

Study and Simulation Drying Kinetics of Date Fruit Slices in a Hybrid Electrohydrodynamic-Convective Dryer

MAHDI KERAMAT-JAHROMI¹, SEYED SAEID MOHTASEBI^{2*}, HOSSEIN MOUSAZADEH³, MAHDI GHASEMI-VARNAMKHAZI⁴, AMIN NASIRI⁵

1. Ph.D. Graduated, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 2. Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 3. Associate Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 4. Associate Professor, Mechanical Engineering of Biosystem Department, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran
 5. Ph.D. Graduated, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
- (Received: Dec. 1, 2017- Revised: Jan. 20, 2018- Accepted: Jan. 23, 2018)

ABSTRACT

Electrohydrodynamic drying as a non-thermal method of drying increases the quality of dried products at ambient temperature. Considering the importance of using advanced methods in date fruit drying, in this study, an electrohydrodynamic-convective dryer equipped with temperature control system was developed to model the drying process of date fruit (cv. Shahani) slices based on changes in moisture ratio per drying time in electrohydrodynamic (EHD), hot air (HA) and the hybrid (EHD-HA) drying methods. Results showed as the air velocity increased, the drying time in 25 and 35 °C of EHD drying increased while increasing in air velocity, decrease the drying time in both HA and EHD-HA drying methods.

Keywords: Date Fruit, Drying, Electrohydrodynamic, Convection, Non-thermal

مطالعه و شبیه‌سازی سینتیک خشک‌شدن ورقه‌های خرما در یک خشک‌کن ترکیبی الکتروهیدرودینامیک -

جریان همرفت

مهدی کرامت‌چهرمی^۱، سید سعید محتسبی^{۲*}، حسین موسی زاده^۳، مهدی قاسمی ورنامخواستی^۴، امین نصیری^۵

۱. دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی

و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

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

دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع

طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۵. دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی

و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۱۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۳)

چکیده

خشک‌کردن به شیوه الکتروهیدرودینامیک یک روش غیرحرارتی است که با فراهم آوردن امکان خشک‌شدن محصول در دمای محیط، امکان افزایش خواص کیفی محصول خشک‌شده را فراهم می‌آورد. با توجه به اهمیت به‌کارگیری روش‌های پیشرفته در خشک‌کردن خرما، در این تحقیق یک خشک‌کن الکتروهیدرودینامیک-جریان همرفت با قابلیت کنترل دما توسعه داده شد و فرآیند رطوبت‌گیری ورقه‌های نازک خرما، شاهی در روش‌های خشک‌کردن الکتروهیدرودینامیک، هوای گرم و ترکیبی بر اساس تغییرات نسبت رطوبت در طول زمان خشک‌شدن مدل‌سازی شد. نتایج تحقیق نشان داد با افزایش سرعت هوا در دماهای ۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس از روش الکتروهیدرودینامیک، زمان خشک‌شدن محصول افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش سرعت هوا، زمان خشک‌شدن در هر دو روش ترکیبی و هوای گرم کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: خرما، خشک‌کردن، الکتروهیدرودینامیک، همرفت، غیرحرارتی

مقدمه

خرما یکی از محصولات مهم و عمده کشاورزی ایران است (Keramat-Jahromi *et al.*, 2007). به طور کلی خرما بر اساس رقم و به ویژه سطح تانن‌های محلول، شرایط آب و هوایی و تقاضای بازار در سه مرحله از خارک، رطب و خرمای رسیده برداشت و عرضه می‌گردد (Glasner & Botes, 2002). ارقامی از خرما که دارای قند بالاتر و میزان کمتری از تانن‌ها باشند در مرحله خارک، زمانی که رنگ آن‌ها بسته به رقم خرما زرد یا قرمز رنگ است، برداشت و مصرف می‌شوند (Siddiq *et al.*, 2014). رطوبت یکی از ویژگی‌های مهم میوه خرما است که بر کیفیت و انبارمانی آن تأثیر می‌گذارد. مقدار رطوبت خرما از ۶۰٪ (بر مبنای تر) در زمان رسیدگی تا حدود ۲۵٪ (بر مبنای تر) بعد از خشک‌شدن متفاوت است (Barreveld, 1993). در بین مراحل خوراکی خرما، خارک دارای بالاترین میزان رطوبت است. در طول مراحل رسیدگی میوه، میزان قند و رطوبت خرما به ترتیب یک روند افزایشی و کاهش‌ی دارد (Al-Shahib & Marshall, 2003). از آن جا که میوه خرما در مرحله خارک از نظر فیزیولوژیکی بالغ است، چنان‌چه حاوی رطوبت بیش از ۵۰ درصد باشد بسیار فاسدشدنی است و می‌تواند در نتیجه فعالیت‌های میکروبیولوژیکی دستخوش تخمیر (الکلی) شود (Mortazavi *et al.*, 2007). رطوبت‌گیری خرما یکی از مراحل مهم پس از برداشت خرما است که شرایطی مانند دمای خشک‌شدن، رطوبت نسبی و زمان خشک‌شدن بر ویژگی‌های رنگ، طعم، سختی و بازارپسندی آن دخیل است (Yang & Atallah, 1985). برای گسترش بازار خرما، لازم است روش‌های پیشرفته خشک‌کردن مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

الکتروهِیدرودینامیک یکی از شاخه‌های علم مکانیک سیالات است که بر روی اثر نیروهای الکتریکی متمرکز شده است (Ahmedou *et al.*, 2009). از آنجا که اعمال میدان الکتریکی موجب تحرک و پویایی سیال می‌گردد، این روش را روش الکتروهِیدرودینامیک می‌نامند (Butrymowicz *et al.*, 2002). برای شناخت اصولی این پدیده مطالعات مختلفی صورت گرفته است (Lai & Sharma, 2005; Martynenko *et al.*, 2017; Ma & Chen, 2017; Shi *et al.*, 2017).

پدیده الکتروهِیدرودینامیک در یک خشک‌کن الکتروهِیدرودینامیک باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و افزایش سرعت رطوبت‌گیری و خشک‌کردن محصول می‌گردد. افزایش انتقال حرارت در این روش به سبب جفت شدن یک میدان الکتریکی با میدان جریان سیال در یک سیال با خاصیت

دی‌الکتریک متوسط می‌باشد. همچنین وزش و برخورد باد الکترونی (یونی) حاصل از میدان الکتریکی بر سطح نمونه‌ها، کاهش رطوبت محصول را تسریع می‌کند (Butrymowicz *et al.*, 2002). خشک‌کردن الکتروهِیدرودینامیک یک فناوری غیرگرمایی و کارآمد از لحاظ مصرف انرژی است که برای رطوبت‌گیری از مواد حساس به حرارت از جمله مواد غذایی مناسب بوده (Martynenko *et al.*, 2017) و به نظر می‌رسد یک جایگزین مناسب برای خشک‌کردن حرارتی است (Martynenko & Kudra, 2016). روش الکتروهِیدرودینامیک در مقایسه با روش‌های انجمادی و همرفتی، دارای مزیت‌هایی از جمله هزینه کم‌تر، کیفیت بهتر محصول خروجی، طراحی ساده‌تر و مصرف انرژی کم‌تر است (Bajgai *et al.*, 2006). اگرچه خشک‌کن الکتروهِیدرودینامیک از لحاظ مصرف کم‌تر انرژی و کیفیت بالای محصول تولیدی نسبت به خشک‌کن‌های میکروویو اولویت دارد ولی سرعت خشک‌کردن در خشک‌کن‌های میکروویو بالاتر است (Esehaghbeygi *et al.*, 2014). استفاده از دمای پایین در طی فرآیند خشک‌کردن باعث حفظ بهتر کیفیت مواد غذایی می‌شود اما زمان خشک‌کردن طولانی‌تر می‌شود (Miranda *et al.*, 2008).

در مطالعات مختلفی امکان استفاده از پدیده الکتروهِیدرودینامیک در خشک‌کردن مواد و محصولات مختلف بررسی شده است. در خشک‌کردن ورقه‌های نازک سیب در یک خشک‌کن الکتروهِیدرودینامیک در دمای اتاق گزارش شد با افزایش سرعت هوا از یک تا پنج متر بر ثانیه، انرژی مصرفی منبع ولتاژ و زمان خشک‌کردن افزایش می‌یابد. ترکیب خشک‌کن الکتروهِیدرودینامیک با جریان همرفت زمانی دارای بیشترین تأثیر است که از حداکثر ولتاژ ممکن منبع ولتاژ و کمترین دور دمنده استفاده شود (Martynenko & Zheng, 2016). در مطالعات متعددی نیز روش خشک‌کردن الکتروهِیدرودینامیک با سایر روش‌های خشک‌کردن مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. در این زمینه می‌توان به مقایسه روش هوای گرم و روش الکتروهِیدرودینامیک در خشک‌کردن ورقه‌های نازک میوه به^۱ (Elmizadeh *et al.*, 2017)، خشک‌کردن برش‌های نازک موز با استفاده از سه روش الکتروهِیدرودینامیک، خشک‌کردن در آون و خشک‌کردن با هوای گرم (Pirnazari *et al.*, 2014)، خشک‌شدن ورقه‌های گوجه‌فرنگی با استفاده از خشک‌کن الکتروهِیدرودینامیک و

تصادفی از نخلستان‌های شهرستان جهرم تهیه شد. برای جلوگیری از تغییرات فیزیکی و شیمیایی و حفظ تازگی محصول، نمونه‌های خرما داخل بسته‌های مخصوصی قرار داده شده و به سردخانه با دمای $9/0 \pm 0/5$ درجه سلسیوس منتقل شد. قبل از انجام هر آزمایش نمونه‌ها از سردخانه خارج شده و به مدت سه ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند (Martyntenko & Zheng, 2016). به دلیل نحوه عملکرد و ویژگی‌های خاص خشک‌کن‌های الکتروهایدرودینامیک، لازم است محصول به صورت لایه نازک درون خشک‌کن قرار گیرد. بنابراین با استفاده از یک دستگاه ورقه‌کن برقی^۴، ورقه‌های نازک و یکنواختی از خرما به ضخامت سه میلی‌متر تهیه شد.

قبل از شروع هر آزمایش رطوبت اولیه نمونه‌ها از طریق قرار دادن نمونه‌های ۲۰ گرمی از محصول در داخل آون و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت به وسیله رابطه (۱) محاسبه شد (Keramat-Jahromi et al., 2007).

$$M_w = \frac{W_w - W_d}{W_w} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن M_w میزان رطوبت بر پایه‌ی تر (kg water/kg wet matter)، W_w وزن نمونه تر (kg) و W_d وزن نمونه خشک (kg) می‌باشد.

برای انجام آزمایش‌ها، در ابتدا یک سامانه خشک‌کن الکتروهایدرودینامیک-جریان همرفت در ابعاد آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. اجزای اصلی سامانه شامل دمنده، گرم‌کن، محفظه اصلی خشک‌کن، منبع تغذیه ولتاژ بالا، الکترودهای مثبت سوزنی، الکترودهای صفحه‌ای زمین، سیستم توزین، حسگرهای دما (LM35) و دما-رطوبت (DHT22) می‌باشد. محفظه اصلی خشک‌کن، محلی برای قرار دادن سینی نمونه‌ها و نصب حسگرهاست که امکان اتصال سامانه خشک‌کن به سامانه توزین را فراهم می‌کند. خشک‌کن الکتروهایدرودینامیک دارای ۱۶ عدد الکترودهای سوزنی به طول ۴۰ میلی‌متر بود که با آرایش مربع در فاصله ۵۰ میلی‌متری از یکدیگر قرار داشتند. به منظور ایجاد میدان الکتریکی بین دو نوع الکترودها، از منبع تغذیه ولتاژ بالا ساخت شرکت فناوران نانومقیاس^۵ استفاده شد. دستگاه خشک‌کن دارای قابلیت تغییر دور دمنده به منظور تنظیم سرعت هوا در آزمایش‌های مختلف می‌باشد. برای تنظیم سرعت هوا در محفظه از یک سرعت‌سنج هوا مدل Testo 405-V1 استفاده شد. به منظور داده‌برداری و توزین برخط وزن نمونه‌ها

مقایسه آن با روش خشک‌کردن در آون و روش هوای آزاد (Esehaghbeygi & Basiry, 2011) و مقایسه روش الکتروهایدرودینامیک با روش‌های خشک‌کردن در آون و هوای آزاد (Bai et al., 2013; Bai et al., 2012) اشاره کرد. در تحقیقی دیگر از روش ترکیبی هوای گرم - الکتروهایدرودینامیک به منظور بررسی کیفیت ورقه‌های نازک قارچ دکمه‌ای استفاده شده است (Dinani et al., 2015).

یکی از جنبه‌های مهم فناوری خشک‌کردن، مدل‌سازی فرآیند است. شبیه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک‌کردن در شرایط مختلف، به منظور کنترل بهتر فرآیند و بهبود کیفیت محصول نهایی از اهمیت خاصی برخوردار است (Meisami-asl et al., 2009). تحقیقات زیادی جهت مدل‌کردن فرآیند خشک‌کردن در خشک‌کن‌های الکتروهایدرودینامیک انجام شده است که می‌توانند اطلاعات مفیدی را در خصوص بهینه‌سازی و نظارت بر این خشک‌کن‌ها فراهم نمایند (Bai et al., 2011; Ding et al., 2015; Dinani et al., 2014; Pirnazari et al., 2016).

طبق بررسی‌های انجام شده، اگرچه تحقیقاتی در خصوص خشک‌کردن خرما با خشک‌کن‌های مختلف گزارش شده است (Falade & Abbo, 2007; Shahdadi et al., 2013; Shahdadi et al., 2015; Izli, 2017)، ولی تاکنون تحقیقی در خصوص استفاده از خشک‌کن‌های الکتروهایدرودینامیک در زمینه رطوبت‌گیری این محصول گزارش نگردیده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی فرآیند رطوبت‌گیری ورقه‌های نازک خرما به روش‌های الکتروهایدرودینامیک^۱ (EHD)، هوای گرم^۲ (HA) و روش ترکیبی الکتروهایدرودینامیک-هوای گرم^۳ (EHD-HA) در یک سامانه خشک‌کن هیبریدی الکتروهایدرودینامیک-جریان همرفتی مجهز به سامانه کنترل دما است. از مدل‌های آماری یا معادلات رگرسیونی جهت شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک‌شدن لایه‌های نازک ورقه‌های خرما استفاده شد.

مواد و روش‌ها

از جمله مهم‌ترین ارقام خرماي کشور، خرماي شاهانی است که پتانسیل بسیار مناسبی برای فرآوری دارد و بهترین نمونه آن در شهرستان جهرم به عمل می‌آید (Keramat-Jahromi et al., 2008). بنابراین در این تحقیق از خرماي شاهانی جهرم (در مرحله خارک) به عنوان نمونه استفاده گردید که به طور

4. Electric Slicer (Model 250, Bora Electric, Iran)
5. http://www.fnm.ir/HV_D-RC-Series.htm

1. Electrohydrodynamic (EHD)
2. Hot air (HA)
3. Electrohydrodynamic convective hot air (EHD-HA)

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_o - M_e} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن، MR نسبت رطوبت، M_d رطوبت لحظه‌ای بر پایه خشک (kg water/kg dry matter)، M_e رطوبت تعادلی بر پایه خشک (kg water/kg dry matter) و M_o رطوبت اولیه محصول بر پایه خشک (kg water/kg dry matter) می‌باشد.

بر اساس تحقیقات انجام شده، در صورتی که محتوای رطوبت نسبی هوای خشک‌کن متغیر باشد (که در نتیجه آن محتوای رطوبت تعادلی نمونه‌ها نیز ثابت نخواهد بود)، برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری محتوای رطوبت تعادلی نخواهد بود. بنابراین معادله نسبت رطوبت در طی خشک کردن به صورت رابطه (۳) ساده می‌گردد (Erbay & Icier, 2010; Dinani et al., 2014).

$$MR = \frac{M_d}{M_o} \quad (\text{رابطه ۳})$$

فرآیند خشک‌کردن و کاهش وزن نمونه‌ها تا زمان رسیدن محصول به نسبت رطوبت ۰/۲ ادامه داشت. نسبت رطوبت به دست آمده در طی آزمایش با ۱۳ مدل مختلف از مدل‌های استاندارد مربوط به خشک‌شدن لایه نازک محصولات کشاورزی (جدول ۱) مقایسه شد.

با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 2014b مدل‌های رگرسیونی مختلفی برای نسبت رطوبت محصول بر اساس متغیر مستقل زمان استخراج گردید. برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین (R^2)، مجموع مربعات خطا^۲ (SSE) و جذر میانگین خطای داده‌ها^۳ (RMSE) استفاده شد. در مقایسه بین دو مدل، مدل با R^2 بیش‌تر و مقدار SSE و RMSE کم‌تر، بهتر می‌تواند تغییرات نسبت رطوبت را در طی خشک‌شدن پیش‌بینی کند (Shahhoseini et al., 2013). مقادیر R^2 ، SSE و RMSE به ترتیب با استفاده از روابط ۴، ۵ و ۶ محاسبه شدند (Liu et al., 2011; Dinani et al., 2014; Pirnazari et al., 2016).

(رابطه ۴)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp}) \cdot \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2] \cdot [\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2]}}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

نیز از یک ترازوی دیجیتالی^۱ با قابلیت اتصال به رایانه استفاده شد. شکل ۱ طرحواره و اجزای سامانه خشک‌کن توسعه داده شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. طرحواره سامانه خشک‌کن توسعه داده شده

نحوه خشک‌کردن بدین صورت است که هوای جریان یافته در کانال توسط دمنده از گرم‌کن عبور کرده و در صورت نیاز پس از گرم‌شدن، به سمت نمونه‌هایی که در معرض میدان الکتریکی قرار دارند، هدایت می‌شود. جریان هوا هنگام گذر از نمونه‌ها، رطوبت خارج شده از نمونه را از محفظه خارج می‌کند. آزمایش‌های مربوط به خشک‌کردن الکتروهیدرودینامیک (در دماهای ۲۵، ۳۵ و ۶۰ درجه سلسیوس) و آزمایش‌های مربوط به بررسی روش‌های خشک‌کردن هوای گرم محض (در دمای ۶۰ درجه سلسیوس) و خشک‌کردن ترکیبی (الکتروهیدرودینامیک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس)، هر یک در سه سطح از سرعت هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه و در سه تکرار انجام شدند. توان منبع ولتاژ بالا در آزمایش‌های مربوط به خشک‌کردن الکتروهیدرودینامیک، یک وات و فاصله بین الکترودهای سوزنی و الکترودهای صفحه‌ای زمین، سه سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تمامی آزمایش‌ها در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) انجام شدند. برای رسیدن شرایط سامانه به حالت پایدار، تمامی آزمایش‌ها ۳۰ دقیقه بعد از روشن شدن سامانه شروع شدند.

برای شبیه‌سازی سینتیک خشک‌شدن ورقه خرما از رابطه نسبت رطوبت در طی فرآیند خشک‌کردن استفاده شد. نسبت رطوبت در هر لحظه از فرآیند خشک‌شدن به وسیله رابطه (۲) محاسبه می‌گردد (Martynenko & Zheng, 2016; Ding et al., 2015).

نسبت رطوبت به $MR_{exp,i}$ که در آن

جدول ۱. مدل‌های رگرسیونی سینتیک خشک شدن لایه نازک محصولات مختلف کشاورزی

ردیف	نام مدل	مدل	مرجع
۱	نیوتن (لوئیس)	$MR = \exp(-kt)$	Kaleta & Górnicki, 2010
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	Liu <i>et al.</i> , 2009
۳	پیچ اصلاح شده	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Akpınar & Bicer, 2008
۴	هندرسون و پابیس	$MR = a \exp(-kt)$	Doymaz, 2012
۵	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	Shahhoseini <i>et al.</i> , 2013
۶	دو جمله‌ای	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	Lahsasni <i>et al.</i> , 2004
۷	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	Kaleta & Górnicki, 2010
۸	تقریب پخش	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Yaldiz <i>et al.</i> , 2001
۹	ورما و همکاران	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Togrul & Pehlivan, 2004
۱۰	هندرسون و پابیس اصلاح شده	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Karathanos, 1999
۱۱	دو جمله‌ای نمایی	$MR = a \exp(-k_1t) + \exp(-k_2t)$	Akpınar <i>et al.</i> , 2003
۱۲	میدیلی و بایسر	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Akpınar & Bicer, 2008
۱۳	آغباشلو و همکاران	$MR = \exp(-k_1t/(1 + k_2t))$	Aghbashlo <i>et al.</i> , 2009

* t زمان بر حسب دقیقه، a, b, c, g, h, k و n ثابت‌ها و ضرایب مدل می‌باشند.

نتایج و بحث

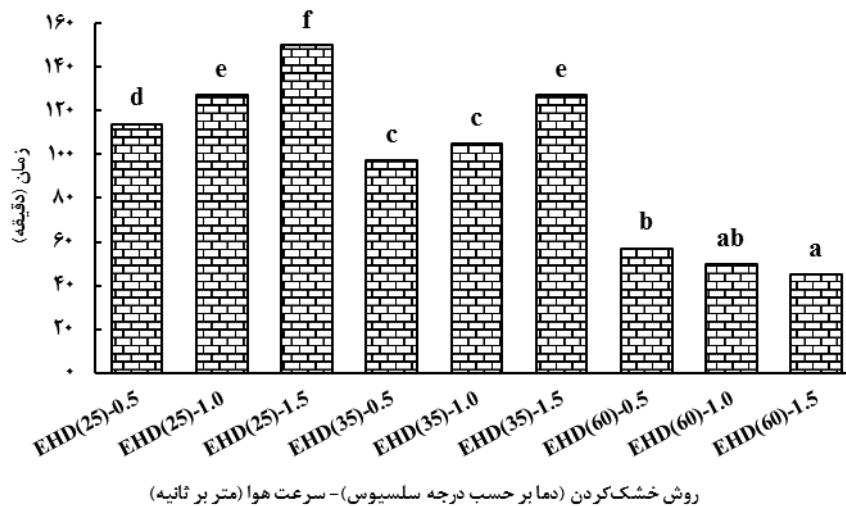
۶۰ درجه سلسیوس، زمان خشک کردن کاهش یافته است که می‌توان آن را به تأثیر بیشتر هوای گرم نسبت به پدیده الکتروهایدرودینامیک نسبت داد. علت کاهش زمان خشک شدن در سرعت‌های بالاتر در دماهای ۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس را می‌توان به نقش افزایش سرعت هوا در برهم خوردن باد یونی نسبت داد که باعث ایجاد اختلال در میدان الکتریکی شده و مانع از عملکرد مناسب میدان الکتریکی در رطوبت‌گیری محصول می‌شود. در تحقیقی پیرامون بررسی اثر سطوح مختلف سرعت هوا در محدوده یک تا پنج متر بر ثانیه در یک خشک‌کن الکتروهایدرودینامیک- جریان همرفت (در دمای اتاق) نیز سرعت یک متر بر ثانیه به عنوان بهترین سرعت هوا در فرآیند خشک کردن ورقه‌های نازک سیب گزارش شد. همچنین گزارش شد با افزایش سرعت هوا از یک تا پنج متر بر ثانیه، علاوه بر افزایش زمان خشک شدن، انرژی مصرفی نیز افزایش می‌یابد (Martynenko & Zheng, 2016). این در حالی بود که در تحقیق مذکور تأثیر سرعت‌های پایین‌تر از یک متر بر ثانیه مورد بررسی قرار نگرفته بود. بر اساس نتایج این پژوهش، ایجاد جریان ملایمی از هوا با کمک به تخلیه رطوبت از محفظه، نقش بسزایی در تسریع فرآیند خشک شدن دارد.

رطوبت اولیه خرما در شروع آزمایش $60/77 \pm 2/42$ بر پایه تر بود. برای بررسی اثر سه سطح از دماهای مختلف خشک کردن (۲۵، ۳۵ و ۶۰ درجه سلسیوس) و سه سطح از سرعت هوا (۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر در ثانیه) بر مدت زمان خشک شدن (دقیقه) در آزمایش‌های خشک کردن به روش الکتروهایدرودینامیک، از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی استفاده شد. طبق جدول تجزیه واریانس (جدول ۲)، اثر دما، اثر سرعت هوا و اثر متقابل روش خشک کردن در سرعت هوا بر زمان خشک شدن نمونه‌ها در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است. مقایسه میانگین زمان خشک شدن در دماها و سرعت‌های مختلف خشک کردن به شیوه الکتروهایدرودینامیک با استفاده از آزمون توکی در شکل ۲ نشان داده شده است. حروف متفاوت روی ستون‌ها نشان دهنده اختلاف معنی‌دار و حروف مشابه، نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار ستون‌ها با یکدیگر است. مطابق شکل ۲، در سرعت هوای معین با افزایش دما، زمان خشک شدن محصول کاهش یافته است. با افزایش سرعت هوا از ۰/۵ تا ۱/۵ متر بر ثانیه در دماهای ۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس، سرعت خشک شدن محصول کاهش و در نتیجه زمان خشک شدن افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت هوا در دمای

جدول ۲. تجزیه واریانس تأثیر دما و سرعت هوا بر زمان خشک‌شدن در روش الکتروهیدرودینامیک

منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
بلوک	۲	۱۱۴/۷	۵۷/۴	۷/۵۳**
دما	۲	۳۰۹۷۵/۶	۱۵۴۸۷/۸	۲۰۳۲/۴۲**
سرعت هوا	۲	۱۵۷۶/۵	۷۸۸/۳	۱۰۳/۴۴**
دما × سرعت هوا	۴	۲۰۸۸/۱	۵۲۲	۶۸/۵۱**
خطا	۱۶	۱۲۱/۹	۷/۶	
مجموع کل	۲۶	۳۴۸۷۷		

** سطح معنی داری ۱ درصد



شکل ۲. مقایسه میانگین زمان خشک‌شدن در دماها و سرعت‌های مختلف در روش خشک‌کردن الکتروهیدرودینامیک

گرم بر زمان خشک‌شدن اثر معناداری نداشته است، می‌توان آن را به بی‌اثر شدن پدیده الکتروهیدرودینامیک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس نسبت داد.

مقایسه میانگین اثر سرعت هوا بر زمان خشک‌کردن بر اساس آزمون توکی (شکل ۳) نشان می‌دهد همگی سرعت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری داشته و با افزایش سرعت هوا، زمان خشک‌شدن به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد.

همچنین از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی بر اساس دو عامل نوع روش خشک‌کردن (در دو سطح هوای گرم و ترکیبی) و سرعت هوای خشک‌کن (در سه سطح)، به منظور مقایسه میانگین زمان خشک‌شدن استفاده شد. مطابق جدول ۳، نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد اثر سرعت هوا بر زمان خشک‌شدن در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است ولی اثر روش خشک‌کردن و اثر متقابل روش خشک‌کردن در سرعت هوا بر زمان خشک‌شدن معنی‌دار نبوده است. از آن جا که اثر روش ترکیبی الکتروهیدرودینامیک- هوای گرم و روش هوای

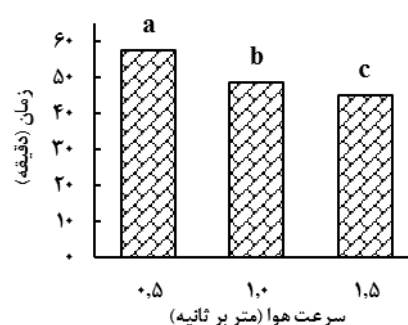
جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر روش خشک‌کردن (هوای گرم و ترکیبی) و سرعت هوا بر زمان خشک‌شدن

منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
بلوک	۲	۶۲/۱۱۱	۳۱/۰۵۶	۶/۴*
روش خشک‌کردن	۱	۲	۲	۰/۴۱ ^{ns}
سرعت هوا	۲	۴۹۵/۴۴۴	۲۴۷/۷۲۲	۵۱/۰۲**
روش خشک‌کردن × سرعت هوا	۲	۷	۳/۵	۰/۷۲ ^{ns}
خطا	۱۰	۴۸/۵۵۶	۴/۸۵۶	
مجموع کل	۱۷	۶۱۵/۱۱۱		

** سطح معنی داری ۱ درصد * سطح معنی داری ۵ درصد^{ns} عدم معنی داری

آزمایش‌های مختلف به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. بر اساس نتیجه یک تحقیق در زمینه خشک کردن خرما به روش‌های هوای گرم (۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس)، انجمادی و میکروویو (۱۲۰ وات)، مدل میدلی و همکاران در روش‌های هوای گرم و میکروویو و مدل دو جمله‌ای در خشک کردن انجمادی توانستند به طور رضایت‌بخشی فرآیند خشک کردن را توصیف نمایند (Izli, 2017). در تحقیق دیگری فرآیند خشک کردن ورقه‌های نازک هویج با دو روش الکتروهایدرودینامیک و آون مدل‌سازی شده و مدل پیچ برای شبیه‌سازی تغییرات نسبت رطوبت ورقه‌های هویج با زمان در روش الکتروهایدرودینامیک معرفی شد (Ding et al., 2015).

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های استخراج شده توسط مدل‌های برتر، نمودارهای نسبت رطوبت نسبت به زمان در روش خشک کردن الکتروهایدرودینامیک در دماهای ۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس و خشک کردن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس (در هر دو روش هوای گرم و ترکیبی) به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ آورده شده است. مطابق نمودارها، داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل بسیار به هم نزدیک بوده، به طوری که نمودار حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و نمودار حاصل از داده‌های مدل بر روی یکدیگر منطبق شده‌اند.



شکل ۳. میانگین زمان خشک شدن در سرعت‌های مختلف هوا

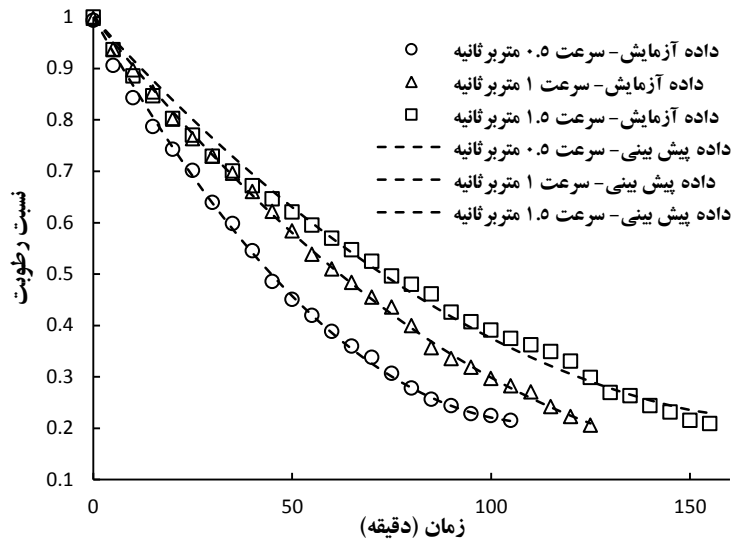
از ۱۳ مدل جدول ۱ برای برازش منحنی خشک کردن و مدل‌سازی تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان استفاده شد. بر اساس مقادیر R^2 ، SSE و RMSE، مدل‌های رگرسیونی مختلف مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. با توجه به مقادیر شاخصه‌های آماری، مدل ونگ و سینگ برای دمای ۲۵ درجه سلسیوس، مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده برای دمای ۳۵ درجه سلسیوس از روش الکتروهایدرودینامیک و مدل دو جمله‌ای برای دمای ۶۰ درجه سلسیوس از هر دو روش هوای گرم و روش ترکیبی، توانستند تغییرات نسبت رطوبت با زمان را در طی فرآیند خشک کردن، بهتر از سایر مدل‌ها برازش کنند. معیار انتخاب مدل برتر، مقدار بیش‌تر R^2 و مقدار کم‌تر SSE و RMSE بود. شاخصه‌های آماری و ضرایب مدل برتر در

جدول ۴. شاخصه‌های آماری مدل‌های برتر در آزمایش‌های مختلف

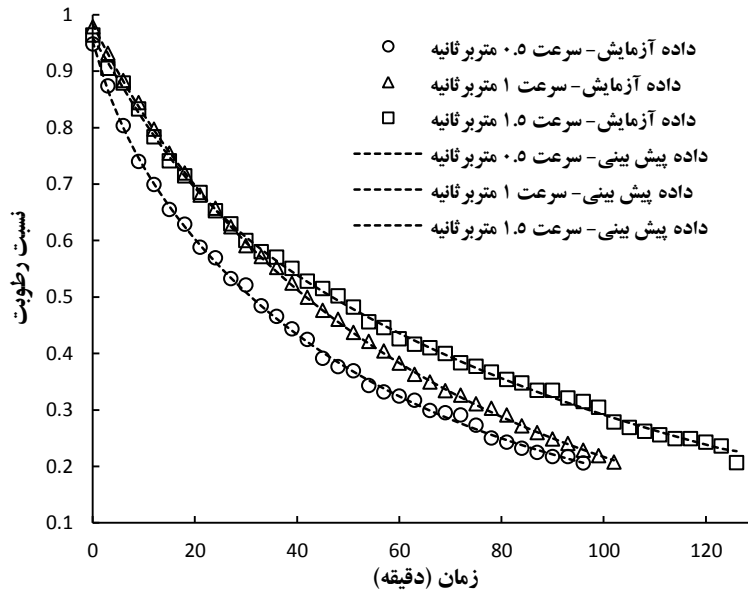
شاخصه‌های آماری									نام مدل	روش آزمایش- دما ($^{\circ}C$)
$V=1/5$ m/s			$V=1$ m/s			$V=0/5$ m/s				
SSE	RMSE	R^2	SSE	RMSE	R^2	SSE	RMSE	R^2		
۰/۰۱۲۹	۰/۰۰۹۲	۰/۹۹۸۲	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۵۹	۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۶۰	۰/۹۹۹۲	ونگ و سینگ	EHD -۲۵
۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۶۳	۰/۹۹۹	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹۹۲	هندرسون و پاییس اصلاح شده	EHD -۳۵
۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۸۳	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۶۶	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۷۹	۰/۹۹۸۸	دو جمله‌ای	EHD -۶۰ HA -۶۰

جدول ۵. ضرایب مدل برتر در آزمایش‌های مختلف

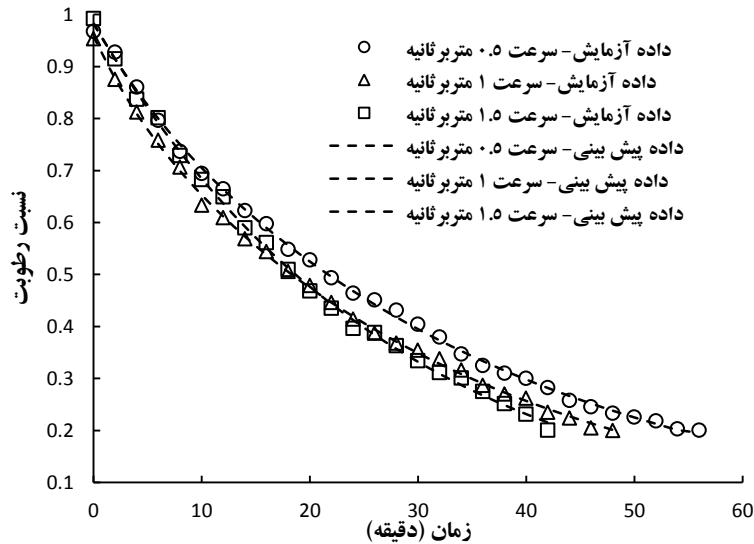
ضرایب						روش آزمایش- دما ($^{\circ}C$)		
						سرعت آزمایش		
						$a=-0/00952$	$V=0/5m/s$	
$b=2/551e-5$						$a=-0/009527$	$V=1m/s$	
$b=2/562e-5$						$a=-0/008387$	$V=1/5m/s$	
$a=0/9852$	$b=0/4915$	$c=0/398$	$g=0/009881$	$h=0/0323$	$k=0/2026$	$V=0/5m/s$	EHD -۳۵	
$a=0/9255$	$b=0/3953$	$c=-0/3333$	$g=0/1351$	$h=0/1662$	$k=0/1442$	$V=1m/s$		
$a=-0/123$	$b=0/7979$	$c=0/2972$	$g=0/009966$	$h=0/08479$	$k=0/168$	$V=1/5m/s$		
$a=0/9406$						$k=0/2805$	$V=0/5m/s$	EHD -۶۰
$a=0/8989$						$k=0/3056$	$V=1m/s$	
$a=0/07089$						$k=1/764$	$V=1/5m/s$	HA -۶۰



شکل ۴. نمودارهای خشک شدن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل در روش الکتروهیدرودینامیک و در دمای 25°C



شکل ۵. نمودارهای خشک شدن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل در روش الکتروهیدرودینامیک و در دمای 35°C



شکل ۶. نمودارهای خشک شدن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل در روش‌های ترکیبی و هوای گرم در دمای 60°C

نتیجه‌گیری کلی

ترکیبی و روش هوای گرم کاهش می‌یابد. رفتار متفاوت خشک‌کردن الکتروهیدرودینامیک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس (روش ترکیبی) نسبت به خشک‌کردن الکتروهیدرودینامیک در دماهای ۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس را می‌توان به غلبه اثر هوای گرم به پدیده الکتروهیدرودینامیک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس نسبت داد.

سپاسگزاری

تحقیق مذکور (با طرح شماره ۹۶۰۰۰۲۱۲) به تصویب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور رسید و مورد حمایت مالی قرار گرفت. از صندوق مذکور و همچنین معاونت علمی و فناوری ریاست محترم جمهوری در تامین منابع مالی این تحقیق تشکر می‌گردد. همچنین از کمک‌ها و راهنمایی‌های دکتر سید حسن پیشگر کومله و مهندس احسان سوند رومی قدرانی و سپاسگزاری می‌گردد.

REFERENCES

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M., & Samimi-Akhijahani, H. (2009). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetic of barberries (*barberries vulgaris* L.). *Journal of Food Process Engineering*, 32(2), 278-293.
- Ahmedou, S.A.O. Rouaud, O., & Havet, M. (2009). Assessment of the electrohydrodynamic drying process. *Food Bioprocess Technology*, 2, 240-247.
- Akpinar, E. K., Bicer, Y., & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59 (1), 99-104.
- Akpinar, E. K., & Bicer, Y. (2008). Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. *Energy Conversion and Management*, 49(6), 1367-1375.
- Al-Shahib, W., & Marshall, R. J. (2003). The fruit of the date palm: its possible use as the best food for the future?. *International journal of food sciences and nutrition*, 54(4), 247-259.
- Bai, Y., Li, X., Sun, Y., & Shi, H. (2011). Thin layer electrohydrodynamic (EHD) drying and mathematical modeling of fish. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 36(3), 217-228.
- 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. S. V., Hashinaga, F., & Ngadi, M. O. (2006). Electrohydrodynamic Drying- A Concise Overview, *Drying Technology: An International Journal*, 24(7), 905-910.
- Barreveld, W. H. (1993). Date palm products. FAO.
- Butrymowicz, D., Trela, M., & Karwacki, J. (2002). Enhancement of condensation heat transfer by means of EHD condensate drainage. *International journal of thermal sciences*, 41(7), 646-657.
- 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 Bioprocess Processing*, 94, 572-580.
- Ding, C., Lu, J., & Song, Z. (2015). Electrohydrodynamic Drying of Carrot Slices. *PLoS ONE*, 10(4): e0124077. doi:10.1371/journal.pone.0124077
- Doymaz, I. (2012). Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.). *Energy conversion and management*, 56, 199-205.
- 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.
- Falade, K. O., & Abbo, E. S. (2007). Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 724-730.
- Glasner, B., & Botes, A. (2002). Date harvesting, packinghouse management and marketing aspects. In: Zaid A, editor, Date Palm Cultivation. FAO Plant Production and Protection Paper-156. FAO, Rome. pp 237-67.
- Izli, G. (2017). Total phenolics, antioxidant capacity, colour and drying characteristics of date fruit dried with different methods. *Food Science and Technology*, 37(1), 139-147.
- Kaleta, A., & Górnicki, K. (2010). Some remarks on evaluation of drying models of red beet particles. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2967-2978.
- Karathanos, V. T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39(4), 337-344.
- Keramat-Jahromi, M., Jafari, A., Rafiee, S., Keyhani, A. R., Mirasheh, R., & Mohtasebi, S. S. (2007). Some Physical properties of Date Fruit (cv. Lasht). *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript FP 07 019. Vol. IX.
- Keramat-Jahromi, M., Jafari, A., Rafiee, S., Mirasheh, R., & Mohtasebi, S. S. (2008). Changes in Physical Properties of Date Fruit (cv. Shahani) during Three Edible Stages of Ripening. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sci.* 3(1), 132-136
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Mohamed, L., & Agorram, B. (2004). Characteristic drying curve and mathematical modeling of thin-layer solar drying of prickly pear cladode (*opuntia ficus indica*). *Journal of food process engineering*, 27(2), 103-117.
- Lai, F. C., & Sharma, R. K. (2005). EHD-enhanced drying with multiple needle electrode. *Journal of Electrostatics*, 63(3-4), 223-237.
- Liu, W., Zheng, Y., Huang, L., Zhang, C., & Xie, P. (2011). Low-temperature vacuum drying of natural gardenia yellow pigment. *Drying Technology*, 29(10), 1132-1139.
- Liu, X., Qiu, Z., Wang, L., Cheng, Y., Qu, H., & Chen, Y. (2009). Mathematical modeling for thin layer vacuum belt drying of *Panax notoginseng* extract. *Energy Conversion and Management*, 50(4), 928-932.
- Ma, Q., & Chen, Z. Q. (2017). Numerical study on the effect of EHD flow on mass transfer of gas mixtures. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 27(10), 2268-2288.
- Martynenko, A., & Zheng, W. (2016). Electrohydrodynamic drying of apple slices: Energy and quality aspects. *Journal of Food Engineering*, 168, 215-222.
- Martynenko, A., & Kudra, T. (2016). Electrically-induced transport phenomena in EHD drying - A review. *Trends in Food Science & Technology*, 54, 63-73.
- 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.
- Meisami-asl E, Rafiee S, Keyhani A., & Tabatabaeefar A. (2009). Mathematical modeling of moisture content of apple slices (var. Golab) during drying. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8(6), 804-809.
- Miranda, M., Maureira, H., Rodriguez, K., & Vega-Gálvez, A. (2009). Influence of temperature on the drying kinetics, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Aloe Vera (*Aloe Barbadosis* Miller) gel. *Journal of Food Engineering*, 91(2), 297-304.
- Mortazavi, M. H., Arzani, K., & Orujalian, R. (2007). Modified atmosphere packaging of date fruit (*Phoenix dactylifera* L.) cultivar Barhee in Khalal stage. *The Fourth International Date Palm Conference*. pp: 1064-1069.
- 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. doi:10.1515/ijfe-2013-0059
- Pirnazari, K., Esehaghbeygi, A., & Sadeghi, M. (2016). Modeling the Electrohydrodynamic (EHD) Drying of Banana Slices. *International Journal of Food Engineering*, 12(1), 17-26. doi:10.1515/ijfe-2015-0005
- Shahdadi, F., Mirzaei, H. O., & Garmakhany, A. D. (2015). Study of phenolic compound and antioxidant activity of date fruit as a function of ripening stages and drying process. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 52(3), 1814-1819.
- Shahdadi, F., Mirzaei, H. O., Garmakhany, A. D., Mirzaei, H., & Khosroshahi, A. G. (2013). Effect of drying process on antioxidant properties of date palm fruits. *Minerva Biotechnologica*, 25(4), 235-243 .
- Shahhoseini, R., Ghorbani, H., Karimi, S. R., Estaji, A., & Moghaddam, M. (2013). Qualitative and quantitative changes in the essential oil of lemon verbena (*Lippia citriodora*) as affected by drying condition. *Drying technology*, 31(9), 1020-1028.
- 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.
- Siddiq, M, Aleid, S. M., & Kader, A. A. (2014). Dates: Postharvest Science, Processing Technology and Health Benefits. Wiley-Blackwell.
- Togrul, I. T., & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin-layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 413-425.
- Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5), 457-465.
- 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.