

## بررسی اثر میدان الکترواستاتیکی بر ضریب اصطکاک دینامیکی پسته

محمد حسین آق‌خانی<sup>۱\*</sup> - جلال برادران مطیع<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۵/۱۹

### چکیده

جداسازی و درجه‌بندی محصولات کشاورزی در فرآیند تولید تا عرضه، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. جداسازی می‌تواند براساس مشخصات فیزیکی، الکتریکی، مغناطیسی، اپتیکی و غیره انجام شود. لازمه هرگونه طراحی سیستم‌های جدید مطالعه کافی روی مشخصات و رفتار محصولات کشاورزی است. در این مقاله با فرض تأثیرپذیری ضریب اصطکاک دینامیکی از بار الکتریکی ایجاد شده روی نمونه‌ها، شرایطی مد نظر بود که بیشترین اختلاف بین ضریب اصطکاک پسته‌های خندان و سر بسته به منظور طراحی سیستم جداساز مشخص شود. ضرایب اصطکاک دینامیکی نمونه پسته‌های خندان و سر بسته در قالب طرح کاملاً تصادفی با آزمایش فاکتوریل  $3 \times 3 \times 3 \times 2$  فاکتورهای 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 تماس با سه سطح (ورق آهن گالوانیزه، ورق آلومینیوم و تسمه لاستیکی صاف) و شرایط پسته با دو سطح (خندان و سر بسته) در سه تکرار اندازه‌گیری شد. نمونه‌های پسته مورد آزمایش از رقم کله قوچی با رطوبت‌های ۸، ۱۴ و ۲۴ درصد (بر پایه خشک) انتخاب شدند. نتایج از تأثیرپذیری همسوی ضریب اصطکاک دینامیکی با شدت میدان الکتریکی حکایت دارد. همچنین افزایش رطوبت موجب افزایش ضریب اصطکاک در فاکتور سطح اصطکاکی لاستیک گردید. بیشترین اختلاف بین ضریب اصطکاک نمونه‌های خندان و سر بسته در رطوبت ۸ درصد بر روی سطح لاستیک و در رطوبت‌های 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 بار الکتریکی 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.

**واژه‌های کلیدی:** بار الکتریکی، پسته، سطوح اصطکاکی، ضریب اصطکاک دینامیکی

### مقدمه

فیزیکی و مکانیکی آنها دارد. بنابراین لازمه طراحی هرگونه 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 فرآیندهای جداسازی به کار گرفته شده‌اند، اما تأثیر باردار کردن الکترواستاتیکی محصولات بر روی ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی به منظور جداسازی و درجه‌بندی بسیار کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

پسته یکی از محصولات اصلی خشکبار می‌باشد که در بخش‌هایی از جهان از قبیل ایران، آمریکا، ترکیه و سوریه کشت می‌شود. براساس آمار سازمان خوار و بار جهانی (FAO<sup>۳</sup>)، ایران در

جداسازی یکی از بخش‌های مهم در مجموعه تکنولوژی بذر جهت دستیابی به کیفیت بالای ارقام بذرهای اصلاح شده، محسوب می‌شود (Sarmadnia, 1997). بذرهای جمع‌آوری شده از مزرعه اغلب دارای ناخالصی‌های گوناگونی از قبیل: مواد زاید، بذر علف‌های هرز، ساقه، برگ، بذرهای آسیب دیده و ناقص و بذرهای کوچک می‌باشند. بعضی بذرها با تمیز کردن اولیه به صورت کامل پاک شده و به محصول نهایی تبدیل می‌شوند اما در بعضی دیگر عملیات اضافی برای پاک کردن ناخالصی‌ها لازم است (Miller et al., 1997). جداسازی می‌تواند براساس مشخصات فیزیکی، الکتریکی، مغناطیسی، اپتیکی و غیره انجام شود. دقت و راندمان کمی و کیفی جداسازی و درجه‌بندی محصولات کشاورزی بستگی به اطلاع دقیق از خواص

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد و عضو مرکز پژوهشی ماشین‌های کشاورزی

\*- نویسنده مسئول: (Email: aghkani@um.ac.ir)

۲- دانشجوی دکترا مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

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 بذرهایی دارای هدایت الکتریکی کمتر، به دلیل منتقل نکردن بار، به تسمه چسبیده و همراه با آن می‌چرخیدند و به این ترتیب از بذرهایی درشت جدا می‌شدند. بهترین جداسازی در ولتاژ ۱۷ کیلو ولت و سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه تسمه نقاله به دست آمد (Krishnan and Berlage, 1985). لاندا 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 شدن بذرها و باردار شدن آنها می‌شد. یک استوانه فلزی چرخنده متصل به زمین، در مقابل انتهای تسمه، جایی که مخلوط بذرها تخلیه می‌شد، قرار داشت. دانه‌ها به علت چگالی بالاتر، بیشتر تحت تأثیر نیروی وزن و ذرات کاه بیشتر تحت تأثیر 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 (Lundahl, 2001).

بصیری و اسحق بیگی نیز یک دستگاه جداکننده الکتروستاتیکی نوع تسمه‌ای ساختند که با استفاده از خواص الکتریکی بذرها، آنها را درجه بندی و ناخالصی‌ها را تا حد زیادی جدا می‌نمود. اجزای تشکیل دهنده دستگاه شامل: منبع ولتاژ بالا با بیشینه ولتاژ تولیدی ۱۱/۷ کیلو ولت (جریان مستقیم، DC)، مخزن بذرها، استوانه باردار کننده بذرها، تسمه جابه‌جا کننده بذرها، الکتروود یونیزه کننده، سینی جمع‌آوری بذرها، برس تمیز کننده تسمه نقاله، شاسی دستگاه و موتور الکتریکی بود. بذرها توسط باردار کننده استوانه‌ای و الکتروود یونیزه کننده باردار شده و به دلیل نیروی جاذبه الکتریکی بین تسمه و بذرها، به سطح تسمه چسبیده و براساس چگالی جدا می‌شدند. بذرهایی گندم، جو و کلزا در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند. ولتاژ و رطوبت مناسب برای حصول بهترین جداسازی در مورد هر بذرها تعیین گردید. نتایج نشان داد که استفاده از جداکننده اثر معنی‌داری ( $P \leq 0.05$ ) بر افزایش درجه خلوص و وزن هزار دانه در تمامی بذرها دارد (Basiry and Esehaghbeygi, 2012).

در این تحقیق ایده به کارگیری 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 سرپسته از نظر شکل، گوشه‌های نوک تیز پخش بار الکتریکی بر روی آنها متفاوت خواهد بود. طبق نظریه‌های فیزیک الکتریسیته و مغناطیس، چگالی بار الکتریکی در گوشه‌های نوک تیز و زاویه‌دار بیشتر از سایر نقاط یک جسم باردار می‌باشد.

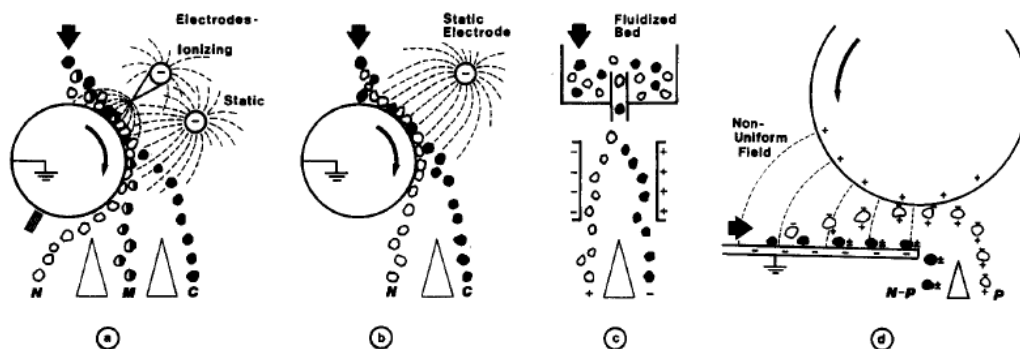
سال ۲۰۱۱ با تولید ۴۲۷ هزار تن پسته در بین کشورهای جهان مقام اول را به خود اختصاص داد. برداشت، انتقال، پوست‌کنی، جداسازی، تمیزکاری، خشک کردن و انبارداری از جمله مراحل فرآوری پسته می‌باشند که در سال‌های اخیر به دلیل اهمیت این محصول استراتژیک بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از عواملی که می‌تواند کیفیت محصول ارائه شده به بازار را افزایش دهد، بازدهی و کیفیت مرحله جداسازی می‌باشد. هدف از این مرحله جداسازی پسته‌های سرپسته، پوک، نارس و غیره، از پسته‌های خندان می‌باشد. در روش معمول جداسازی پسته برداشت شده از درخت که رطوبت بالایی دارد، پوست‌گیری شده، پس از شستشو خشک می‌شود و سپس وارد دستگاه جداساز می‌شود. روش‌های مختلفی برای جداسازی پسته به کار گرفته شده است، از جمله آنها می‌توان به روش‌های مکانیکی، جداساز وزن مخصوص، ماشین بینایی و روش صوتی اشاره کرد. از بین این روش‌ها روش مکانیکی در ترمینال‌های ضبط پسته‌ای کشور رایج است.

جداسازهای الکتروستاتیکی قابلیت و پتانسیل بالای خود را در جداسازی مواد اثبات کرده‌اند (Ralston, 1961)، اما همچنان کاربردهای ناشناخته‌ای دارد مخصوصاً در مواردی که دیگر سیستم‌های جداساز کاربردی نیستند (Kelly and Spottiswood, 1989). براساس روش‌های اصلی باردار کردن ذرات، چهار نوع جداساز الکتروستاتیکی وجود دارد: (۱) تنش بالا یا الکترو-داینامیک<sup>۱</sup>، (۲) الکترو-استاتیک<sup>۲</sup>، (۳) جداسازهای مالشی<sup>۳</sup> و (۴) الکتروفرسیس<sup>۴</sup>. شکل ۱ اساس کار هر یک را نشان می‌دهد.

اگرچه بیشتر جداسازهای الکتریکی از نوع الکترو-استاتیک می‌باشند اما امروزه جداسازهای تنش بالا کاربرد بیشتری باشند. این در حالی است که جداسازهای مالشی موفقیت تجاری محدودی داشته و بیشتر در مطالعات مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Fricke, 1977). اولین جداکننده الکتروستاتیکی تجاری در سال ۱۸۸۰ توسط توماس اوسبورن به منظور جداسازی کاه و مواد سبک دیگر از آرد گندم، اختراع شد (Osborne, 1880). کریشنان و برلاگ یک جداکننده الکتروستاتیکی تسمه‌ای برای جداسازی قسمت‌های گل از بذرها 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 مشبک بود. بذرها توسط الکتروود میله‌ای

۱- ترمینال‌های ضبط پسته محل‌هایی هستند که پسته جمع‌آوری شده از باغات را خریداری، پوست‌گیری، جداسازی و خشک می‌کنند، تا آماده ارائه به بازار مصرف شود.

- 2- High tension
- 3- Electro-Static
- 4- Turboelectric separator
- 5- Dielectrophoresis



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) (Fricke, 1977)

Fig.1. (a) High stress, (b) Electro-static, (c) Sliding isolators and (d) Dielectrophoresis (C: Conductive, N: Non-conductive, P: Polarization, NP: Non-polarization) (Fricke, 1977)

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 تماس با سه سطح (ورق آهن گالوانیزه، ورق آلومینیوم و تسمه لاستیکی صاف) و شرایط پسته با دو سطح (خندان و سرپسته) بود که به صورت فاکتوریل کاملاً تصادفی با سه تکرار اندازه‌گیری و آنالیز گردید. آماده‌سازی سطوح رطوبتی به روش پهن و خشک کردن در هوای آزاد انجام شد. میدان الکتریکی مورد استفاده در آزمایش‌ها به کمک یک صفحه الکترونیکی تولید ولتاژ بالا تأمین شد (شکل ۲ شماره ۲). این برد الکتریکی دارای ورودی برق DC در محدوده ۵ تا ۱۲ ولت و خروجی برق DC در محدوده ۳۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰ ولت می‌باشد. ولتاژ روی صفحات به وسیله‌ی سنش‌گر ولتاژ بالا<sup>۱</sup> مدل Leader LP6 اندازه‌گیری 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 تأثیرگذار است، لذا سه سطح سرعت حرکت نیز انتخاب شد. این سرعت‌ها به وسیله میز متحرک دستگاه اندازه‌گیری اصطکاک دینامیکی ایجاد گردید. صفحات مربوط به سطوح اصطکاک دارای ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی‌متر انتخاب شدند. در قسمت جلویی صفحات محلی برای اتصال سیم حامل ولتاژ و محل اتصال به نخ رابط نیروسنج تعبیه شده است. برای اعمال و پخش یکنواخت بار الکتریکی به صفحه لاستیکی<sup>۲</sup>، یک صفحه آلومینیومی به پشت آن چسبانده شد. از آنجا که مقدار نیروی عمود بر سطح بر مقدار نیروی اصطکاک استاتیکی و دینامیکی تأثیرگذار است، تمام صفحات تماسی مورد آزمایش به کمک

به‌طور کلی می‌توان گفت فرضیه اصلی این تحقیق عبارت است از اینکه با توجه به تأثیر شکل و ساختار محصولات مختلف کشاورزی و ناخالصی‌های همراه با آن، در صورتی که محصولات به صورت الکتروستاتیکی باردار شوند ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی آنها تغییر خواهد کرد و به کمک این تفاوت می‌توان عمل جداسازی و درجه‌بندی را انجام داد. هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر خواص الکتروستاتیکی بر خواص اصطکاک محصول پسته به منظور یافتن راهکاری برای جداسازی دقیق‌تر و سریع‌تر پسته‌های خندان از سرپسته است.

## 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 به‌عنوان 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 پوست‌گیری تهیه شد. رطوبت اولیه نمونه‌ها به روش خشک کردن در آون با دمای  $10.3 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت (Kashaninejad *et al.*, 2005) برابر با ۲۴/۲ درصد (بر پایه خشک) اندازه‌گیری شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه عمل جداسازی پسته‌های خندان از سرپسته به‌طور دستی انجام شد. پس از جداسازی از هر دسته خندان و سرپسته حدود یک کیلوگرم انتخاب و درون پاکت پلاستیکی درب بسته در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، نگهداری شد.

### 1- Hi-voltage probe

۲- به دلیل عایق بودن سطح لاستیک احتمال تجمع بار تنها در محل اتصال سیم حامل ولتاژ وجود داشت.

طرح آزمایشی مورد استفاده در این تحقیق دارای فاکتورهای رطوبت با سه سطح (۲۴/۲، ۱۴/۵ و ۸/۱ درصد)، شدت میدان

مقدار نیروی عمود بر سطح بر حسب نیوتن که در تمام آزمایشات مقداری ثابت و برابر با ۸/۵۳۴ نیوتن بود. داده‌های آزمایش به کمک نرم افزار SPSS نسخه ۱۷ در طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی مورد آنالیز قرار گرفت. همچنین برای مقایسه میانگین اثرات اصلی و اثرات متقابل آنها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد استفاده شد.

در این تحقیق تغییرات نیروی کشش صفحه اصطکاک نسبت به جابه‌جایی اندازه‌گیری و ثبت گردید. از نمودارهای نیرو-جابه‌جایی مقادیر ضریب اصطکاک دینامیکی و ضریب اصطکاک استاتیکی استخراج شد. به‌طور کل با توجه به طرح آزمایشی، تعداد ۴۸۶ آزمایش انجام شد و از هر آزمایش دو داده به‌دست آمد. داده‌های به‌دست آمده بیانگر مقادیر ضرایب اصطکاک دینامیکی و استاتیکی پسته‌های خندان و سرپسته در شدت میدان الکتریکی، سرعت حرکت، سطوح اصطکاک و رطوبت‌های مختلف بودند. داده‌ها به‌وسیله نرم افزار SPSS تحلیل آماری شدند که نتایج اولیه تجزیه واریانس آنها در بخش بعد آمده است.

### نتایج و بحث

با توجه به نتایج آنالیز واریانس (جدول ۱) به‌طور کلی مشاهده می‌شود، با معنی‌دار شدن تمامی اثرات اصلی شامل رطوبت، حالت پسته، سطح اصطکاک، میدان الکتریکی و سرعت حرکت در سطح احتمال ۹۹ درصد، می‌توان به جداسازی دو نمونه پسته خندان و سرپسته به کمک میدان الکتریکی امیدوار بود. همچنین اثر دوگانه حالت پسته و میدان الکتریکی نیز در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار است. به دلیل پخش بار الکتریکی بر روی سطح نمونه‌ها در اثر اعمال میدان الکتریکی مشاهده شد که با افزایش میدان الکتریکی ضریب اصطکاک دینامیکی افزایش می‌یابد. به‌وجود آمدن بار الکتریکی مخالف روی سطح پسته نسبت به سطح اصطکاک باعث به‌وجود آمدن نیروی جاذبه و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک دینامیک شد. اثر میدان الکتریکی روی ضرایب اصطکاک سطوح نیمه رسانا که توسط بورگو و همکاران بررسی شده است نیز گویای متأثر بودن ضرایب اصطکاک از شدت میدان الکتریکی است (Burgo et al., 2013). تفاوت مشخصات فیزیکی سطح پسته‌های خندان نسبت به پسته‌های سرپسته (نظیر وجود گوشه‌ها و لبه‌ها) موجب تفاوت در پخش بار الکتریکی می‌شود در نتیجه اثر متقابل آن با میدان الکتریکی معنی‌دار گردید. تأثیر شکل و خصوصیات سطح نمونه‌ها در جذب بار الکتریکی توسط ایرلند بررسی و اثبات شده است (Ireland, 2012). به‌طور کل در داده‌های آزمایشی مشاهده شد که مقدار ضریب اصطکاک دینامیکی در سرعت ۳۳۰۰ میلی‌متر در دقیقه نسبت به سرعت‌های ۱۳۰۰ و ۲۵۰۰ میلی‌متر در دقیقه کمتر است. دلیل این

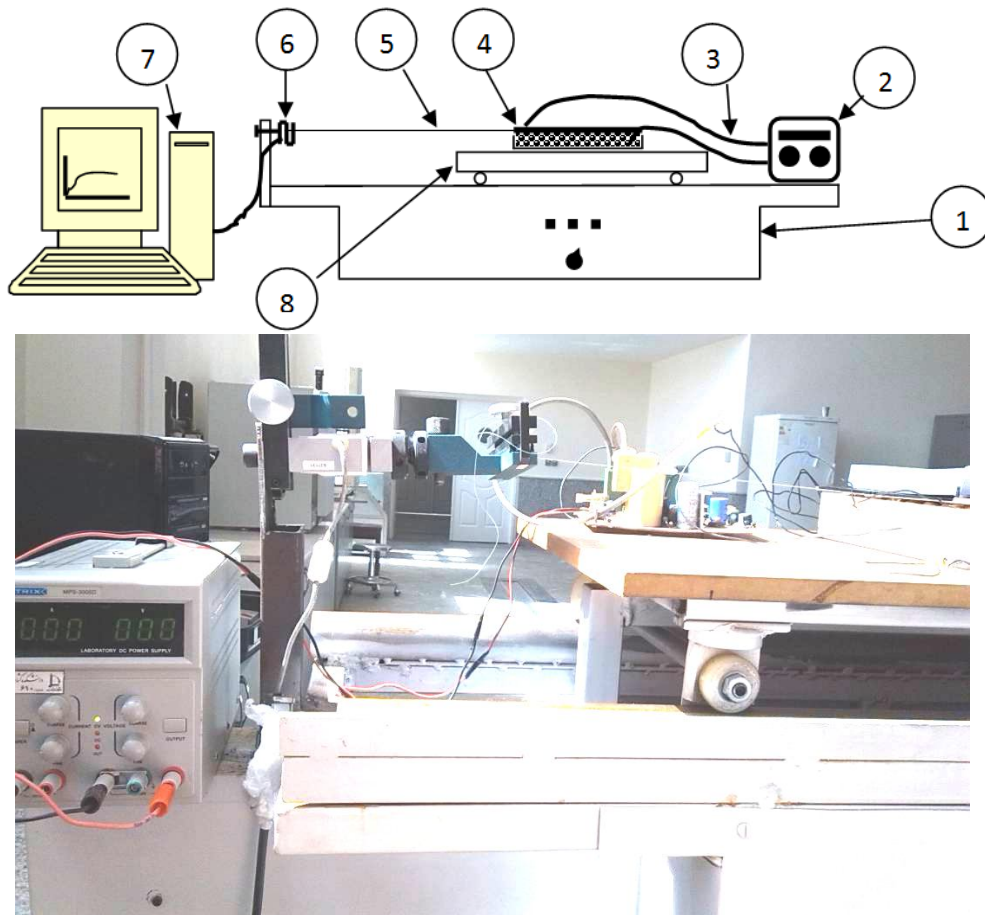
سنگین‌کننده‌های کمکی به وزن یکسان ۸۷۰ گرم رسانده شدند. به‌منظور اندازه‌گیری نیروی اصطکاک در حالات مختلف طرح آزمایشی، از یک نمونه دستگاه اندازه‌گیری اصطکاک دینامیکی (ساخته شده در گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد) استفاده شد. این دستگاه دارای یک میز متحرک است که می‌تواند با سرعت ثابت و یکنواخت در دو جهت حرکت کند. نمونه‌های آزمایش درون ظرفی با ابعاد داخلی ۲۵×۱۵×۳۰۰ میلی‌متر از جنس تفلون با ضخامت دیواره‌ی ۵ میلی‌متر بر روی میز متحرک قرار داده شدند. در کف ظرف یک صفحه آلومینیومی جداگانه به‌عنوان قطب منفی میدان الکتریکی نصب شده بود. صفحات اصطکاک به‌عنوان قطب مثبت در بالای نمونه‌ها و بالای ظرف قرار داده شدند. به‌طوری‌که هیچگونه تماسی بین صفحات اصطکاک و دیواره‌های ظرف به‌وجود نیامد (نمونه‌ها به میزان ۲ تا ۳ میلی‌متر از لبه ظرف بالا زده بودند). ظرف حاوی نمونه‌ها به میز متحرک محکم شده و همراه با آن می‌توانست حرکت کند در حالی که صفحه اصطکاک (که در بالای نمونه‌ها قرار داشت) توسط یک نخ پلاستیکی به لودسل متصل شده و ثابت بود. جهت اندازه‌گیری مقدار نیرو از یک نیروسنج<sup>۱</sup> با ظرفیت ۵۰۰۰ نیوتن با دقت ۰/۰۱ نیوتن که به پایه دستگاه ثابت شده بود استفاده شد. نیروسنج از طریق یک نخ پلاستیکی با قطر ۰/۵ میلی‌متر به صفحات اصطکاک متصل شد. مقدار نیروی اندازه‌گیری شده توسط لودسل از طریق کابل روکش دار مجهز به نوین‌گیر و سوکت DB15 به واحد پردازش دستگاه و سپس به رایانه منتقل و به‌وسیله نرم افزار Qmat (نرم افزار اختصاصی ارائه شده همراه سیستم) ثبت و آنالیز اولیه شد. این نرم افزار قادر است داده‌های نیرو - جابه‌جایی را در بازه‌ی زمانی ۰/۱ ثانیه دریافت، ثبت و به‌صورت نمودار ارائه دهد. شماتیک سیستم اندازه‌گیری نیروی اصطکاک در شکل ۲ آمده است.

پیش از شروع آزمایش نمونه‌های مورد نیاز برای هم دما شدن با محیط حداقل ۲ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند (Aydin, 2002). آزمایشات اندازه‌گیری نیروی اصطکاک در هر تیمار با سه تکرار انجام شد. خروجی اندازه‌گیری نیروی اصطکاک به‌صورت نمودار نیرو - جابه‌جایی در رایانه ذخیره شد. هر آزمایش تا هنگام ثابت شدن مقدار نیرو ادامه می‌یافت. بدین ترتیب مقدار نیرویی که به‌طور ثابت روی نمودار ظاهر می‌شود برابر با نیروی اصطکاک دینامیک و ضریب زاویه قسمت شیب‌دار ابتدایی نمودار برابر با ضریب اصطکاک استاتیکی ثبت شد (شکل ۳). مقدار ضریب اصطکاک دینامیکی از رابطه (۱) برای هر تکرار محاسبه شد.

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

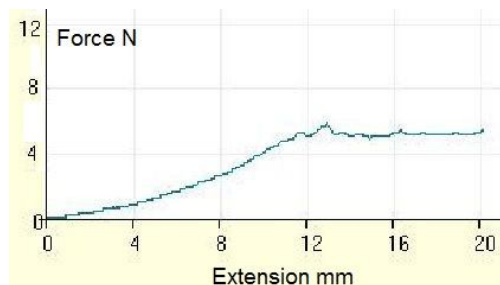
که در این رابطه  $\mu_d$  ضریب اصطکاک دینامیکی،  $F_d$  نیروی اصطکاک دینامیکی اندازه‌گیری شده با دستگاه بر حسب نیوتن و  $N$

پدیده را می‌توان نبود فرصت برای فرورفتن خلل و فرج سطح دانه‌های پسته و سطح اصطکاکی در یکدیگر دانست.



شکل ۲- شماتیک (بالا) و تصویر واقعی (پایین) دستگاه اندازه‌گیری نیروی اصطکاک. ۱) دستگاه تولید حرکت خطی یکنواخت ۲) منبع تولید ولتاژ بالا ۳) سیم‌های انتقال ولتاژ به صفحات میدان الکتریکی ۴) صفحه اصطکاکی، ظرف تفلونی و نمونه‌های آزمایش ۵) نخ پلاستیکی ۶) لودسل ۷) رایانه ۸) میز متحرک دستگاه

**Fig.2.** Schematic apparatus of friction force measuring device. 1) Uniform linear motion machine 2) High voltage source 3) Voltage wires connected to the electric field plates 4) Friction surface, Teflon container and test samples 5) Plastic yarn 6) Load cell 7) Computer 8) Moving table



شکل ۳- نمونه‌ای از نمودارهای نیرو-جاب‌جایی که توسط دستگاه در حین اندازه‌گیری اصطکاک دینامیک تهیه شده است. بخش شیب‌دار و بخش ثابت نیرو در این شکل مشخص می‌باشد.

**Fig.3.** An example of force-displacement graph, obtained by the dynamic friction measuring device, during the measurement. Steep and constant part of the force is specified.

**جدول ۱ - نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به ضریب اصطکاک دینامیکی**  
**Table 1- Results of analysis of variance of the dynamic friction coefficient**

منبع تغییرات Source of variations	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	F
Moisture (A)** رطوبت	0.00565	2	0.00282	4.899
Pistachio_kind (B)** حالت پسته	0.11884	1	0.11884	206.102
Surface (C)** سطح اصطکاکی	0.88769	2	0.44384	769.741
Electric field (D)** میدان الکتریکی	0.30147	2	0.15073	261.412
Speed (E)** سرعت حرکت سطح	0.10257	2	0.05129	88.943
A×B**	0.7193	2	0.3596	62.371
A×C**	0.76281	4	0.1907	330.727
A×D**	0.01698	4	0.00424	7.361
A×E**	0.2867	4	0.00717	12.431
B×C**	0.09839	2	0.04919	85.313
B×D*	0.00410	2	0.00205	3.553
C×D**	0.04074	4	0.01018	17.662
C×E**	0.01916	4	0.00479	8.306
A*B*C**	0.0981	4	0.02452	42.531
A×B×D**	0.0084	4	0.0021	3.643
B×C×D*	0.00021	4	0.00005	.091
B×C×E*	0.00558	4	0.00139	2.419
C×D×E*	0.02670	8	0.00334	5.789
Error خطا	0.18682	324	0.00058	

\* معنی‌دار در سطح ۵ درصد، \*\* معنی‌دار در سطح ۱ درصد، اثرات متقابل غیر معنی‌دار در جدول آورده نشده‌اند.  
 \*Significant at 5% level, \*\* Significant at 1% level, Non-significant data ignored.

اصطکاک دینامیک با افزایش سرعت حرکت میز متحرک دستگاه می‌باشند. این امر به دلیل کاهش زمان در اختیار برای فرورفتن ناصافی‌های سطحی نمونه‌های پسته و سطوح اصطکاکی در سرعت‌های بالای حرکت می‌باشد.

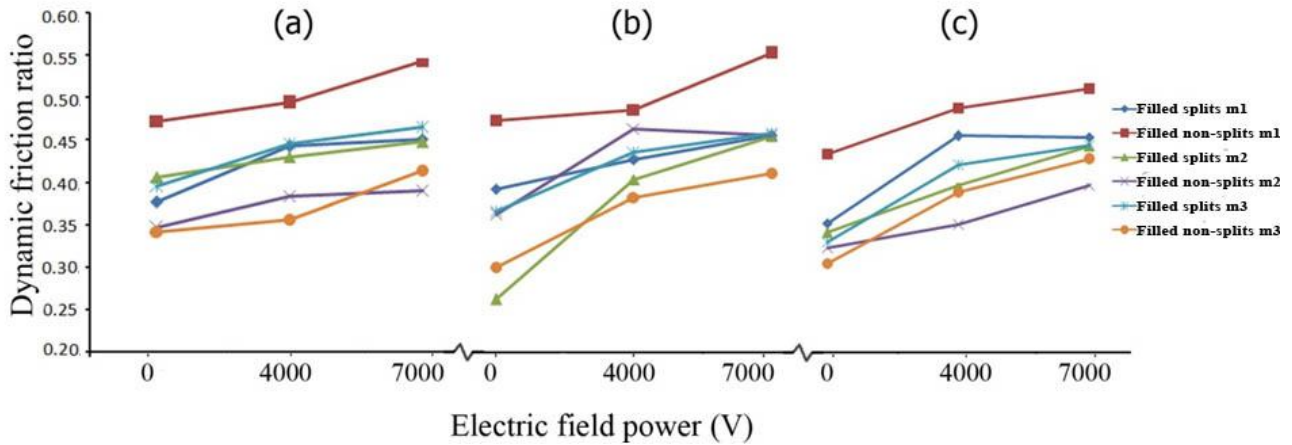
نمودار شکل ۷، ۸ و ۹ تغییرات ضریب اصطکاک دینامیکی را در مقابل تغییرات رطوبت نمونه‌ها به ترتیب بر روی سطوح اصطکاکی آهن گالوانیزه، آلومینیوم و لاستیک نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، افزایش شدت میدان الکتریکی باعث افزایش معنی‌دار ضریب اصطکاک دینامیک شده است؛ که این امر به دلیل ایجاد بارهای مخالف روی نمونه‌های محصول و سطح ورق آهن گالوانیزه می‌باشد و با افزایش میدان میزان این بارها افزایش می‌یابد. ضریب اصطکاک نمونه‌های پسته خندان در رطوبت‌های ۸ و ۲۴ درصد در تمام سطوح میدان الکتریکی بسیار به هم نزدیک می‌باشند. همچنین نمودار بیانگر یک نقطه حداقل در سطح رطوبتی ۱۴ درصد است. اما رفتار نمونه پسته‌های سربسته متفاوت از پسته‌های خندان می‌باشد. به‌طور کل ضریب اصطکاک دینامیکی نمونه‌های سربسته با افزایش رطوبت کاهش یافته است. شدت کاهش از رطوبت ۸ به ۱۴

به‌منظور مقایسه اثر سطوح هریک از فاکتورها، آزمون دانکن بر روی سطوح فاکتورهای رطوبت، میدان الکتریکی، سرعت و سطح اصطکاکی انجام شد. نتایج نشان داد در سطح احتمال ۱ درصد تفاوت معنی‌داری بین سطوح رطوبت وجود ندارد اما در سطح احتمال ۵ درصد، سطح رطوبتی ۸ درصد تفاوت معنی‌داری با دو رطوبت ۱۴ و ۲۴ درصد دارد، از طرفی رطوبت‌های ۱۴ و ۲۴ درصد در یک دسته‌بندی قرار گرفتند. نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد که سطح آهن گالوانیزه و لاستیک در یک دسته‌بندی قرار گرفته و تفاوت معنی‌داری بین آنها و سطح آلومینیوم وجود دارد. همچنین بین هر سه سطح میدان الکتریکی، تفاوت معنی‌دار وجود دارد. مقایسه سطوح سرعت نیز بیانگر آن بود که سرعت‌های ۱۳۰۰ و ۲۵۰۰ میلی‌متر در دقیقه در یک دسته قرار گرفته و بین آنها و سرعت ۳۳۰۰ میلی‌متر در دقیقه تفاوت معنی‌دار وجود دارد.

تغییرات ضریب اصطکاک دینامیکی نسبت به شدت میدان الکتریکی در سطوح مختلف رطوبت و سرعت حرکت روی سطوح اصطکاکی آهن، آلومینیوم و لاستیک به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. این نمودارها به‌طور کل نشانگر کاهش ضریب

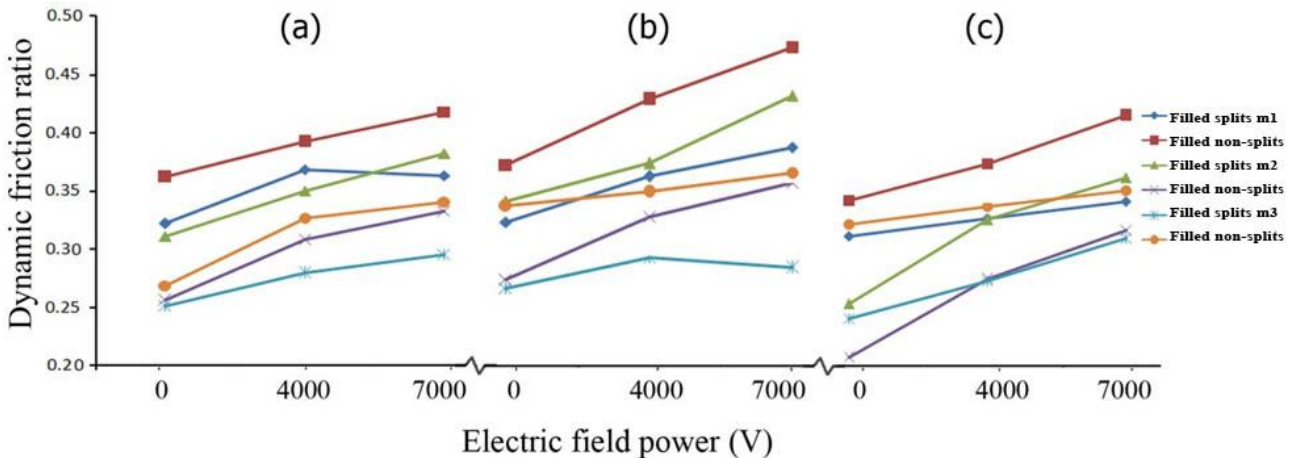
رطوبت ۲۴ درصد ضریب اصطکاک دینامیکی پسته‌های خندان بالاتر می‌باشد.

بسیار بیشتر از شدت کاهش از رطوبت ۱۴ به ۲۴ می‌باشد. همچنین در رطوبت‌های ۸ و ۱۴ درصد در تمام سطوح میدان ضریب اصطکاک دینامیکی پسته‌های سر بسته بالاتر از پسته‌های خندان است. اما در



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

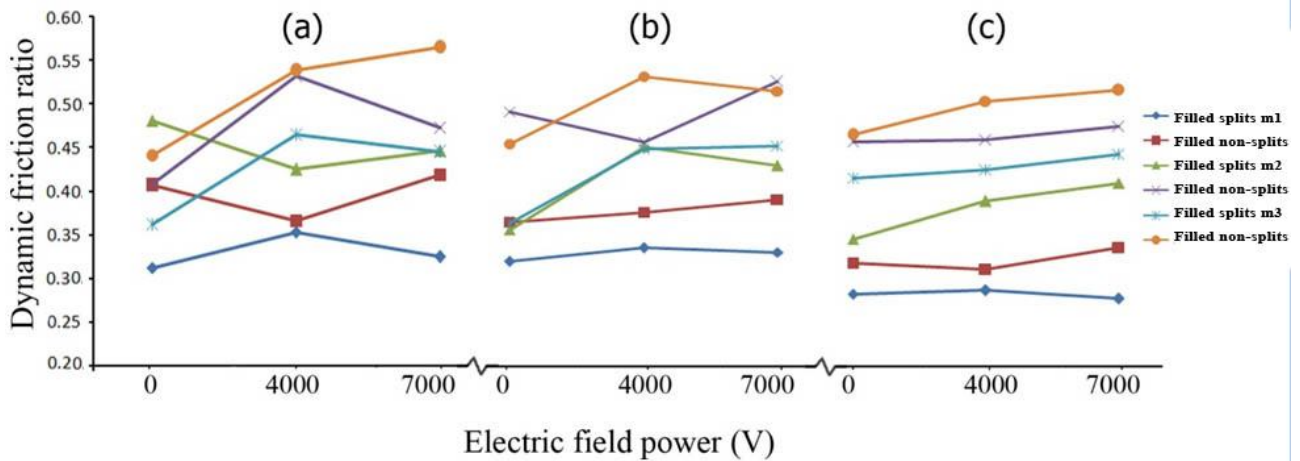
**Fig.4.** The relationship between the intensity of the electric field in terms of volts and dynamic friction coefficient on galvanized iron surface of filled split, filled non-split pistachio in moisture content of  $m_1=8$ ,  $m_2=14$  and  $m_3=24$  %. (a) Speed of 1300 mm per minute, (b) Speed of 2500 per minute and (c) Speed of 3300 mm per minute



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

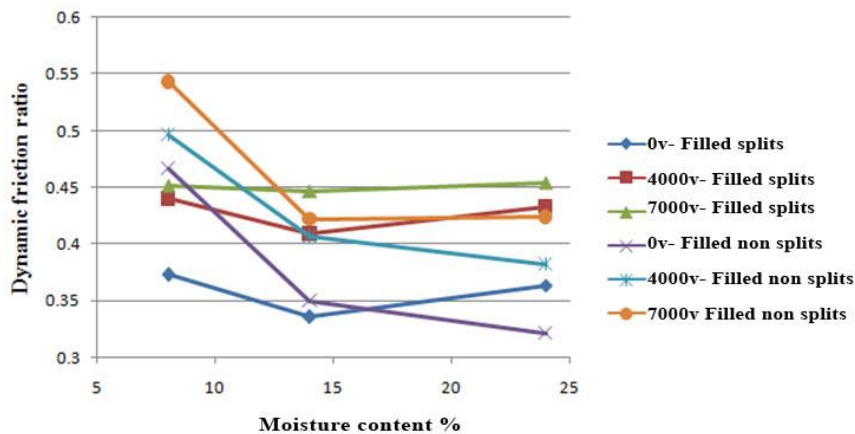
**Fig.5.** The relationship between the intensity of the electric field in terms of volts and dynamic coefficient of friction on aluminum surface of filled splits and filled non-splits pistachios at  $m_1=8$ ,  $m_2=14$  and  $m_3=24$  percent moisture content. a) Speed of 1300 mm per minute b) Speed of 2500 per minute c) Speed of 3300 mm per minute





شکل ۶- رابطه بین شدت میدان الکتریکی بر حسب ولت و ضریب اصطکاک دینامیکی پسته‌های خندان و سربسته بر روی سطح اصطکاکی تسمه لاستیکی در رطوبت‌های  $m_1=8$  و  $m_2=14$  و  $m_3=24$  درصد. (a) سرعت ۱۳۰۰ میلی‌متر در دقیقه (b) سرعت ۲۵۰۰ میلی‌متر در دقیقه (c) سرعت ۳۳۰۰ میلی‌متر در دقیقه

Fig.6. The relationship between the intensity of the electric field in terms of volts and dynamic coefficient of friction on rubber surface of filled splits and filled non-splits pistachios at  $m_1=8$ ,  $m_2=14$  and  $m_3=24$  percent moisture content. a) Speed of 1300 mm per minute b) Speed of 2500 per minute c) Speed of 3300 mm per minute



شکل ۷- تغییرات رطوبت و ضریب اصطکاک دینامیکی پسته‌های خندان و سربسته در سطوح مختلف میدان الکتریکی بر روی سطح اصطکاکی آهن گالوانیزه

Fig.7. Relationship between the moisture and dynamic coefficient of friction of filled splits and filled non-splits pistachio at different levels of electric field on the galvanized iron

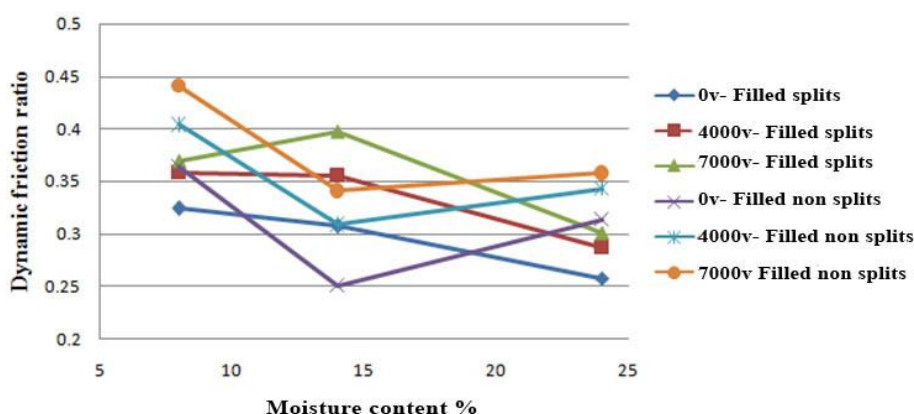
افزایش رطوبت روند کاهشی را نشان می‌دهد به طوری که تنها در میدان الکتریکی ۷۰۰۰ ولت یک افزایش جزئی در رطوبت ۱۴ درصد مشاهده شده و سپس نمودار روند کاهشی خود را ادامه می‌دهد. حداکثر اختلاف بین ضریب اصطکاک نمونه‌های خندان و سربسته که به منظور جداسازی اهمیت پیدا می‌کند به طور میانگین برای هر سه سرعت حرکت، در رطوبت ۸ درصد و میدان الکتریکی ۷۰۰۰ ولت مشاهده می‌شود که برابر با ۱۹/۵ درصد می‌باشد. در مقایسه با شکل‌های ۷ و ۸، نمودار شکل ۹ روند متفاوتی از

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 مینیمم 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. با توجه به نمودار شکل ۸ ضرایب اصطکاک دینامیکی برای نمونه‌های خندان با



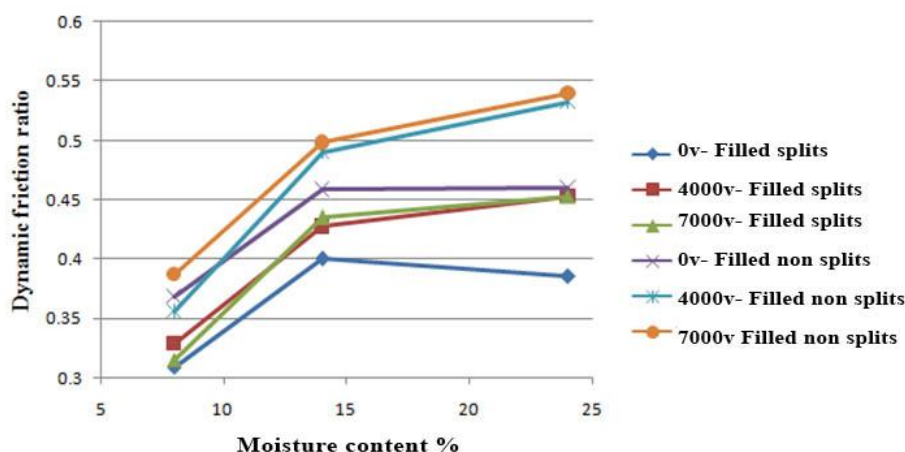
لاستیک بالاتر می‌رود. افزایش میزان بار الکتریکی که از نوع غیر هم‌نام می‌باشند موجب افزایش نیروی جاذبه و ضریب اصطکاک دینامیکی شده است. این در حالی بود که در سطوح اصطکاکی رسانا با افزایش رطوبت و میدان الکتریکی، گذردهی بار الکتریکی نیز افزایش می‌یابد و این امر اثر مختلف الجهتی در مقابل افزایش جاذبه می‌باشد. بدین ترتیب در مورد سطح لاستیک بیشترین اختلاف که به‌طور میانگین در هر سه سرعت حرکت به‌دست آمده است مربوط به سطح میدان ۷۰۰۰ ولت و رطوبت ۲۴ درصد به میزان ۱۹/۲۲ درصد می‌باشد.

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. به‌طور کلی به‌دلیل 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



شکل ۸- تغییرات رطوبت و ضریب اصطکاک دینامیکی پسته‌های خندان و سربسته در سطوح مختلف میدان الکتریکی بر روی سطح اصطکاکی آلومینیوم

Fig.8. Relationship between the moisture content and dynamic coefficient of friction of filled splits and filled non-splits pistachio at different levels of electric field on the aluminum



شکل ۹- تغییرات رطوبت و ضریب اصطکاک دینامیکی پسته‌های خندان و سربسته در سطوح مختلف میدان الکتریکی بر روی سطح اصطکاکی لاستیک

Fig.9. Relationship between the moisture and dynamic coefficient of friction of filled splits and filled non-splits pistachio at different levels of electric field on the rubber

شدت میدان ۷۰۰۰ ولت و سرعت ۱۳۰۰ میلی‌متر در دقیقه به دست آمده است. در رطوبت ۱۴ درصد حداکثر اختلاف مربوط به سطح اصطکاکی آلومینیوم و سرعت ۲۵۰۰ میلی‌متر در دقیقه و شدت میدان ۷۰۰۰ ولت می‌باشد و در رطوبت ۲۴ درصد (که نزدیک به رطوبت محصول پس از پوست‌گیری است) بیشترین اختلاف بین ضرایب اصطکاک دینامیکی نمونه محصول خندان و سربسته باز هم در سطح اصطکاکی آلومینیوم و شدت میدان ۷۰۰۰ ولت و سرعت ۲۵۰۰ میلی‌متر در دقیقه وجود دارد.

به منظور جداسازی پسته‌های سربسته از پسته‌های خندان روش‌های مختلفی تاکنون رایج شده است که در بخش مقدمه به آنها اشاره شد. اما فرآیند جداسازی براساس اصطکاک دینامیکی ممکن است کمی پیچیده باشد. سیستمی که بر این اساس طراحی می‌شود لازم است در وضعیتی کار کند که حالت بهینه‌ای 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 رطوبت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول حداکثر میزان اختلاف در رطوبت ۸ درصد (که نزدیک به رطوبت انبارداری محصول است) در سطح اصطکاکی لاستیک با

**جدول ۲-** مقادیر ضرایب اصطکاک دینامیکی نمونه پسته‌های خندان و سربسته در رطوبت‌های ۸، ۱۴ و ۲۴ درصد در حالات حداکثر اختلاف هر سطح رطوبتی

**Table 2-** Dynamic friction coefficients of filled splits and filled non-splits nuts in moisture content of 8, 14 and 24% in cases of maximum difference in each moisture levels

سطح اصطکاکی	رطوبت	8%	14%	24%
آهن گالوانیزه Galvanized iron	میدان Electric field (V)	7000 ولت	7000 ولت	4000 ولت
	سرعت Speed	2500 mm min <sup>-1</sup>	1300 mm min <sup>-1</sup>	1300 mm min <sup>-1</sup>
	μ <sub>d</sub> خندان Filled splits nuts μ <sub>d</sub>	0.46	0.448	0.445
	μ <sub>d</sub> سربسته Filled non-splits nuts μ <sub>d</sub>	0.542	0.392	0.382
	درصد اختلاف Difference %	15.12	14.28	16.49
آلومینیوم Aluminum	میدان Electric field (V)	7000 ولت	7000 ولت	7000 ولت
	سرعت Speed	2500 mm min <sup>-1</sup>	2500 mm min <sup>-1</sup>	2500 mm min <sup>-1</sup>
	μ <sub>d</sub> خندان Filled splits nuts μ <sub>d</sub>	0.385	0.43	0.281
	μ <sub>d</sub> سربسته Filled non-splits nuts μ <sub>d</sub>	0.471	0.354	0.363
	درصد اختلاف Difference %	18.25	21.6	22.58
لاستیک Rubber	میدان Electric field V	7000 ولت	7000 ولت	7000 ولت
	سرعت Speed	1300 mm min <sup>-1</sup>	1300 mm min <sup>-1</sup>	1300 mm min <sup>-1</sup>
	μ <sub>d</sub> خندان Filled splits nuts μ <sub>d</sub>	0.324	0.435	0.445
	μ <sub>d</sub> سربسته Filled non-splits nuts μ <sub>d</sub>	0.419	0.534	0.567
	درصد اختلاف Difference %	22.67	18.53	21.5

## نتیجه‌گیری

پسته‌های خندان و سربسته هر دو کاهش یافتند. اختلاف بین ضریب اصطکاک دینامیک نمونه‌های خندان و سربسته در برخی تیمارها مقدار حداکثری را نشان می‌داد به طوری که به منظور طراحی سیستم جداساز بر پایه 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. از طرفی چون آلومینیوم در دو سطح رطوبتی ۱۴ و ۲۴ درصد بیشترین درصد اختلاف را بین ضریب اصطکاک دینامیک نمونه‌های خندان و سربسته نشان داد و همچنین در رطوبت ۸ درصد نیز اختلاف ۱۸/۲۵ درصد به میزان کافی وجود دارد می‌توان آن را به عنوان سطح اصطکاکی مناسب برای ساخت سیستم جداساز پیشنهاد نمود. 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.

اعمال میدان الکتریکی تأثیر معنی‌داری بر ضرایب اصطکاک دینامیک پسته‌های خندان و سربسته دارد. به طوری که با افزایش میدان ضرایب اصطکاک افزایش می‌یابد. 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 مشکل ساز شود.

تأثیر رطوبت بر ضرایب اصطکاک دینامیک در تأثیر متقابل با میدان الکتریکی و جنس سطح می‌باشد، به طوری که در سطوح عایق (مانند لاستیک) افزایش رطوبت باعث افزایش ضریب اصطکاک دینامیک شد. سرعت حرکت تأثیر معکوس بر ضریب اصطکاک دینامیک نشان داد به طوری که با افزایش سرعت ضرایب اصطکاک

## References

1. Aydin, C. 2002. Physical properties of Hazel nuts. *Biosystems Engineering* 82: 297-303.
2. Basiry, M., and A. Esehaghbeygi. 2012. Cleaning and charging of seeds with an electrostatic separator. *Applied Engineering in Agriculture* 28 (1): 143-147.
3. Burgo, T. A. L., C. A. Balestrin, and L. B. S. Galembeck. 2013. Friction coefficient dependence on electrostatic tribocharging, *Scientific reports*, 3, 2384.
4. Fricke, G. 1977. The use of electrostatic separation processes in the beneficiation of crude potassium salts. *Phosphorous Potassium* 90: 42-45.
5. Ireland, P. 2012. Dynamic particle-surface tribocharging: The role of shape and contact mode. *Joint Electrostatics Conference*, 12-14 June 2012, Cambridge, ON, Canada.
6. Kashaninejad, M., A. Mortazavi, A. Safekordi, and L. G. Tabil. 2005. Some physical properties of Pistachio (*Pistacia vera* L.) nut and its kernel. *Journal of Food Engineering* 72: 30-38.
7. Kelly, E. G., and D. J. Spottiswood. 1989. The theory of Electrostatic separation: A review Part I. *Fundamentals. Minerals Engineering* 2: 33-46.
8. Krishnan, P., and A. G. Berlage. 1985. Electrostatic separation of flower paerts from onion Seeds. *Trans of the ASAE*. 28: 1676-1679.
9. Lundahl, E. 2001. Electrostatic Separation of Chaff from Grain. US Patent, us 6225587B1.
10. Miller, B. M., and L. Copeland. 1997. Seed Production: principles and practices. International Thomson Publishing. New York.
11. Polat, R., C. Aydin, and B. Erolak. 2007. Some physical and mechanical properties of pistachio nut, *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 13: 237-246.
12. Ralston, O. C. 1961. *Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids*. Elsevier, Amsterdam, 261pp.
13. Sarmadnia, Gh. 1997. *Seed technology*, Jahad Daneshgahi Mashhad press.
14. Osborne, T. B. 1880. Middlings purifier, U. S. Patent No. 224,719 (Abstracted in U.S. Patent Office Official Gazette, Vol. 17.) February 17, 1880.

## Effect of electrostatic field on dynamic friction coefficient of pistachio

M. H. Aghkhani<sup>1\*</sup> - J. Baradaran Motie<sup>2</sup>

Received: 22-11-2013

Accepted: 10-08-2014

**Introduction:** Separation and grading of agricultural products from the production to supply, has notable importance. The separation can be done based on physical, electrical, magnetic, optical properties and etc. It is necessary for any development of new systems to study enough on the properties and behavior of agricultural products.

Some characteristics for separation are size (length, width and thickness), hardness, shape, density, surface roughness, color, speed limit, aerodynamic properties, electrical conductivity, elasticity and coefficient of static friction point.

So far, the friction properties of agricultural products used in the separating process, but the effect of electrostatic charging on static and dynamic coefficients of friction for separation had little attention. The aim of this study was to find out the interactions between electrostatic and friction properties to find a way to separate products that separation is not possible with conventional methods or not sufficiently accurate. In this paper, the separation of close and smiley pistachios by electrostatic charging was investigated.

**Materials and Methods:** Kalleghoochi pistachio cultivar has the top rank in production in Iran. Therefore, it was used as a sample.

The experimental design that used in this study, had moisture content at three levels (24.2, 14.5 and 8.1 percent), electric field intensity at three levels (zero, 4000 and 7000 V), speed of movement on the surface at three levels (1300, 2500 and 3300 mm per minute), friction surface (galvanized sheet iron, aluminum and flat rubber) and pistachio type at two levels (filled splits and closed) that was measured and analyzed in completely randomized factorial design.

A friction measuring device (built in Ferdowsi University of Mashhad) used to measure the friction force. It has a removable table that can move in two directions with adjustable speed. The test sample put into the vessel with internal dimensions of 300 × 150 × 25 mm and with wall thickness of 5 mm placed on trolleys. In the bottom of the container a separate aluminum plate was installed as the negative pole of the electric field. The friction plates as a positive pole placed on top of the sample. There were no contact between friction plates and walls of vessel (samples were about 2 to 3 mm higher from the edges of wall).

Frictional force changes due to movement of table, measured and recorded by an accurate load cell. From force-displacement curves, the coefficient of dynamic friction and static coefficient of friction calculated. In general, according to the experimental design, 486 tests were performed.

**Results and Discussion:** According to the results of statistical analysis, there is significant interaction affect between pistachios type and electrical field, as well as, the interaction between electrical field and speed, on dynamic coefficient of friction. It means two pistachio types can be separated by electrical charging.

Different physical properties of surface of filled non-splits pistachio nuts (such as corners and edges) and filled splits ones, caused differences in the distribution of electric charge and as a result, its interaction with the electric field were significant.

Changes in dynamic coefficient of friction according to the electric field intensity at different levels of moisture content and speed on the friction surfaces of iron, aluminum and rubber, was drawn in Fig.4, 5 and 6, respectively. These figures reflected the reduction of dynamic coefficient of friction by increasing the movement speed of table.

According to Fig.7, increasing the intensity of the electric field increases the dynamic coefficient of friction. Because this leads to build the opposition charge on samples and galvanized iron sheets, and with increase of electrical field, these charges will rise.

Fig.9 shows different trends of variation of dynamic coefficient of friction against moisture on rubber surface. This chart shows the higher coefficient of friction of filled non-splits samples than filled splits in all

1- Associate Professor of Biosystems Engineering and Member of Research Center for Agricultural Machines, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- PhD student of Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(\*- Corresponding Author Email: Aghkhani@um.ac.ir)

cases and shows an increasing trend with increasing humidity.

**Conclusions:** Table 2 presents the dynamic coefficients of friction in different states on different levels of moisture content. According to this table, the maximum difference was achieved in moisture content of 8% (which is close to the product storage moisture) in rubber surface with field strength of 7000 V and 1300 mm per minute speed. On 14 percent moisture content, the maximum difference was achieved on aluminum surface by 2500 millimeter per minute speed and 7000 V field strength. By the results, on 24 percent moisture content (the moisture close to peeling process) the maximum difference between filled non-splits and filled splits pistachios friction was achieved on aluminum surface, 7000 V electric field strength and 2500 millimeter per minute table speed.

Thus, to have a separation system, the aluminum surface, 7000 V electric field strength and adjustable speed between 1300 to 2500 mm per minute is recommended.

**Keywords:** Dynamic friction coefficient, Electric field, Friction surface, Pistachio