

مقاله پژوهشی

مطالعه تغییرات ویژگی‌های مربوط به شکل و اندازه ورقه‌های نازک خارک در خشک‌کن هیبریدی الکتروهیدرودینامیک-جریان همرفتی مجهز به سامانه پردازش تصویر

آیدین ایمانی^۱، سید سعید محتسبی^{۲*} و مهدی کرامت جهرمی^۳

چکیده

خشک کردن خرما در مرحله خارک یک عملیات رایج در مناطق خرماخیز کشور نظیر جهرم است که در آن محصول تولیدی دارای شرایط کیفی کاملاً متفاوتی از لحاظ ویژگی‌های بافتی، رنگ، بو و طعم نسبت به خرما است. روش الکتروهیدرودینامیک (EHD) یک روش خشک‌کردن غیرحرارتی در دما و فشار محیط است که می‌تواند باعث حفظ کیفیت مواد خشک شده شود. در این مطالعه، از یک خشک‌کن هیبریدی الکتروهیدرودینامیک-جریان همرفتی مجهز به سامانه پردازش تصویر برای بررسی تغییرات ویژگی‌های مربوط به شکل و اندازه ورقه‌های نازک خارک در طول فرآیند خشک‌کردن استفاده شد. هدف این پژوهش بررسی میزان تغییرات ویژگی‌های مربوط به شکل و اندازه شامل محیط، مساحت، قطر، کشیدگی و گردی نمونه‌ها در طول فرایند خشک‌کردن به روش‌های الکتروهیدرودینامیک (در دماهای ۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس)، روش هوای گرم (در دمای ۶۰°C) و روش هیبریدی (در دمای ۶۰°C) است. بررسی اثرات سرعت هوا و دما بر روی مؤلفه‌های مرتبط با شکل و اندازه با استفاده از تجزیه واریانس انجام گرفت. نتایج نشان داد، میزان تغییرات ویژگی‌های مربوط به شکل و اندازه محصول در روش هوای گرم بیشترین مقدار و در روش الکتروهیدرودینامیک در دمای ۲۵°C کمتر از دیگر روش‌ها بود. با توجه به نتایج به دست آمده، محصول نهایی حاصل از روش الکتروهیدرودینامیک از کیفیت بالاتری در مقایسه با روش‌های دیگر برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: خارک، بینایی ماشین، خشک‌کردن، الکتروهیدرودینامیک، هوای گرم.

ارجاع: ایمانی آ.، محتسبی س.، س. و کرامت جهرمی م. ۱۴۰۲. مطالعه تغییرات ویژگی‌های مربوط به شکل و اندازه ورقه‌های نازک خارک در خشک‌کن هیبریدی الکتروهیدرودینامیک-جریان همرفتی مجهز به سامانه پردازش تصویر. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۹: ۴۴-۴۳.
<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14176.641>

۱- دستیار پژوهشی، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

۲- استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

* نویسنده مسئول: mohdaseb@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸

مقدمه

عدم هم‌رسی میوه در زمان برداشت، از مشکلات مهم رقم شاهانی، به عنوان دومین خرمای مهم ایران است (Sarhadi *et al.*, 2017). بخش عمده‌ای از محصول در زمان برداشت مربوط به خارک است. در بین مراحل خوراکی خرما، خارک دارای بالاترین میزان رطوبت است و در نتیجه فعالیت‌های میکروبیولوژیکی می‌تواند دچار تخمیر شود (Mortazavi *et al.*, 2010). شرایطی نظیر دما و زمان خشک‌شدن در فرآیند رطوبت‌گیری بر ویژگی‌های کیفی محصول دخیل است (Yang & Atallah, 1985). استفاده از دمای پایین در فرآیند خشک‌کردن باعث حفظ کیفیت مواد غذایی می‌شود اما زمان خشک‌کردن را طولانی‌تر می‌کند (Miranda *et al.*, 2008).

فرآیند خشک‌کردن به روش الکتروهیدرودینامیک یک فناوری غیرگرمایی، مفید و اقتصادی از لحاظ مصرف انرژی است که جایگزین مناسبی برای خشک‌کردن به شیوه حرارتی است (Martynenko & Kudra, 2016; Martynenko *et al.*, 2017). استفاده از خشک‌کن الکتروهیدرودینامیک در فرآیند خشک‌کردن مواد و محصولات غذایی و دارویی در فشار و دمای محیط باعث کاهش تغییرات نامطلوب خواص فیزیکی و شیمیایی مواد می‌گردد؛ این مورد از مزیت‌های روش خشک‌کردن به شیوه الکتروهیدرودینامیک نسبت به روش‌های خشک‌کردن به شیوه حرارتی است. روش الکتروهیدرودینامیک در مقایسه با روش‌های انجمادی و هم‌رفتی، دارای مزیت‌هایی از جمله هزینه کم‌تر، افزایش کیفیت محصول خروجی، طراحی ساده‌تر و مصرف انرژی کم‌تر است (Bajgai *et al.*, 2006). اگرچه مدت زمان خشک‌شدن محصول در خشک‌کن‌های الکتروهیدرودینامیک در مقایسه با روش‌هایی مانند مایکروویو بیشتر است، ولی با این حال استفاده از خشک‌کن‌های الکتروهیدرودینامیک از نظر مصرف انرژی کمتر و دارا بودن کیفیت بالاتر محصول خشک شده ارجح است (Esehaghbeygi *et al.*, 2014).

تحقیقات مختلفی در خصوص خشک‌کن‌های الکتروهیدرودینامیک انجام شده است (Iranshahi *et al.*, 2023; Mirzaei-Baktash *et al.*, 2022; Keramat-Jahromi *et al.*, 2021; Shi *et al.*, 2017; Martynenko & Zheng, 2016; Pirnazari *et al.*, 2016; Ding *et al.*,

2015). در برخی تحقیقات روش خشک‌کردن الکتروهیدرودینامیک با سایر روش‌های خشک‌کردن مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. در این زمینه می‌توان به مقایسه روش خشک‌کردن الکتروهیدرودینامیک با خشک‌کردن در آون و هوای آزاد (Bai *et al.*, 2013; Bai *et al.*, 2012)، خشک‌کردن ورقه‌های نازک میوه با روش الکتروهیدرودینامیک و مقایسه آن با روش هوای گرم (Elmizadeh *et al.*, 2017)، خشک‌کردن برش‌های نازک موز با استفاده از سه روش الکتروهیدرودینامیک، خشک‌کردن در آون و خشک‌کردن با هوای گرم (Pirnazari *et al.*, 2014) و خشک‌شدن ورقه‌های گوجه فرنگی با استفاده از خشک‌کن الکتروهیدرودینامیک و مقایسه آن با روش خشک‌کردن در آون و روش هوای آزاد (Esehaghbeygi & Basiri, 2011) اشاره کرد. با توجه به این که روش خشک‌کردن الکتروهیدرودینامیک روش سریعی نیست، اما انتخاب خوبی برای ترکیب با سایر روش‌های خشک‌کردن است (Esehaghbeygi *et al.*, 2014). در مطالعات معدودی از ترکیب روش الکتروهیدرودینامیک و روش هوای گرم در خشک‌کردن محصولات استفاده شده است (Keramat-Jahromi *et al.*, 2015; Dinani *et al.*, 2014; Dinani *et al.*, 2021).

پردازش تصویر برخط به عنوان یک ابزار عالی برای کنترل بازخورد خشک‌کن‌ها معرفی شده است (Martynenko, 2017). فناوری بینایی ماشین ابزاری مناسب برای پایش و کنترل لحظه‌ای کیفیت مواد غذایی در فرآیند خشک‌کردن است (Aghbashlo *et al.*, 2014). از این رو، محققان متعددی از روش پردازش تصویر و بینایی ماشین در تحقیقات مرتبط با خشک‌کن استفاده نموده‌اند (Mennouche *et al.*, 2017; Izli, 2016). اگرچه تحقیقات فراوانی در زمینه کاربرد پردازش تصویر در خشک‌کن‌های مختلف انجام شده است، با این وجود، تحقیقات کمی در زمینه استفاده از روش پردازش تصویر در خشک‌کن‌های الکتروهیدرودینامیک گزارش شده است. در زمینه کاربرد غیر برخط¹ سامانه‌های پردازش تصویر در خشک‌کن‌های الکتروهیدرودینامیک می‌توان به مطالعه تغییرات رنگی ورقه‌های سیب در یک خشک‌کن الکتروهیدرودینامیک (Martynenko & Zheng, 2016)، مقایسه ویژگی‌های رنگی (L^* ، a^* ، b^* و dE) ورقه‌های

مواد و روش‌ها

نمونه‌های خارک به صورت تصادفی از نخلستان‌های شهرستان جهرم جمع‌آوری و انتخاب شدند. به منظور کاهش تنفس و تغییرات فیزیولوژیکی و شیمیایی، نمونه‌ها داخل بسته‌های نایلونی قرار داده شد و تا زمان انجام آزمایش‌ها درون سردخانه و در دمای $9/0 \pm 0/5$ درجه سلسیوس نگهداری شدند (Martynenko & Zheng, 2016). قبل از انجام آزمایش‌های خشک‌کردن، نمونه‌ها به مدت سه ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند (Martynenko & Zheng, 2016). با استفاده از یک دستگاه ورقه‌کن برقی، ورقه‌های نازک و یکنواختی از محصول به ضخامت ۳ میلی‌متر تهیه شد. وزن تقریبی نمونه‌های خارک در هر آزمایش حدود ۱۰ گرم در نظر گرفته شد. خشک‌کن الکتروهِیدرودینامیک دارای ۱۶ عدد الکتروُد سوزنی به طول ۴۰ میلی‌متر بود که با آرایش مربع شکل با فاصله ۳۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار داشتند. توان منبع ولتاژ بالا، یک وات و فاصله بین الکتروُد‌های سوزنی و الکتروُد صفحه‌ای زمین (از جنس ورق مسی به ابعاد 18×18 سانتی مترمربع)، سه سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آزمایش‌های خشک‌کردن الکتروهِیدرودینامیک برای سه سطح از دماهای ۲۵، ۳۵ و ۶۰ درجه سلسیوس و سه سطح از سرعت هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه در سه تکرار انجام شد. آزمایش‌های مربوط به روش خشک‌کردن الکتروهِیدرودینامیک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به عنوان روش هیبریدی الکتروهِیدرودینامیک- هوای گرم در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های خشک‌کردن به روش هوای گرم محض نیز برای دمای ۶۰ درجه سلسیوس در سه سطح از سرعت هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه و در سه تکرار انجام شد. با صرف نظر از محتوای رطوبت تعادلی نمونه‌ها، نسبت رطوبت (که با استفاده از ترازوی دیجیتال در هر لحظه ثبت و توسط سامانه محاسبه می‌شد) در طول فرآیند خشک‌کردن فرآیند تا زمان کاهش رطوبت نمونه‌ها به نسبت رطوبت ۰/۲ ادامه داشت (Erbay & Icier, 2010; Dinani et al., 2014).

به منظور تهیه تصویر از نمونه در ابتدا و انتهای فرآیند خشک‌شدن، از ابزارهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری شامل رایانه، دوربین Microsoft lifeCam studio (۵)

نازک موز در سه روش خشک‌کردن در آون، خشک‌کردن با هوای گرم و خشک‌کردن الکتروهِیدرودینامیک (Pirnazeri et al., 2014)، مطالعه تغییرات کلی رنگ ورقه‌های نازک قارچ در روش دوگانه الکتروهِیدرودینامیک- هوای گرم (Dinani et al., 2015) و مطالعه ورقه‌های نازک موز با روش الکتروهِیدرودینامیک و مقایسه با روش خشک‌کردن مایکروویو (Esehaghbeygi et al., 2014) اشاره کرد. اخیراً خشک‌شدن لایه‌های نازک سیب و توت‌فرنگی با خشک‌کن الکتروهِیدرودینامیک (Paul et al., 2022)، اثرات هوای گرم و الکتروهِیدرودینامیک بر سینتیک خشک‌شدن و کیفیت ورقه‌های نازک قارچ (Mirzaei-Baktash et al., 2022)، اثر استفاده از جریان مستقیم و جریان متناوب منبع ولتاژ در خشک‌کن‌های الکتروهِیدرودینامیک (Martynenko & Kudra, 2022) و مقایسه روش خشک‌کردن الکتروهِیدرودینامیک با روش‌های مختلف خشک‌کردن (Iranshahi et al., 2023) بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است.

در این مطالعه، از یک سامانه پردازش تصویر بر روی خشک‌کن هیبریدی الکتروهِیدرودینامیک-جریان همرفتی جهت بررسی تغییرات ویژگی‌های ظاهری ورقه‌های نازک خارک (مؤلفه‌های مربوط به شکل و اندازه) در طول فرآیند خشک‌کردن استفاده شد. در واقع هدف این پژوهش بررسی میزان تغییرات ویژگی‌های شامل محیط، مساحت، قطر (قطر نمونه در راستای موازی جریان هوا، قطر عمود بر جریان هوا، قطر بزرگتر، قطر کوچکتر و قطر دایره هم سطح^۱ لایه‌های خارک)، کشیدگی و گردی نمونه‌های خارک در طول فرآیند خشک‌کردن در سه حالت الکتروهِیدرودینامیک (در دماهای ۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس)، هوای گرم (در دمای 60°C) و هیبریدی (الکتروهِیدرودینامیک-هوای گرم یا الکتروهِیدرودینامیک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس) بود. از روش تجزیه واریانس برای بررسی اثر سرعت هوا و دما بر روی مؤلفه‌های مرتبط با شکل و اندازه استفاده شد. مزیت این روش نسبت به تحقیقات گذشته، عدم نیاز به خارج کردن نمونه‌ها از محفظه خشک‌کن در طی فرآیند خشک‌کردن، جهت اندازه‌گیری‌های مرتبط با رطوبت و تصویربرداری است.

1- Feret Diameter (FD)

مشخص شده و عمل سایش نیز باعث کاهش پیکسل‌های روشن در لبه نمونه‌ها می‌شود. همه اطلاعات تصویر بر اساس اطلاعات پیکسل‌ها از تصویر دودویی به دست آمدند. ویژگی‌های مربوط به شکل و اندازه شامل سطح کل، قطر (قطر نمونه در راستای موازی جریان هوا، قطر عمود بر جریان هوا، قطر بزرگتر و قطر کوچکتر) به‌طور مستقیم از تصاویر استخراج شده و قطر معادل (قطر دایره هم سطح لایه‌های خارک)، نسبت کشیدگی و گردی نمونه‌ها مورد محاسبه و بررسی قرار گرفت.

نسبت کشیدگی^۲ (E) به عنوان نسبت اندازه قطر بزرگ‌تر به اندازه قطر کوچک‌تر معرفی می‌گردد. قطر معادل (قطر دایره هم سطح لایه‌های خارک) از رابطه ۱ محاسبه شد که در آن A مساحت سطح نمونه‌ها است. مطابق رابطه ۲ نسبت مساحت نمونه به مجذور محیط دایره‌ای با محیط هم اندازه آن، با عنوان گردی^۳ تعریف می‌شود که در آن P محیط نمونه‌ها است.

$$FD = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

$$R = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2)$$

نتایج و بحث

مساحت سطح

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان می‌دهد اثر حالت خشک‌کردن و اثر سرعت جریان هوا بر نسبت تغییرات سطح به مقدار اولیه به ترتیب در سطح یک درصد و پنج درصد معنی‌دار بود، ولی اثر متقابل سرعت هوا و روش خشک‌کردن بر تغییرات سطح متوسط نمونه‌ها به مقدار اولیه آن، اثر معنی‌داری نداشت.

مقایسه میانگین اثر حالت خشک‌کردن بر تغییرات سطح در آزمون توکی (شکل ۲) نشان می‌دهد که حالت خشک‌کردن هوای گرم (HA) و روش هیبریدی (HY) الکتروهدرودینامیک-هوای گرم (الکتروهدرودینامیک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس) با هم اختلاف معنی‌داری ندارند. همان‌گونه که انتظار می‌رود با کاهش محتوای رطوبتی نمونه‌ها، سطح کل نمونه‌ها کاهش می‌یابد. سخت‌شدن سطح نمونه در دماهای پایین موجب سختی

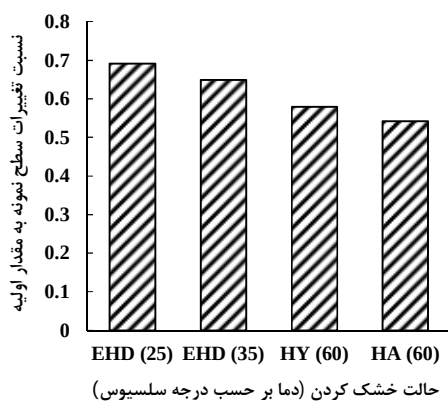
مگاپیکسل، با ابعاد تصویر ۱۰۸۰×۱۹۲۰ پیکسل)، سامانه نورپردازی و رابط گرافیکی کاربر بهره گرفته شد. سامانه تصویربرداری به صورت عمودی در بالای محفظه خشک‌کن و به عنوان جزئی از سامانه طراحی شد. تصاویر دیجیتالی تهیه شده از دوربین در حافظه رایانه ثبت و به منظور کنترل و تحلیل به بانک اطلاعاتی منتقل و مورد پردازش قرار گرفتند. به منظور استخراج ویژگی‌های اندازه و شکل نمونه‌ها ابتدا مراحل پیش‌پردازش شامل حذف نوفه^۱ احتمالی و حذف پس‌زمینه بر روی تصاویر اعمال شد. سپس با استفاده از الگوریتم‌های استخراج ویژگی توسعه‌داده شده در محیط نرم‌افزار Matlab نسخه ۲۰۱۷ مؤلفه‌های مورد مطالعه مربوط به شکل، در هر مرحله استخراج گردید (شکل ۱).



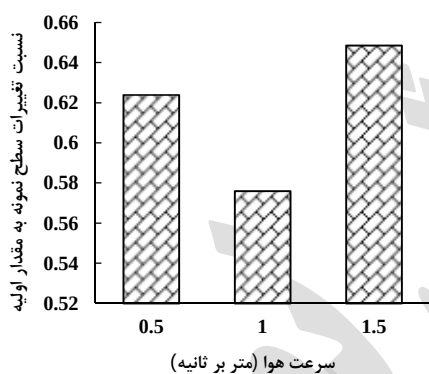
شکل ۱- فرآیند انجام داده‌برداری، پیش‌پردازش و استخراج ویژگی

به منظور حذف نوفه احتمالی، از فیلتر میانی و اعمال حد آستانه ثابت استفاده شد. با کمک ماسک رنگی تعریف شده برای هر یک از مؤلفه‌های تصویر رنگی، جدا سازی نمونه‌ها از پس زمینه انجام گرفت که خروجی این عملیات یک تصویر دودویی از عکس‌های اولیه است. این تصاویر در تمام عملیات بعدی مورد استفاده قرار گرفتند. تصویر حاصل از اعمال حد آستانه دارای نوفه بود، به طوری که نه تنها بخشی از زمینه به عنوان نمونه شناخته شد، بلکه بخشی از نمونه‌ها نیز به عنوان زمینه تشخیص داده شدند. به منظور جداسازی دقیق نمونه‌ها از پس زمینه تصویر و حذف نوفه از عملیات‌های متوالی اتساع و سایش با استفاده از نقاب‌های دایره‌ای با توجه به شکل نمونه‌ها استفاده شد. عمل اتساع باعث افزایش تعداد پیکسل‌های روشن در لبه نمونه‌ها با توجه به همسایگی

خشک‌کن هوای گرم و استفاده از مقدار میانگین در شکل ۳ عامل روند نامنظم بین تغییرات سرعت هوا و تغییرات سطح است.



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر حالت خشک‌کردن بر نسبت تغییرات سطح نمونه به مقدار اولیه



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر سرعت هوا بر نسبت تغییرات سطح نمونه به مقدار اولیه

بافت نمونه‌ها و در نتیجه تغییرات کمتر سطح در دماهای پایین نسبت به دماهای بالاتر در طول فرایند خشک‌کردن می‌شود. با افزایش دما تغییر بیشتری در اندازه سطح کل نمونه‌ها به وجود آمده است (Willis et al., 1999). مطابق شکل ۲، حالت‌های خشک‌کردن الکتروهایدرودینامیک در دمای محیط (۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس) نیز با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند.

همچنین روش دوگانه، روش هوای گرم و روش الکتروهایدرودینامیک در دمای ۳۵ درجه سلسیوس با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند و در یک دسته قرار می‌گیرند. افزایش دما در فرایند خشک‌کردن، موجب افزایش چروکیدگی محصول خشک شده می‌گردد. نتایج کلی نشان‌دهنده تأثیر حداقلی سرعت بر تغییرات چروکیدگی سطح است.

نتایج آزمون توکی در مقایسه میانگین اثر سرعت هوا بر تغییرات سطح نمونه‌ها (شکل ۳) نشان می‌دهد که علی‌رغم تأثیر سرعت هوا بر تغییرات سطح نمونه‌ها در سطح ۵ درصد (جدول ۱)، روند منظمی بین تغییرات سرعت هوا و تغییرات سطح وجود ندارد. علت این موضوع را می‌توان به اثر منفی افزایش سرعت هوا بر پدیده الکتروهایدرودینامیک و اثر معکوس آن در خشک‌کن هوای گرم نسبت داد. برقراری جریان ملایمی از هوا تا جایی که مانع از ایجاد میدان الکتریکی نشود، با کمک به خروج رطوبت از محفظه نقش بسزایی در فرایند خشک‌کردن دارد. افزایش سرعت هوا با برهم زدن باد یونی و در نتیجه ایجاد اختلال در میدان الکتریکی ایجاد شده مانع از عملکرد مناسب میدان الکتریکی در خشک‌کن الکتروهایدرودینامیک می‌شود. لذا رفتار متفاوت جریان هوا در خشک‌کن الکتروهایدرودینامیک و

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر حالت‌های خشک‌کردن و سرعت هوا بر نسبت تغییرات سطح به مقدار اولیه آن

منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
بلوک	۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۶۴ ^{ns}
حالت خشک‌کردن	۳	۰/۱۲۲	۰/۰۴۱	۱۰/۱۱ ^{**}
سرعت هوا	۲	۰/۰۳۳	۰/۰۱۶	۴/۰۵ [*]
حالت × سرعت	۶	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴	۱/۱ ^{ns}
خطا	۲۲	۰/۰۸۹	۰/۰۰۴	
مجموع کل	۳۵	۰/۲۷۶		

^{**} معنی‌دار در سطح یک درصد * معنی‌دار در سطح ۵ درصد ns عدم معنی‌داری

محیط

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۲ نشان می‌دهد، اثر حالت خشک‌کردن در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود، در حالی که اثر سرعت هوا و اثر متقابل سرعت هوا و حالت خشک‌کردن بر تغییرات اندازه محیط اثر معنی‌داری نداشت. مقایسه میانگین نیز با استفاده از آزمون توکی انجام شد. اثر سرعت جریان هوا در حالت‌های مختلف معنی‌دار نیست، ولی با توجه به مقادیر ابتدایی و انتهایی، می‌توان اظهار داشت که تغییرات محیط کاهشی بوده است. به طور کلی با افزایش دما تغییر اندازه محیط

نمونه‌ها، افزایش یافته است (در سطح یک درصد) ولی اثر سرعت جریان هوا بر تغییرات محیط معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین اثر حالت خشک‌کردن بر تغییرات محیط نمونه‌ها در آزمون توکی (شکل ۴) نشان داد که حالت خشک‌کردن هوای گرم و روش دوگانه الکتروهیدرودینامیک - هوای گرم (الکتروهیدرودینامیک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس) با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند. همچنین روش‌های خشک‌کردن الکتروهیدرودینامیک در دماهای مختلف (۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس) نیز با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر حالت‌های خشک‌کردن و سرعت هوا بر مقدار تغییرات اندازه محیط

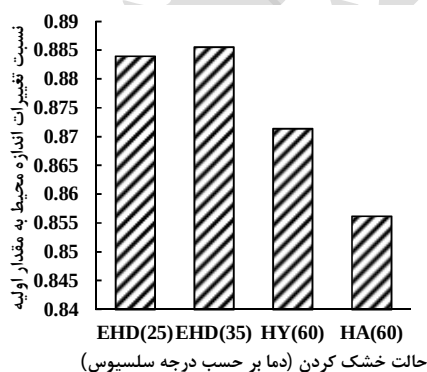
منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
بلوک	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۴ ^{ns}
حالت خشک‌کردن	۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۳/۲۷*
سرعت هوا	۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۲/۰۶ ^{ns}
حالت × سرعت	۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۷۷ ^{ns}
خطا	۲۲	۰/۱۱	۰/۰۰۱	
مجموع کل	۳۵	۰/۲۱		

** معنی‌دار در سطح یک درصد * معنی‌دار در سطح ۵ درصد ns عدم معنی‌داری

قطر

همان‌گونه که انتظار می‌رود نمونه‌ها در طول خشک‌شدن دستخوش کاهش تغییرات اندازه می‌شوند. تغییر اندازه در محصول زمانی رخ می‌دهد که بافت ویسکوالاستیک محصول به سمت فضا‌های خالی که قبلاً توسط رطوبت پر شده بود، جمع شود (Aguilera, 2003). نتایج تجزیه واریانس اثر حالت خشک‌کردن و سرعت هوا بر مقدار تغییرات اندازه قطرهای موازی و عمود بر جریان هوا نتایج مشابهی داشته و نشان می‌دهد اثر حالت خشک‌کردن بر تغییرات اندازه قطرهای موازی و عمود بر جریان هوا در سطح یک درصد معنی‌دار بود. در حالی که اثر سرعت جریان هوا و اثر متقابل سرعت هوا و حالت خشک‌کردن بر تغییرات اندازه قطر موازی جریان هوا معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین اثر حالت خشک‌کردن بر تغییرات قطر موازی/عمود بر جریان هوا در آزمون توکی حاکی از این موضوع است که تغییرات اندازه قطر موازی/عمود بر جریان هوا در حالت خشک‌کردن هوای گرم به طور معنی‌داری از سایر روش‌ها بیشتر بوده است.

نتایج تجزیه واریانس حالت خشک‌کردن و سرعت هوا بر مقدار تغییرات اندازه قطر معادل (قطر دایره هم سطح لایه‌های خارک) در جدول ۳ نشان می‌دهد، اثر حالت خشک‌کردن بر تغییرات اندازه قطر معادل (FD) در سطح یک درصد معنی‌دار بود، در حالی که اثر سرعت جریان هوا و اثر متقابل سرعت هوا و حالت خشک‌کردن بر تغییرات اندازه قطر معادل اثر معنی‌داری نداشته است.



شکل ۴- مقایسه میانگین حالت خشک‌کردن بر نسبت تغییرات اندازه محیط به مقدار اولیه

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر حالت‌های خشک‌کردن و سرعت هوا بر مقدار قطر معادل

F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منابع تغییر
۱/۳ ^{ns}	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۲	بلوک
۳۳/۳۳ ^{**}	۰/۰۳۳	۰/۰۹۹	۳	حالت خشک‌کردن
۳/۲۹ ^{ns}	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶	۲	سرعت هوا
۲/۱۸ ^{ns}	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳	۶	حالت × سرعت
	۰/۰۰۱	۰/۰۲۲	۲۲	خطا
		۰/۱۴۲	۳۵	مجموع کل

** معنی‌دار در سطح یک درصد * معنی‌دار در سطح ۵ درصد ns عدم معنی‌داری

آزمون توکی در مقایسه میانگین اثر حالت خشک‌کردن بر تغییرات کشیدگی نمونه‌ها (شکل ۶) نشان داد که همه حالت‌های خشک‌کردن با یکدیگر اختلاف معنی‌داری دارند.

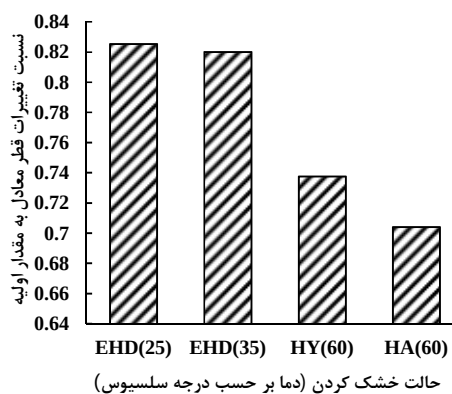
گردی

نتایج تجزیه واریانس طبق جدول ۵ نشان می‌دهد اثر حالت خشک‌کردن در سطح یک درصد معنی‌دار بود، در حالی که اثر سرعت جریان هوا و اثر متقابل سرعت هوا و حالت خشک‌کردن بر تغییرات گردی اثر معنی‌داری نداشت. زمانی که گردی افزایش می‌یابد، کشیدگی کاهش یافته و بر عکس، دماهای پایین‌تر موجب تولید نمونه‌هایی با گردی بیشتر و کشیدگی کمتر می‌شوند که علت آن سخت شدن نمونه‌ها و خمش کمتر آنها در هنگام خشک‌شدن است.

مقایسه میانگین اثر حالت خشک‌کردن بر تغییرات گردی نمونه‌ها (شکل ۷) نشان داد، حالت‌های خشک‌کردن هوای گرم و الکتروهایدرودینامیک در دماهای ۲۵ و ۶۰ درجه سلسیوس با یکدیگر اختلاف معنی‌داری دارند، در حالی که تغییرات گردی در روش الکتروهایدرودینامیک در دمای ۳۵ درجه سلسیوس با روش هیبریدی الکتروهایدرودینامیک در دمای ۲۵ و روش هیبریدی اختلاف معنی‌داری ندارد.

ویژگی‌های کشیدگی و گردی نشان‌دهنده مدور بودن جسم است و هر چه این ویژگی‌ها به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده گردی بیشتر جسم است. تغییرات افزایشی کشیدگی در طول خشک‌شدن نشان‌دهنده افزایش نسبت تغییرات قطر بزرگتر نسبت به کوچک‌تر است. تغییرات گردی نسبت به کشیدگی رفتارهای عکس یکدیگر نشان می‌دهند (Yadollahinia et al., 2009). در دماهای پایین کاهش کمتری در گردی به دست آمد.

مقایسه میانگین اثر حالت خشک‌کردن بر تغییرات قطر معادل در آزمون توکی (شکل ۵) نشان داد، روش خشک‌کردن هوای گرم و روش دوگانه الکتروهایدرودینامیک-هوای گرم (الکتروهایدرودینامیک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس) با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند، همچنین حالت‌های خشک‌کردن الکتروهایدرودینامیک در دمای محیط (۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس) نیز با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند. رفتار تمام تغییرات FD در حالت‌ها، ضخامت‌ها و سرعت هوای مختلف شبیه رفتار تغییرات سطح لایه‌های خارک است. بنابراین تمام توضیحات مربوط به تغییرات سطح برای رفتار تغییرات FD صادق است.



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر حالت خشک‌کردن بر نسبت تغییرات قطر معادل به مقدار اولیه

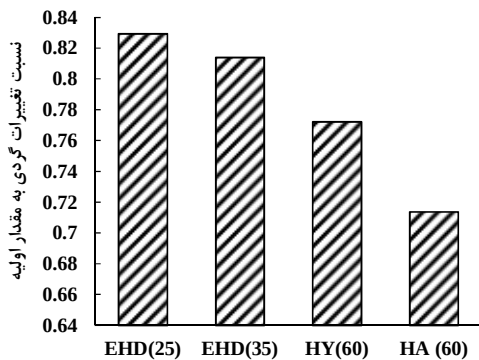
کشیدگی

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۴ نشان می‌دهد که اثر حالت خشک‌کردن در سطح یک درصد معنی‌دار بود، در حالی که اثر سرعت جریان هوا و اثر متقابل سرعت هوا و حالت خشک‌کردن بر تغییرات کشیدگی اثر معنی‌داری نداشت.

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر حالت‌های خشک‌کردن و سرعت هوا بر مقدار تغییرات کشیدگی

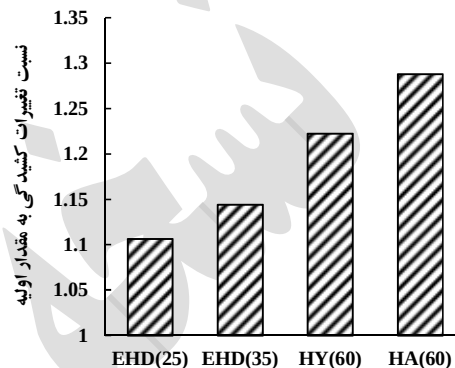
منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
بلوک	۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۹۸ ^{ns}
حالت خشک‌کردن	۳	۰/۱۷۷	۰/۰۵۹	۳۴/۱۲ ^{**}
سرعت هوا	۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۱/۶۷ ^{ns}
حالت × سرعت	۶	۰/۰۲۸	۰/۰۰۵	۲/۶۵ ^{ns}
خطا	۲۲	۰/۰۳۸	۰/۰۰۲	
مجموع کل	۳۵	۰/۲۵۲		

** معنی‌دار در سطح یک درصد * معنی‌دار در سطح ۵ درصد ns عدم معنی‌داری



حالت خشک کردن (دما بر حسب درجه سلسیوس)

شکل ۷- مقایسه میانگین اثر حالت خشک‌کردن بر نسبت تغییرات گردی به مقدار اولیه



حالت خشک کردن (دما بر حسب درجه سلسیوس)

شکل ۶- مقایسه میانگین اثر حالت خشک‌کردن بر نسبت تغییرات کشیدگی به مقدار اولیه

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر حالت‌های خشک‌کردن و سرعت هوا بر مقدار تغییرات گردی

منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
بلوک	۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۲/۱ ^{ns}
حالت خشک‌کردن	۳	۰/۰۷۲	۰/۰۲۴	۱۲/۸۲ ^{**}
سرعت هوا	۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۹۶ ^{ns}
حالت × سرعت	۶	۰/۰۱۸	۰/۰۰۳	۱/۵۹ ^{ns}
خطا	۲۲	۰/۰۴۱	۰/۰۰۲	
مجموع کل	۳۵	۰/۱۴۳		

** معنی‌دار در سطح یک درصد * معنی‌دار در سطح ۵ درصد ns عدم معنی‌داری

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر از مزایای روش پردازش تصویر جهت مطالعه تغییرات ویژگی‌های مربوط به شکل و اندازه محصول خارک در طی فرآیند خشک شدن بهره برد. روش‌های خشک‌کردن متفاوت از قبیل روش الکتروهیدرودینامیک، روش هوای گرم و روش دوگانه (الکتروهیدرودینامیک- هوای گرم) مورد ارزیابی قرار گرفتند که محصول نهایی از روش الکتروهیدرودینامیک از کیفیت بالاتری برخوردار بود. اثر سرعت هوا و دما بر روی مؤلفه‌هایی مانند مساحت سطح، محیط، کشیدگی، قطر، کشیدگی و گردی با

استفاده از تجزیه واریانس مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج کلی حاصل از استخراج ویژگی‌ها با استفاده پردازش تصاویر حاکی از آن بود که ویژگی‌های ظاهری محصول در روش الکتروهیدرودینامیک بهتر از دو روش هوای گرم و دوگانه حفظ شد. برای کارهای آینده می‌توان با توسعه مدل‌های هوشمند و استفاده از سامانه‌های نظارتی برخط روند تغییرات ویژگی‌های ظاهری را مورد بررسی قرار داد و از این عوامل برای تنظیم و نظارت بر دستگاه متناسب با تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی محصول استفاده کرد.

منابع

- versus conventional drying methods: A comparison of key performance indicators. *Energy Conversion and Management*, 116:661.
- İZLİ, G. (2016). Total phenolics, antioxidant capacity, colour and drying characteristics of date fruit dried with different methods. *Food Science and Technology*, 37: 139-147.
- Keramat-Jahromi, M., Mohtasebi, S. S., Mousazadeh, H., Ghasemi-Varnamkhasti, M., & Rahimi-Movassagh, M. (2021). Real-time moisture ratio study of drying date fruit chips based on on-line image attributes using kNN and random forest regression methods. *Measurement*, 172: 108899.
- Martynenko, A. (2017). Computer vision for real-time control in drying. *Food Engineering Reviews*, 9: 91-111.
- Martynenko, A., & Kudra, T. (2016). Electrically-induced transport phenomena in EHD drying—A review. *Trends in food science & technology*, 54: 63-73.
- Martynenko, A., & Kudra, T. (2022). Alternating versus direct current in electrohydrodynamic drying. *Drying Technology*, 40(11): 2382-2395.
- Martynenko, A., & Zheng, W. (2016). Electrohydrodynamic drying of apple slices: Energy and quality aspects. *Journal of Food Engineering*, 168: 215-222.
- Martynenko, A., Astatkie, T., Riaud, N., Wells, P., & Kudra, T. (2017). Driving forces for mass transfer in electrohydrodynamic (EHD) drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43: 18-25.
- Mennouche, D., Boubekri, A., Chouicha, S., Bouchekima, B., & Bouguettaia, H. (2017). Solar drying process to obtain high standard "deglet-nour" date fruit. *Journal of Food Process Engineering*, 40(5): e12546.
- Miranda, M., Maureira, H., Rodriguez, K. & Vegalvez, A. (2008). Influence of temperature on the drying kinetics, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Aloe Vera (*Aloe Barbadensis* Miller) gel. *Journal of Food Engineering*, 91 (2): 297-304.
- Mirzaei-Baktash, H., Hamdami, N., Torabi, P., Fallah-Joshaqani, S., & Dalvi-Isfahan, M. (2022). Impact of different pretreatments on drying kinetics and quality of button mushroom slices dried by hot-air or electrohydrodynamic drying. *LWT*, 155: 112894.
- Mortazavi, S. M. H., Arzani, K., & Arujalian, A. A. (2010, March). Modified atmosphere packaging of date fruit (*Phoenix dactylifera* L.) cultivar cultivar 'Barhee' in Khalal stage. In *IV International Date Palm Conference* 882 (pp. 1063-1069).
- Aghbashlo, M., Hosseinpour, S., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2014). Computer vision technology for real-time food quality assurance during drying process. *Trends in Food Science & Technology*, 39(1): 76-84.
- Aguilera, J. M. (2003). Drying and dried products under the microscope. *Food Science and Technology International*, 9(3): 137-143.
- Bai, Y. X., Yang, G. J., Hu, Y. C., & Qu, M. (2012). Physical and sensory properties of electrohydrodynamic (EHD) dried scallop muscle. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 21(3): 238-247.
- Bai, Y., Qu, M., Luan, Z., Li, X., & Yang, Y. (2013). Electrohydrodynamic drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*). *LWT-Food Science and Technology*, 54(2): 570-576.
- Bajgai, T. R., Raghavan, G. V., Hashinaga, F., & Ngadi, M. O. (2006). Electrohydrodynamic drying—A concise overview. *Drying Technology*, 24(7): 905-910.
- Dinani, S. T., Hamdami, N., Shahedi, M., & Havet, M. (2014). Mathematical modeling of hot air/electrohydrodynamic (EHD) drying kinetics of mushroom slices. *Energy conversion and Management*, 86: 70-80.
- Dinani, S. T., Hamdami, N., Shahedi, M., & Havet, M. (2015). Quality assessment of mushroom slices dried by hot air combined with an electrohydrodynamic (EHD) drying system. *food and bioproducts processing*, 94: 572-580.
- Ding, C., Lu, J., & Song, Z. (2015). Electrohydrodynamic drying of carrot slices. *PLoS One*, 10(4): e0124077.
- Elmizadeh, A., Shahedi, M., & Hamdami, N. (2017). Comparison of electrohydrodynamic and hot-air drying of the quince slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43: 130-135.
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical reviews in food science and nutrition*, 50(5): 441-464.
- Esehaghbeygi, A., Pirnazari, K., & Sadeghi, M. (2014). Quality assessment of electrohydrodynamic and microwave dehydrated banana slices. *LWT-Food Science and Technology*, 55(2): 565-571.
- Esehaghbeygi, A., & Basiry, M. (2011). Electrohydrodynamic (EHD) drying of tomato slices (*Lycopersicon esculentum*). *Journal of Food Engineering*, 104(4): 628-631.
- Iranshahi, K., Rubineti, D., Onwude, D. I., Psarianos, M., Schlüter, O. K., & Defraeye, T. (2023). Electrohydrodynamic drying

- Paul, A., Astatkie, E., & Martynenko, A. (2022). Electrohydrodynamic drying of fruit slices: Effect on drying kinetics, energy consumption, and product quality. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10): e16812.
- Pirnazari, K., Esehaghbeygi, A., & Sadeghi, M. (2014). Assessment of quality attributes of banana slices dried by different drying methods. *International journal of food engineering*, 10(2): 251-260.
- Pirnazari, K., Esehaghbeygi, A., & Sadeghi, M. (2016). Modeling the electrohydrodynamic (EHD) drying of banana slices. *International Journal of Food Engineering*, 12(1): 17-26.
- Sarhadi, H., Hadad, K. M., Sedaghat, N., Mohebi, M., & Milani, E. (2017). Predicting the effect of ozone, chitosan and temperature on acidity content of Mazafati date fruit during storage by using artificial neural network. *Journal of Food Science Technology (JFST)*, 67(14): 107-114. (In Persian).
- Shi, C. A., Martynenko, A., Kudra, T., Wells, P., Adamiak, K., & Castle, G. S. P. (2017). Electrically-induced mass transport in a multiple pin-plate electrohydrodynamic (EHD) dryer. *Journal of Food Engineering*, 211: 39-49.
- Willis, B., Okos, M., & Campanella, O. (1999). *Effects of glass transition on stress development during drying of a shrinking food system*. American Institute of Chemical Engineers.
- Yadollahinia, A., Latifi, A., & Mahdavi, R. (2009). New method for determination of potato slice shrinkage during drying. *Computers and electronics in agriculture*, 65(2): 268-274.
- Yang, C. S. T., & Atallah, W. A. (1985). Effect of four drying methods on the quality of intermediate moisture lowbush blueberries. *Journal of Food Science*, 50(5): 1233-1237.

Research paper

A Study on the changes of shape and size-related attributes of kharak thin slices in a hybrid electrohydrodynamic-convective hot air dryer equipped with image processing system

A. Imani¹, S. S. Mohtasebi^{2*} and M. Keramat-Jahromi³

Abstract

Drying dates in the kharak stage is a common operation in date-growing areas of the country, such as Jahrom, where the product has completely different quality conditions regarding texture, color, smell, and taste compared to dates. The electrohydrodynamic (EHD) method is a non-thermal drying method at ambient temperature and pressure that can preserve the quality of the dried food product. This study used a hybrid electrohydrodynamic-convective hot air dryer equipped with an image processing system to investigate the changes in size and shape-related attributes of thin slices of kharak during the drying process. This study aimed to investigate the rate of change in the characteristics related to shape and size, including surface area, perimeter, diameter, elongation, and roundness of samples during the drying process by electrohydrodynamic method (EHD in 25 and 35 °C), hot air method (HA at 60 °C), and the hybrid drying method (EHD-HA at 60 °C). The effect of air speed and temperature on the shape and size-related attributes was investigated using variance analysis. The results showed that the number of changes in characteristics related to the shape and size of the product was higher in the hot air method and less in the EHD method at a temperature of 25° C than in the other methods. According to the results, the final product of the EHD method was of higher quality than that of the other methods.

Keywords: Kharak, Machine vision, Drying, Electrohydrodynamic, Hot air.

Citation: Imani A. Mohtasebi S. S. and Keramat-Jahromi M. 2023. A Study on the changes of shape and size-related attributes of kharak thin slices in a hybrid electrohydrodynamic-convective hot air dryer equipped with image processing system. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery. 29: ??-??. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14176.641>

1- Research Assistant, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

2- Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Mechanical Engineering of Biosystem Department, Faculty of Agriculture, University of Shiraz, Shiraz, Iran.

*Corresponding author: mohtaseb@ut.ac.ir

Received: 2022/12/19

Accepted: 2023/03/03

<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14176.641>