می‌شود و سپس وارد دستگاه جداسازی می‌شود. روشهای مختلفی برای جداسازی پسته بکار گرفته شده است، از جمله آنها می‌توان به روشهای مکانیکی، جداساز وزن مخصوص، ماشین بینایی و صوتی اشاره کرد. از بین این روشها روش مکانیکی در ترمینال های ضبط پسته رایج است.

جداسازهای الکترواستاتیکی شایستگی و پتانسیل بالای خود را در جداسازی مواد اثبات کرده اند (رالستون، ۱۹۶۱)، اما همچنان پتانسیل های کاربردی ناشناخته ای دارد مخصوصا در جاهایی که دیگر سیستمهای جداساز کاربردی ندارند (کلی و اسپاتیسوود،



۱۹۸۸). بر اساس روش های باردار کردن ذرات، چهار نوع جداساز الکتروستاتیکی وجود دارد: (۱) تنش بالا یا الکترو-دینامیک<sup>۱</sup>، (۲) الکترو-استاتیک<sup>۲</sup>، (۳) جداسازهای مالشی<sup>۳</sup> و (۴) دی الکتروفورسیس<sup>۴</sup>. شکل ۱ اساس کار هر یک را نشان می دهد.



شکل ۱- (a) تنش بالا، (b) الکترو-استاتیک، (c) جداسازهای مالشی و (d) دی الکتروفورسیس.

(C: رسانا، N: نارسانا، P: قابل قطبی شدن، NP: غیر قابل قطبی شدن)

اگرچه بیشتر جداسازهای الکتروستاتیکی از نوع الکترو- استاتیک می باشند اما امروزه جداسازهای تنش بالا بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند و کابردی تر می باشند. این در حالی است که جداسازهای مالشی موفقیت تجاری محدودی داشته و بیشتر در مطالعات مورد استفاده قرار گرفته اند (فریک، ۱۹۷۷).

اولین جداکننده الکتروستاتیکی تجاری در سال ۱۸۸۰ توسط توماس اوسبورن به منظور جداسازی کاه و مواد سبک دیگر از آرد گندم، اختراع شد. کریشنان و برلاگ یک جداکننده الکتروستاتیکی تسمه‌ای برای جداسازی قسمتهای گل از بذر پیاز ساختند که شامل مخزن تغذیه، تسمه نقاله رسانا، منبع ولتاژ بالای مستقیم با حداکثر ولتاژ ۲۵ کیلو ولت و  $90 \mu A$ ، یک الکتروود میله‌ای شکل و یک سینی چند خانه بود. بذرهای توسط الکتروود میله‌ای یونیزه می‌شدند و بار خالص مثبت پیدا می‌کردند. بذرهایی که هدایت الکتریکی بیشتری داشتند بار خود را به تسمه منتقل می‌کردند و به علت نبودن نیروی جاذبه، از روی تسمه درون سینی چند خانه می‌افتادند. اما بذرهای دارای هدایت الکتریکی کمتر، به دلیل منتقل نکردن بار، به تسمه چسبیده و همراه با آن می‌چرخیدند و به این ترتیب از بذرهای درشت جدا می‌شدند. بهترین جداسازی در ولتاژ ۱۷ کیلو ولت و سرعت  $0.2$  متر بر ثانیه تسمه نقاله به‌دست آمد [کریشنان و برلاگ، ۱۹۸۵]. لاندال و همکاران یک جداکننده الکتروستاتیکی به منظور جداسازی کاه از دانه غلات ساختند که دارای یک تسمه عایق بود که مخلوط دانه و کاه را از کنار یک الکتروود یونیزه کننده عبور می‌داد. الکتروود یونیزه کننده باعث یونیزه

<sup>1</sup> High Tension

<sup>2</sup> Electro-Static

<sup>3</sup> Turboelectric Separator

<sup>4</sup> Dielectrophoresis



شدن بذرها و باردار شدن آنها می‌شد. یک استوانه فلزی چرخنده متصل به زمین، در مقابل انتهای تسمه، جایی که مخلوط بذر تخلیه می‌شد، قرار داشت. دانه‌ها به علت چگالی بالاتر، بیشتر تحت تاثیر نیروی وزن و ذرات کاه بیشتر تحت تاثیر نیروی میدان الکتروستاتیکی قرار می‌گرفتند. در نتیجه دانه‌ها تمایل به افتادن روی زمین داشتند و ذرات کاه جذب استوانه می‌شدند. با چرخش استوانه ذرات کاه توسط یک برس کنار زده و از استوانه جدا می‌شدند (لاندا، ۲۰۰۱).

بصیری و اسحق بیگی نیز یک دستگاه جداکننده الکتروستاتیکی نوع تسمه‌ای ساختند که با استفاده از خواص الکتریکی بذرها، آنها را درجه‌بندی و ناخالصی‌ها را تا حد زیادی جدا می‌نمود. اجزای تشکیل دهنده دستگاه شامل: منبع ولتاژ بالا با پیشینه ولتاژ تولیدی ۱۱/۷ کیلو ولت (جریان مستقیم، DC)، مخزن بذر، استوانه باردارکننده بذرها، تسمه جابجاکننده بذرها، الکتروود یونیزه کننده، سینی جمع‌آوری بذرها، برس تمیز کننده تسمه نقاله، شاسی دستگاه و موتور الکتریکی بود. بذرها توسط باردارکننده استوانه ای و الکتروود یونیزه کننده باردار شده و به دلیل نیروی جاذبه الکتریکی بین تسمه و بذرها، به سطح تسمه چسبیده و بر اساس چگالی جدا می‌شدند. بذرهای گندم، جو و کلزا در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند. ولتاژ و رطوبت مناسب برای حصول بهترین جداسازی در مورد هر بذر تعیین گردید. نتایج نشان داد که استفاده از جداکننده اثر معنی داری ( $P \leq 0.05$ ) بر افزایش درجه خلوص و وزن هزار دانه در تمامی بذرها دارد (بصیری و اسحق بیگی، ۱۳۸۷).

در این تحقیق ایده بکارگیری از میدان الکتریکی و القای بار الکتریکی روی ضرایب اصطکاک نمونه‌های پسته به طور مستقیم، جهت بررسی امکان جداسازی محصول سرپسته از محصول خندان بررسی شد. با توجه به تفاوت خصوصیات فیزیکی و ظاهری نمونه‌های پسته خندان و سر پسته از نظر شکل، گوشه‌های نوک تیز پخش بار الکتریکی بر روی آنها متفاوت خواهد بود. طبق نظریه‌های فیزیک الکتریسته و مغناطیس، چگالی بار الکتریکی در گوشه‌های نوک تیز و زاویه دار بیشتر از سایر نقاط یک جسم باردار می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت فرضیه اصلی این تحقیق عبارت است از اینکه با توجه به تاثیر شکل و ساختار محصولات مختلف کشاورزی و ناخالصی‌های همراه با آن، در صورتیکه محصولات بصورت الکتروستاتیکی باردار شوند ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی آنها تغییر خواهد کرد و به کمک این تفاوت می‌توان عمل جداسازی و درجه بندی را انجام داد. مطابق با این فرضیه طرح آزمایشی فاکتوریل کاملاً تصادفی با فاکتورهای رطوبت، شدت میدان الکتریکی، سرعت حرکت روی سطح، نوع سطح و نوع پسته، تهیه و جهت بررسی روی پسته رقم کله-قوچی با هدف بررسی امکان جداسازی پسته خندان از سر پسته به کمک تغییر ضرایب اصطکاک دینامیک و استاتیک در اثر ایجاد بار الکتریکی، مورد استفاده قرار گرفت.

## مواد و روشها

پسته رقم کله قوچی در کشور ایران جزء رده‌های برتر از نظر میزان تولید می‌باشد. بدین دلیل در این تحقیق از آن به عنوان نمونه آزمایشی استفاده شد. رقم کله قوچی دارای ظاهری کشیده و بدنه قوسی شکل می‌باشد. نمونه پسته مورد نظر در اواخر شهریور ماه



از ترمینال پسته واقع در شهرستان تربت جام (استان خراسان رضوی) پس از پوست گیری تهیه شد. رطوبت اولیه نمونه ها به روش خشک کردن در آون با دمای  $103 \pm 2$  درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت (کاشانی نژاد و همکاران ۲۰۰۵) برابر با ۲۴/۲ درصد اندازه گیری شد. پس از انتقال نمونه ها به آزمایشگاه عمل جداسازی پسته های خندان از سرپسته به طور دستی انجام شد. پس از جدا سازی از هر دسته خندان و سر بسته حدود یک کیلوگرم انتخاب و درون پاکت پلاستیکی درب بسته در دمای ۴ درجه سانتی گراد، نگهداری شد.

طرح آزمایشی مورد استفاده در این تحقیق دارای فاکتور رطوبت با سه سطح (۲۴/۲، ۱۴/۵ و ۸/۱ درصد)، شدت میدان الکتریکی با سه سطح ( صفر ، ۴۰۰۰ و ۷۰۰۰ ولت)، سرعت حرکت روی سطح با سه سطح (۱۳۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۳۰۰ میلیمتر در دقیقه)، نوع سطح اصطکاکی با سه سطح (ورق آهن گالوانیزه، ورق آلومینیوم و تسمه لاستیکی صاف) و نوع پسته با دو سطح ( خندان و سر بسته) بود که به صورت فاکتوریل کاملا تصادفی با سه تکرار اندازه گیری و آنالیز گردید. آماده سازی سطوح رطوبتی به روش پهن و خشک کردن در هوای آزاد انجام شد. میدان الکتریکی مورد استفاده در آزمایشات به کمک یک برد الکترونیکی تولید ولتاژ بالا (Hi-Voltage) تامین شد. این برد الکتریکی دارای ورودی برق DC در محدوده ۵ تا ۱۲ ولت و خروجی برق DC در محدوده ۳۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰ ولت می باشد. ولتاژ روی صفحات به وسیله ی پروب های ولتاژ<sup>۵</sup> مدل Leader LP6 اندازه گیری شد. میدان الکتریکی به بالا و پایین لایه محصول که به ضخامت ۲۵ میلیمتر بود اعمال شد. از آنجا که سرعت حرکت بر مقدار نیروی اصطکاک دینامیکی تاثیر گذار است، لذا سه سطح سرعت حرکت نیز انتخاب شد. این سرعت ها بوسیله میز متحرک دستگاه اندازه گیری اصطکاک دینامیکی ایجاد می گردید. صفحات مربوط به سطوح اصطکاکی دارای ابعاد  $30 \times 15$  سانتیمتر انتخاب شدند. در قسمت جلویی صفحات محلی برای اتصال سیم حامل ولتاژ و محل اتصال به نخ رابط نیرو سنج تعبیه شده است. برای اعمال و پخش یکنواخت بار الکتریکی به صفحه لاستیکی<sup>۶</sup>، آن را به پشت یک صفحه آلومینیومی چسباندیم. از آنجا که مقدار نیروی عمود بر سطح بر مقدار نیروی اصطکاک استاتیکی و دینامیکی تاثیر گذار است، تمام صفحات اصطکاکی به کمک سنگین کننده های کمکی به وزن یکسان ۸۷۰ گرم رسانده شدند.

به منظور اندازه گیری نیروی اصطکاک در حالات مختلف طرح آزمایشی، از یک نمونه دستگاه اندازه گیری اصطکاک دینامیکی (ساخته شده در گروه ماشینهای کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد) استفاده شد. این دستگاه دارای یک میز متحرک است که می تواند با سرعت ثابت و یکنواخت در دو جهت حرکت کند. نمونه های آزمایش درون ظرفی با ابعاد داخلی  $25 \times 15 \times 30$  میلیمتر از جنس تفلون با ضخامت دیواره ی ۵ میلیمتر بر روی میز متحرک قرار داده شدند. در کف ظرف یک صفحه آلومینیومی جداگانه به عنوان قطب منفی میدان الکتریکی نصب شده بود. صفحات اصطکاکی به عنوان قطب مثبت در بالای نمونه ها و بالای ظرف قرار

<sup>۵</sup> Hi-voltage

<sup>۶</sup> به دلیل عایق بودن سطح لاستیک احتمال تجمع بار تنها در محل اتصال سیم حامل ولتاژ وجود داشت.



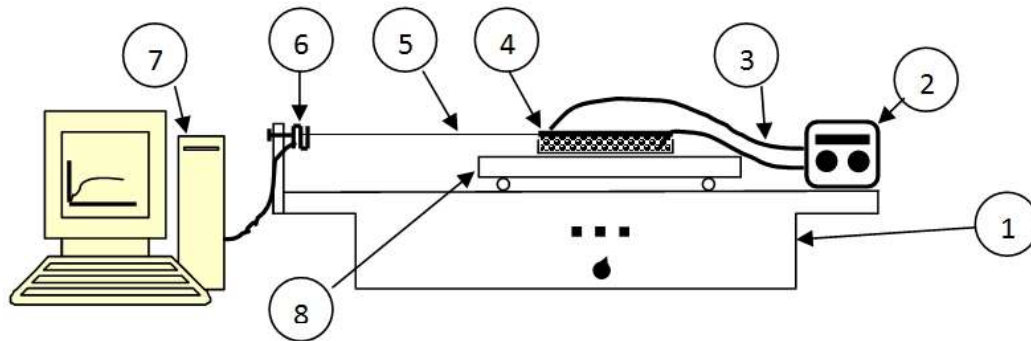
داده شدند. به طوریکه هیچگونه تماسی بین صفحات اصطکاکی و دیواره های ظرف بوجود نیامد( نمونه ها به میزان ۲ تا ۳ میلیمتر از لبه ظرف بالا زده بودند). ظرف حاوی نمونه ها به میز متحرک محکم شده و همراه با آن می توانست حرکت کند در حالی که صفحه اصطکاکی (که در بالای نمونه ها قرار داشت) توسط یک نخ پلاستیکی به لوسل متصل شده و ثابت بود. جهت اندازه گیری مقدار نیرو از یک لودسل با ظرفیت ۵۰۰۰ نیوتن با دقت ۰/۰۱ نیوتن که به پایه دستگاه ثابت شده بود استفاده شد. نیرو سنج از طریق یک نخ پلاستیکی با قطر ۰/۵ میلیمتر به صفحات اصطکاکی متصل شد. مقدار نیروی اندازه گیری شده توسط لود سل از طریق کابل شیلد دار و سوکت DB15 به واحد پردازش دستگاه و سپس به رایانه منتقل و به وسیله ی نرم افزار Qmat ثبت و آنالیز اولیه شد. این نرم افزار قادر است داده های نیرو - جابجایی را در بازه ی زمانی ۰/۱ ثانیه دریافت، ثبت و به صورت نمودار ارائه دهد. شماتیک سیستم اندازه گیری نیروی اصطکاک در شکل ۲ آمده است.

پیش از شروع آزمایش نمونه های مورد نیاز برای هم دما شدن با محیط حداقل ۲ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند (Aydin 2002). آزمایشات اندازه گیری نیروی اصطکاک در هر تیمار با سه تکرار انجام شد. خروجی اندازه گیری نیروی اصطکاک به صورت نمودار نیرو - جابجایی در رایانه ذخیره شد. هر آزمایش تا هنگام ثابت شدن مقدار نیرو ادامه می یافت. بدین ترتیب مقدار نیرویی که به طور ثابت روی نمودار ظاهر می شود برابر با نیروی اصطکاک دینامیک و ضریب زاویه قسمت شیب دار ابتدایی نمودار برابر با ضریب اصطکاک استاتیکی ثبت شد (شکل ۳). مقدار ضریب اصطکاک دینامیکی از رابطه ۱ برای هر تکرار محاسبه شد.

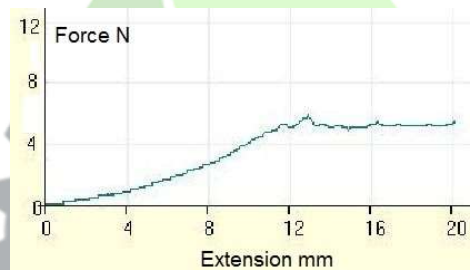
$$\mu_d = \frac{F_d}{N} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\mu_d$  ضریب اصطکاک دینامیکی،  $F_d$  نیروی اصطکاک دینامیکی اندازه گیری شده با دستگاه بر حسب نیوتن و  $N$  مقدار نیروی عمود بر سطح بر حسب نیوتن که در تمام آزمایشات مقداری ثابت و برابر با ۸۵۳۴/۷ نیوتن بود. داده های آزمایش به کمک نرم افزار SPSS نسخه ۱۷ در طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی مورد آنالیز قرار گرفت. همچنین آزمون دانکن نیز بر روی داده ها انجام شد که نتایج آن در ادامه آمده است.





شکل ۲- شماتیک دستگاه اندازه گیری نیروی اصطکاک. (۱) دستگاه تولید حرکت خطی یکنواخت (۲) منبع تولید ولتاژ بالا (۳) سیم های انتقال ولتاژ به صفحات میدان الکتریکی (۴) صفحه اصطکاکی، ظرف تفلونی و نمونه های آزمایش (۵) نخ پلاستیکی (۶) لود سل (۷) رایانه (۸) میز متحرک دستگاه



شکل ۳- نمونه ای از نمودار های نیرو-جابجایی که توسط دستگاه در حین اندازه گیری اصطکاک دینامیک تهیه شده است. بخش شیب دار و بخش ثابت نیرو در این شکل مشخص می باشد.

## نتایج و بحث

در این تحقیق تغییرات نیروی کشش صفحه اصطکاکی نسبت به جابجایی اندازه گیری و ثبت گردید. از نمودارهای نیرو-جابجایی مقادیر ضریب اصطکاک دینامیکی و ضریب اصطکاک استاتیکی استخراج شد. به طور کل با توجه به طرح آزمایشی، تعداد ۴۸۶ آزمایش انجام شد و از هر آزمایش دو داده بدست آمد. داده های بدست آمده بیانگر مقادیر ضرایب اصطکاک دینامیکی و استاتیکی پسته های خندان و سرپسته در شدت میدان الکتریکی، سرعت کشش، سطوح اصطکاکی و رطوبت های مختلف بودند. داده ها به وسیله نرم افزار SPSS تحلیل آماری شدند که نتایج اولیه تجزیه واریانس آنها در جدول ۱ آمده است.



جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس داده های مربوط به ضریب اصطکاک دینامیکی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Moisture (A)	0.00565	2	0.00282	4.899	.008
Pesteh_kind (B)	0.11884	1	0.11884	206.102	.000
Surface (C)	0.88769	2	0.44384	769.741	.000
Electric_field (D)	0.30147	2	0.15073	261.412	.000
Speed (E)	0.10257	2	0.05129	88.943	.000
<b>B * D</b>	0.00410	2	0.00205	3.553	<b>.030</b>
<b>D * E</b>	0.00219	4	0.00055	.948	<b>.436</b>
<b>B * C * D</b>	0.00021	4	0.00005	.091	<b>.985</b>
<b>B * C * E</b>	0.00558	4	0.00139	2.419	<b>.048</b>
Error	0.18682	324	0.00058		

اثرات متقابل که معنی دار نشده اند در جدول آنالیز واریانس نشان داده نشده اند

با توجه به جدول آنالیز واریانس ۱ به طور کلی مشاهده می شود، با معنی دار شدن اثر متقابل نوع پسته × میدان الکتریکی و همچنین اثر متقابل میدان الکتریکی × سرعت، بر ضریب اصطکاک دینامیکی در سطح احتمال ۹۹ درصد، می توان به جداسازی دو نمونه پسته خندان و سربسته به کمک میدان الکتریکی امیدوار بود. همچنین اثر سه گانه نوع پسته × سطح × میدان و اثر سه گانه نوع پسته × سطح × سرعت نیز در سطح احتمال ۹۹ درصد معنی دار می باشد. به دلیل پخش بار الکتریکی بر روی سطح نمونه ها در اثر اعمال میدان الکتریکی مشاهده شد که با افزایش میدان الکتریکی ضریب اصطکاک دینامیکی افزایش می یابد. بوجود آمدن بار الکتریکی مخالف روی سطح پسته نسبت به سطح اصطکاک باعث بوجود آمدن نیروی جاذبه و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک دینامیک شد. تفاوت مشخصات فیزیکی سطح پسته های خندان نسبت به پسته های سربسته (نظیر وجود گوشه ها و لبه ها) موجب تفاوت در پخش بار الکتریکی می شود در نتیجه اثر متقابل آن با میدان الکتریکی معنی دار گردید. به طور کل در داده های آزمایشی مشاهده شد که مقدار ضریب اصطکاک دینامیکی در سرعت ۳۳۰۰ میلیمتر در دقیقه نسبت به سرعت های ۱۳۰۰ و ۲۵۰۰ میلیمتر در دقیقه کمتر است. دلیل این پدیده را می توان نبود فرصت برای فرورفتن خلل و فرج سطح دانه های پسته و سطح اصطکاک در یکدیگر دانست.

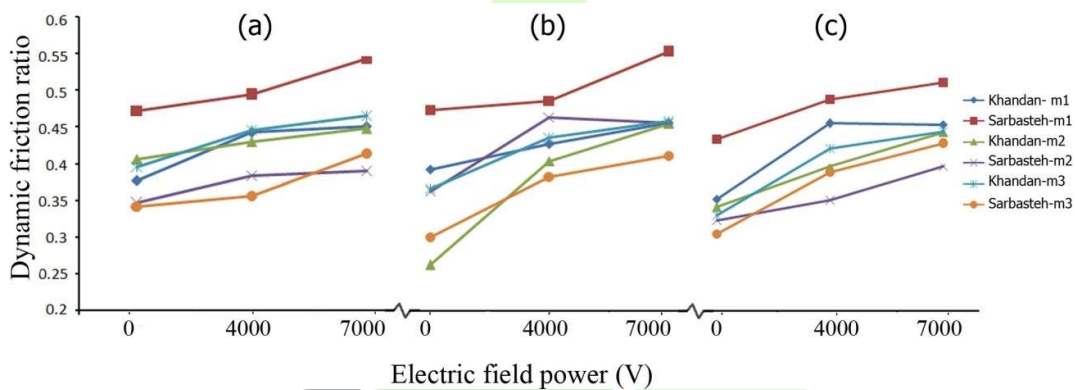
به منظور کمی کردن نتایج فوق آزمون دانکن بر روی سطوح فاکتورهای رطوبت، میدان الکتریکی، سرعت و سطح اصطکاک در سطح احتمال ۹۹ درصد، انجام شد. مقایسه بین سطوح رطوبتی نشان داد در سطح احتمال ۹۹ درصد تفاوت معنی داری بین سطوح رطوبتی وجود ندارد اما در سطح احتمال ۹۵ درصد، سطح رطوبتی ۸ درصد تفاوت معنی داری با دو سطح ۱۴ و ۲۴ درصد دارد، از طرفی سطوح ۱۴ و ۲۴ درصد در یک دسته بندی قرار گرفتند. آزمون دانکن بر روی سطوح اصطکاک نشان داد سطح آهن گالوانیزه



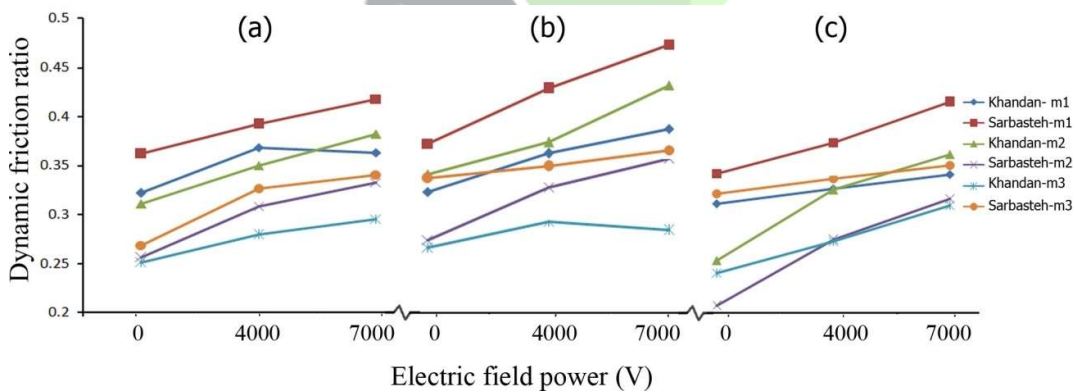


و لاستیک در یک دسته بندی قرار گرفته و تفاوت معنی داری بین آنها و سطح آلومینیوم وجود دارد. نتایج نشان داد بین هر سه سطح میدان الکتریکی، تفاوت معنی دار وجود دارد. مقایسه سطوح سرعت نیز بیانگر آن بود که سرعت های ۱۳۰۰ و ۲۵۰۰ میلیمتر در دقیقه در یک دسته قرار گرفته و بین آنها و سطح سرعت ۳۳۰۰ میلیمتر در دقیقه تفاوت معنی دار وجود دارد.

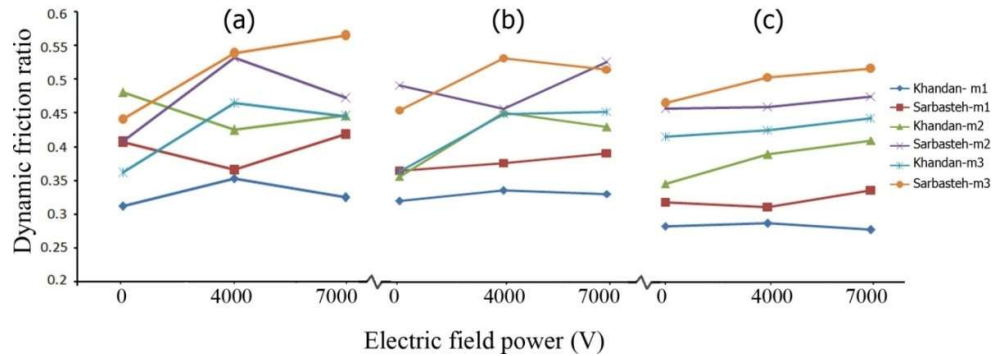
تغییرات ضریب اصطکاک دینامیکی نسبت به شدت میدان الکتریکی در سطوح مختلف رطوبت و سرعت کشش روی سطوح اصطکاکی آهن، آلومینیوم و لاستیک به ترتیب در شکل های ۴، ۵ و ۶ رسم شده است. این نمودارها به طور کل نشانگر کاهش ضریب اصطکاک دینامیک با افزایش سرعت حرکت میز متحرک دستگاه می باشند. این امر به دلیل کاهش زمان در اختیار برای فرورفتن ناصافی های سطحی نمونه های پسته و سطوح اصطکاکی در سرعت های بالای حرکت می باشد.



شکل ۴- رابطه بین شدت میدان الکتریکی بر حسب ولت و ضریب اصطکاک دینامیکی پسته های خندان و سر بسته بر روی سطح اصطکاکی آهن گالوانیزه در رطوبت های  $m_1 = 8$ ،  $m_2 = 14$ ،  $m_3 = 24$  درصد. (a) سرعت ۱۳۰۰ میلیمتر در دقیقه (b) سرعت ۲۵۰۰ میلیمتر در دقیقه (c) سرعت ۳۳۰۰ میلیمتر در دقیقه

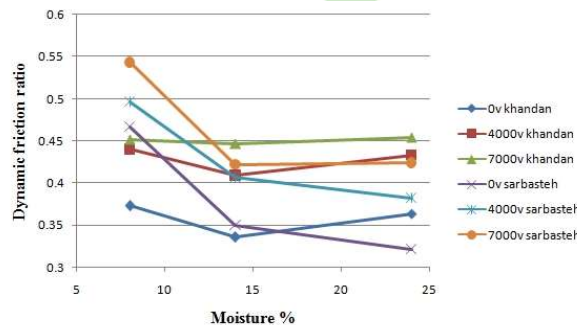


شکل ۵- رابطه بین شدت میدان الکتریکی بر حسب ولت و ضریب اصطکاک دینامیکی پسته های خندان و سر بسته بر روی سطح اصطکاکی آلومینیوم در رطوبت های  $m_1 = 8$ ،  $m_2 = 14$ ،  $m_3 = 24$  درصد. (a) سرعت ۱۳۰۰ میلیمتر در دقیقه (b) سرعت ۲۵۰۰ میلیمتر در دقیقه (c) سرعت ۳۳۰۰ میلیمتر در دقیقه



شکل ۶- رابطه بین شدت میدان الکتریکی بر حسب ولت و ضریب اصطکاک دینامیکی پسته های خندان و سر بسته بر روی سطح اصطکاکی تسمه لاستیکی در رطوبت های  $m1 = 8$ ،  $m2 = 14$  و  $m3 = 24$  درصد. (a) سرعت ۱۳۰۰ میلیمتر در دقیقه (b) سرعت ۲۵۰۰ میلیمتر در دقیقه (c) سرعت ۳۳۰۰ میلیمتر در دقیقه

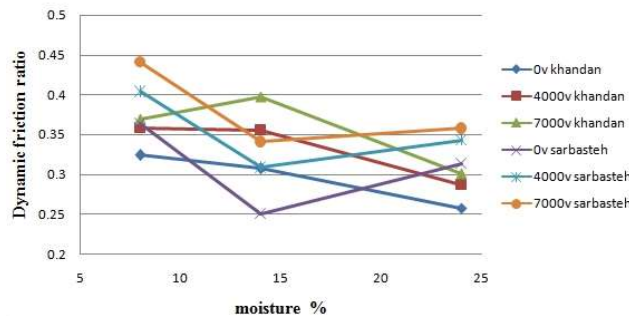
نمودار شکل ۷، ۸ و ۹ تغییرات ضریب اصطکاک دینامیکی را در مقابل تغییرات رطوبت نمونه ها به ترتیب بر روی سطوح اصطکاکی آهن گالوانیزه، آلومینیوم و لاستیک نشان می دهند. همانطور که در نمودار شکل ۷ مشاهده می شود. افزایش شدت میدان الکتریکی باعث افزایش ضریب اصطکاک دینامیک شده است. که این امر به دلیل ایجاد بار های مخالف روی نمونه های محصول و سطح ورق آهن گالوانیزه می باشد و با افزایش میدان میزان این بارها افزایش می یابد. ضریب اصطکاک های پسته خندان در رطوبت های ۸ و ۲۴ درصد در تمام سطوح میدان الکتریکی بسیار به هم نزدیک می باشند. همچنین نمودار بیانگر یک نقطه حداقل در سطح رطوبتی ۱۴ درصد است. اما رفتار نمونه پسته های سر بسته متفاوت از پسته های خندان می باشد. به طور کل ضریب اصطکاک دینامیکی نمونه های سر بسته با افزایش رطوبت کاهش یافته است. شدت کاهش از رطوبت ۸ به ۱۴ بسیار بیشتر از شدت کاهش از رطوبت ۱۴ به ۲۴ می باشد. همچنین در رطوبت های ۸ و ۱۴ درصد در تمام سطوح میدان ضریب اصطکاک دینامیکی پسته های سر بسته بالاتر از پسته های خندان است. اما در رطوبت ۲۴ درصد ضریب اصطکاک دینامیکی پسته های خندان بالاتر می باشد.



شکل ۷- رابطه بین تغییرات رطوبت و ضریب اصطکاک دینامیکی پسته های خندان و سر بسته در سطوح مختلف میدان الکتریکی بر روی سطح اصطکاکی آهن گالوانیزه



نمودار شکل ۸ رابطه ضریب اصطکاک دینامیکی و رطوبت را بر روی سطح اصطکاکی آلومینیوم نشان می‌دهد. این نمودار برای نمونه‌های سربسته دارای یک نقطه مینیموم در رطوبت ۱۴ درصد می‌باشند. ضریب اصطکاک نمونه‌های سربسته در رطوبت ۸ درصد حداکثر بوده و تا رطوبت ۱۴ درصد به طور میانگین در سطوح مختلف میدان الکتریکی ۲۵/۸ درصد کاهش یافته است. اما از رطوبت ۱۴ تا ۲۴ درصد به طور میانگین ۱۳/۶ درصد افزایش می‌یابد. باتوجه به نمودار شکل ۸ ضرایب اصطکاک دینامیکی برای نمونه‌های خندان با افزایش رطوبت روند کاهشی را نشان می‌دهد به طوری که تنها در میدان الکتریکی ۷۰۰۰ ولت یک افزایش جزئی در رطوبت ۱۴ درصد مشاهده شده و سپس نمودار روند کاهشی خود را ادامه می‌دهد. حداکثر اختلاف بین ضریب اصطکاک نمونه‌های خندان و سربسته که به منظور جداسازی اهمیت پیدا می‌کند به طور میانگین برای هر سه سرعت کشش، در رطوبت ۸ درصد و میدان الکتریکی ۷۰۰۰ ولت مشاهده می‌شود که برابر با ۱۹/۵ درصد می‌باشد.



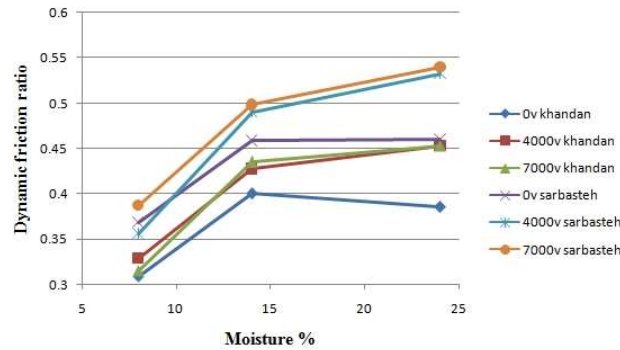
**شکل ۸-** رابطه بین تغییرات رطوبت و ضریب اصطکاک دینامیکی پسته‌های خندان و سربسته در سطوح مختلف میدان

الکتریکی بر روی سطح اصطکاکی آلومینیوم

در مقایسه با شکل‌های ۷ و ۸، نمودار شکل ۹ روند متفاوتی از تغییرات ضریب اصطکاک دینامیکی در مقابل رطوبت بر روی سطح لاستیک نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر بیشتر بودن ضریب اصطکاک نمونه‌های سربسته از نمونه‌های خندان در تمامی حالات بوده و روند افزایشی را با افزایش رطوبت نشان می‌دهد. تنها در مورد نمونه پسته‌های خندان در رطوبت ۲۴ درصد و بدون اعمال میدان الکتریکی مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک نسبت به رطوبت ۱۴ درصد به میزان ۳/۶ درصد کاهش داشته است. به طور کلی به دلیل عایق بودن سطح لاستیک وجود رفتار متفاوت از دو سطح آهن و آلومینیوم که رسانا بودند دور از انتظار نبود. با افزایش رطوبت میزان جذب و تجمع بار الکتریکی روی سطح نمونه‌ها و همچنین سطح لاستیک بالاتر می‌رود. افزایش میزان بار الکتریکی که از نوع غیر هم نام می‌باشند موجب افزایش نیروی جاذبه و ضریب اصطکاک دینامیکی شده است. این در حالی بود که در سطوح اصطکاکی رسانا با افزایش رطوبت و میدان الکتریکی، گذردهی بار الکتریکی نیز افزایش می‌یابد و این امر اثر



مختلف الجهتی در مقابل افزایش جاذبه می باشد. بدین ترتیب در مورد سطح لاستیک بیشترین اختلاف که به طور میانگین در هر سه سرعت کشش بدست آمده است مربوط به سطح میدان ۷۰۰۰ ولت و رطوبت ۲۴ درصد به میزان ۱۹/۲۲ درصد می باشد.



شکل ۹- رابطه بین تغییرات رطوبت و ضریب اصطکاک دینامیکی پسته های خندان و سر بسته در سطوح مختلف میدان الکتریکی بر روی سطح اصطکاکی لاستیک

## جداسازی

به منظور جداسازی پسته های سر بسته از پسته های خندان روشهای مختلفی تاکنون رایج شده است که در بخش مقدمه به آنها اشاره شد. اما فرایند جداسازی براساس اصطکاک دینامیکی ممکن است کمی پیچیده باشد. سیستمی که بر این اساس طراحی شود لازم است در وضعیتی کار کند که حالت بهینه ای از شرایط محصول و اختلاف حداکثر ضریب اصطکاک دینامیکی باشد. جدول ۲ مقادیر ضرایب اصطکاک دینامیکی در حالات حداکثر اختلاف بر روی سطوح مختلف و درصد رطوبت های مختلف را نشان می دهد. با توجه به این جدول حداکثر میزان اختلاف در رطوبت ۸ درصد (که نزدیک به رطوبت انبار داری محصول است) در سطح اصطکاکی لاستیک با شدت میدان ۷۰۰۰ ولت و سرعت ۱۳۰۰ میلیمتر در دقیقه بدست آمده است. در رطوبت ۱۴ درصد حداکثر اختلاف مربوط به سطح اصطکاکی آلومینیوم و سرعت ۲۵۰۰ میلیمتر در دقیقه و شدت میدان ۷۰۰۰ ولت می باشد و در رطوبت ۲۴ درصد ( که نزدیک به رطوبت محصول پس از پوست گیری است) بیشترین اختلاف بین ضرایب اصطکاک دینامیکی نمونه محصول خندان و سر بسته باز هم در سطح اصطکاکی آلومینیوم و شدت میدان ۷۰۰۰ ولت و سرعت ۲۵۰۰ میلیمتر در دقیقه وجود دارد.



جدول ۲- مقادیر ضرایب اصطکاک دینامیکی نمونه پسته های خندان و سر بسته در رطوبت های ۸، ۱۴ و ۲۴ درصد در حالات حداکثر اختلاف هر سطح رطوبتی.

سطح اصطکاکی / رطوبت	8 درصد	14 درصد	۲۴ درصد
میدان	ولت 7000	ولت 7000	ولت 4000
سرعت	2500 mm.min <sup>-1</sup>	1300 mm.min <sup>-1</sup>	1300 mm.min <sup>-1</sup>
آهن گالوانیزه	μ <sub>ه</sub> خندان	0.46	0.448
	μ <sub>ه</sub> سر بسته	0.542	0.392
	درصد اختلاف	15.12	14.28
میدان	ولت 7000	ولت 7000	ولت 7000
سرعت	2500 mm.min <sup>-1</sup>	<b>2500 mm.min<sup>-1</sup></b>	<b>2500 mm.min<sup>-1</sup></b>
آلومینیوم	μ <sub>ه</sub> خندان	0.385	<b>0.43</b>
	μ <sub>ه</sub> سر بسته	0.471	<b>0.354</b>
	درصد اختلاف	18.25	<b>21.6</b>
میدان	<b>ولت 7000</b>	ولت 7000	ولت 7000
سرعت	<b>1300 mm.min<sup>-1</sup></b>	1300 mm.min <sup>-1</sup>	1300 mm.min <sup>-1</sup>
لاستیک	μ <sub>ه</sub> خندان	<b>0.324</b>	0.435
	μ <sub>ه</sub> سر بسته	<b>0.419</b>	0.534
	درصد اختلاف	<b>22.67</b>	18.53

### نتیجه گیری

- ۱- اعمال میدان الکتریکی تاثیر معنی داری بر ضرایب اصطکاک دینامیک پسته های خندان و سر بسته دارد. به طوری که با افزایش میدان ضرایب اصطکاک افزایش می یابد.



- ۲- افزایش شدت میدان الکتریکی دارای محدودیت‌هایی نظیر ایجاد قوس الکتریکی بین نمونه‌ها در رطوبت‌های بالا و مسائل ایمنی کاربر و سیستم‌ها را نیز در پی دارد. در این طرح آزمایش شدت میدان ۷۰۰۰ ولت برای لایه‌ای به ضخامت ۲۵ میلی‌متر مناسب ارزیابی شد. بدیهی است که کاهش ضخامت لایه می‌تواند مشکل‌ساز شود.
- ۳- تاثیر رطوبت بر ضرایب اصطکاک دینامیک در تاثیر متقابل با میدان الکتریکی و جنس سطح می‌باشد، به طوری که در سطوح عایق (مانند لاستیک) افزایش رطوبت باعث افزایش ضریب اصطکاک دینامیک شد.
- ۴- سرعت کشش تاثیر معکوس بر ضریب اصطکاک دینامیک نشان داد به طوری که با افزایش سرعت ضرایب اصطکاک پسته‌های خندان و سرپسته هر دو کاهش یافتند.
- ۵- اختلاف بین ضریب اصطکاک دینامیک نمونه‌های خندان و سرپسته در برخی تیمارها مقدار حداکثری را نشان می‌داد به طوری که به منظور طراحی سیستم جداساز برپایه ضریب اصطکاک دینامیک می‌توان در رطوبت ۸ درصد سطح لاستیک و در رطوبت‌های ۱۴ و ۲۴ درصد سطح آلومینیوم هر سه در شدت میدان ۷۰۰۰ ولت را انتخاب نمود.
- ۶- از طرفی چون آلومینیوم در دو سطح رطوبتی ۱۴ و ۲۴ درصد بیشترین درصد اختلاف را بین ضریب اصطکاک دینامیک نمونه‌های خندان و سرپسته نشان داد و همچنین در رطوبت ۸ درصد نیز اختلاف ۱۸/۲۵ درصد به میزان کافی وجود دارد می‌توان آنرا به عنوان سطح اصطکاکی مناسب برای ساخت سیستم جداساز پیشنهاد نمود.
- ۷- بدین ترتیب برای یک سیستم جداساز سطح آلومینیوم، شدت میدان ۷۰۰۰ ولت و سرعت قابل تنظیم بین ۱۳۰۰ تا ۲۵۰۰ میلی‌متر در دقیقه پیشنهاد می‌شود.



## منابع

۱. بصیری، م، اسحق بیگی، ع. ۱۳۸۷. طراحی و ساخت دستگاه جدا کننده بذر به روش الکتروستاتیکی. پنجمین کنگره ملی ماشین‌های کشاورزی. مشهد، ایران، شهریور ماه ۱۳۸۷.
۲. سرمدنیا، غ. (۱۳۷۶). تکنولوژی بذر. انتشارات جهاد دانشگاه مشهد.
3. Aydin, C. (2002). Physical properties of Hazel nuts. Biosystems Engineering, 82:297-303.
4. Fricke, G.1977. The use of electrostatic separation processes in the beneficiation of crude potassium salts. Phosphorous & Potassium, 90, 42-45.
5. Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., and Tabil, L. G. (2005). ). Some physical properties of Pistachio (*Pistacia vera* L.) nut and its kernel. Journal of Food Engineering, 72:30-38.
6. Kelly, E.G., Spottiswood, D.J. 1989. The theory of Electrostatic separation: A review Part I. Fundamentals. Minerals Engineering, 2, 33-46.
7. Krishnan, P. and A. G. Berlage. )1985(. Electrostatic Separation of Flower Paerts from Onion Seeds. Trans of the ASAE. 28, 1676-1679.
8. Lundahl, E. 2001. Electrostatic Separation of Chaff from Grain. US Patent, us 6225587B1.
9. Miller, B. McDonald, and Lawrence Copeland.1997. Seed Production: Principles and Practices. International Thomson Publishing. New York.
10. Ralston, O.C.1961. Electrostatic Separation of Mixed Granular Sollds. Elsevier, Amsterdam, 261pp.



## Surveying the effect of electrostatic field on dynamic and static friction coefficient s of pistachio, part one: dynamic friction ratio

### Abstract

Sorting and grading of agricultural products are important from field to stores. Sorting can be done based on physical, electrical, magnetic and optical properties. Developing new sorting systems needs to study these properties of agriculture products. In this paper, we assume that dynamic and static friction coefficients of pistachio nuts affected by electric field. Therefore, finding situations with maximum difference between friction coefficient of opened and closed pistachio nuts was purposed. Dynamic and static friction coefficient of opened and closed pistachio nuts of Kale-Ghoochi Varsity measured in a full-factorial statistical analyze with change sources of friction surface, moisture, electric field and moving speed. Based on the results, electric field has positive effect on dynamic friction coefficient. On the rubber surface, increasing in moisture content leads to increasing dynamic friction coefficient. Maximum difference between opened and closed pistachio nuts friction ratio, was observed on rubber surface at 8% moisture content and on aluminum surface at 14 and 24% moisture contents on 7000 volt electric field. As a result, because of conductivity, quicker discharge time and results of experiment, aluminum with 7000 volt supply, was proposed for electric field based sorting device.

**Keywords:** Dynamic friction coefficient, pistachio, electric field, friction surface.