مدلسازي ضريب پخش رطوبت ورقه‌هاي نازک ليمو شيرين

محمد رضا خوانچه گردان[۱]، شاهين رفيعي[۲]*، مهدي کاشاني‌نژاد[۳] و سيدمهدي جعفري[۴]
[۱،] دانشجوي کارشناسي‌ارشد، [۳،] دانشيار [۴،] استاديار،دانشگاه علوم کشاورزي و منابع طبيعي گرگان
[۲،] دانشيار دانشکده مهندسي و فناوري کشاورزي، دانشگاه تهران.
(تاريخ دريافت: ۱۳۸۹/۶/۱۴- تاريخ تصويب: ۱۳۹۰/۵/۲۲)

چکيده

در اين مطالعه، رفتار خشک‌شدن ورقه‌هاي نازک ليمو شيرين رقم جهرم در خشک‌کن لايه‌نازک آزمايشگاهي بر اساس مدل رياضي پيج مورد بررسي قرار گرفت. آزمايش‌ها در پنج سطح دمايي ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسيوس و در دو ضخامت ۳ و ۶ ميلي‌متر و سرعت هواي ۰/۵ متر بر ثانيه با سه تکرار انجام گرفت. رفتار خشک‌شدن لايه نازک ليمو شيرين بر اساس داده‌هاي آزمايشگاهي برازش شد و ثابت‌ها و ضرايب مدل پيج استخراج شد. دقت مدل بر اساس سه شاخص آماري ضريب تعيين (R^2)، مربع کاي (χ^2) و ريشه متوسط مربع خطاي داده‌ها (RMSE) ارائه شد. متوسط شاخص آماري R^2، χ^2 و RMSE به ترتيب برابر ۰/۹۹۸۱، ۰/۰۰۰۰۵۹ و ۰/۰۰۷۱۷ براي سرعت ۰/۵ متر بر ثانيه در ضخامت ۳ ميلي‌متر و ۰/۹۹۷۸، ۰/۰۰۰۰۷۲، ۰/۰۰۸۲۲، براي سرعت ۰/۵ متر بر ثانيه در ضخامت ۶ ميلي‌متر برآورد شد. براي توضيح انتقال رطوبت از لايه‌هاي نازک ليمو شيرين، مدل فيک مورد استفاده قرار گرفت. نتايج نشان داد مقدار ضريب پخش موثر در نمونه‌هاي خشک شده در دماهاي بين ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسيوس و در سرعت ۰/۵ متر بر ثانيه و ضخامت ۳ ميلي‌متر، از $۸/۰۴ \times ۱۰^{-۹}$ تا $۲/۹۷ \times ۱۰^{-۸}$ متر بر ثانيه و در ضخامت ۶ ميلي‌متر، از $۱/۳۱ \times ۱۰^{-۸}$ تا $۷/۶۳ \times ۱۰^{-۸}$ متر مربع بر ثانيه تغيير مي‌کند. با استفاده از رابطه آرهنيوس انرژي لازم براي فعالسازي و ثابت ضريب پخش در ضخامت ۳ ميلي‌متر به ترتيب برابر ۲۸/۵۳ کيلو ژول بر مول و $۵/۰۱ \times ۱۰^{-۴}$ متر مربع بر ثانيه و در ضخامت ۶ ميلي‌متر به ترتيب برابر۳۹/۴۶ کيلو ژول بر مول و $۹/۳۷ \times ۱۰^{-۴}$ متر مربع بر ثانيه به دست آمد.

واژه‌هاي کليدي:ضريب پخش، رابطه آرهنيوس، مدل فيک، ورقه ليمو شيرين، ورقه لايه نازک

مقدمه

مرکبات در بخش‌هاي گسترده اي از جهان (۱۱۳ کشور) از ٤٠ درجه عرض شمالي تا ٤٠ درجه عرض جنوبي در نقاطي که شرايط آب و هوايي بسيار خشک و زياد سرد نباشد (نقاط داراي آب و هواي گرمسيري و نيمه گرمسيري) کاشته مي‌شود. به همين دليل انواع مرکبات را ميوه‌هاي نيمه گرمسيري مي‌نامند که عموماً دماي صفر تا ٤٠ درجه سلسيوس را تحمل مي‌کنند (Anon., 1998).

سطح زير کشت مرکبات کشور در سال ۱۳۸۷ حدود ۲۹۱ هزار هکتار برآورد شده است که ۸۲/۸ درصد آن درختان بارور مرکبات و ۱۷/۲ درصد بقيه نهال مي‌باشد. ميزان توليد مرکبات در سال ۱۳۸۷، حدود چهار ميليون تن بوده که در بين استان‌ها، بيشترين توليد مرکبات با ٤٥/۱ درصد از کل توليد در استان مازندران بوده است. استان‌هاي فارس، منطقه جيرفت و کهنوج، هرمزگان، گيلان و کرمان به ترتيب با ۲۷/۵، ۹/۷، ۹/٤، ۲/۵ و ۱/۲ درصد سهم در توليد مرکبات کشور در رتبه‌هاي بعدي قرار دارند. شش استان مزبور در مجموع ۹٦/٤ درصد مرکبات کشور را توليد کرده‌اند (Anon., 2010).

ميوه‌هايي که مرکبات ناميده مي‌شوند از خانواده روتاسه[1] و زير خانواده آرانتوئيده[2] هستند. اين زير خانواده بيش از ۳۳ جنس مختلف دارد که تنها ۳ جنس: پونسيروس[3]، فورچونلا[4] و سيتروس[5] جنبه اقتصادي دارند و در کشورهاي توليد کننده مرکبات از اهميت ويژه‌اي برخور دارند (Anon., 1998).

بر اساس آمار منتشر شده ميزان توليد ليمو شيرين (Citrus Limetta L.) و ليمو ترش (Citrus Aurantifolia L.) در ايران در سال ۱۳۸۷ به ترتيب ۳۵۸٤٦٤ و ۳۳٦۳۹۰ تن بوده است که به ميزان زيادي به صورت تازه خوري استفاده مي‌شود و مقداري نيز به کشورهاي حاشيه خليج فارس صادر مي‌شود (Anon., 2010).

* نويسنده مسئول: Shahinrafiee@ut.ac.ir

1. Rutaceae
2. Arantoidae
3. Poncirus
4. Fortunela
5. Citrus

خشک کردن میوه‌ها به مشخصات مربوط به انتقال جرم و حرارت محصول بستگي دارد. ضريب پخش رطوبت[1] يكي از مشخصات محصولات كشاورزي است و مقدار آن بستگي به شرايط داخلي ماده، دارد. آگاهي از ضريب پخش موثر براي طراحي و مدل سازي فرايند انتقال جرم، مثل آب زدايي، جذب سطحي و دفع رطوبت در طول انبارداري، لازم مي‌باشد (Rafiee, et al., 2009).

در میان برخوردهاي متعدد میان ذره‌ها فقط تعداد محدودي منجر به انجام واكنش مي‌شوند. زيرا همگي آنها داراي انرژي كافي نبوده و در واقع انرژي ذره‌ها هنگام برخورد بايد به حدي باشد كه بتواند پيوندهاي موجود ميان مواد واكنش دهنده را سست كند. اين انرژي را انرژي فعالسازي[2] گويند. در واقع انرژي فعال‌سازي مانند يک سد است كه مانع انجام واكنش شده و باعث كندي انجام آن مي‌شود. به بيان بهتر انرژي فعالسازي كمترين مقدار انرژي لازم براي شروع يک واكنش است (Anon., 2007). در خشک كردن ورقه‌هاي كيوي نيز نياز به محاسبه ميزان انرژي لازم جهت فعالسازي ورقه مي‌باشد. بنابراين با استفاده از آناليز داده‌ها اين كميت به دست مي‌آيد.

Meisami asl (2007) روي ضريب پخش لايه‌هاي نازک سيب مطالعه‌اي انجام داد. نتايج حاكي از آن بود كه مقدار ضريب پخش موثر در نمونه‌هاي خشک شده در دماهاي بين ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسيوس، از $۱/۴۹۵\times۱۰^{-۸}$ تا $۱/۷۰۶\times۱۰^{-۸}$ متر مربع بر ثانيه تغيير مي‌كند. انرژي لازم براي فعال سازي نيز با افزايش ضخامت و سرعت هواي خشک كننده افزايش نشان داد. در اين تحقيق مشخص گرديد كه انرژي فعال سازي بين ۲۲۶۶۴/۰۳ و ۳۰۹۱۹/۰۱ ژول بر مول تغيير مي‌كند.

Rafiee et al. (2007) در زمينه اثر شرايط خشک شدن بر روي پخش رطوبت و انرژي فعال‌سازي پرتقال رقم تامسون، تحقيق نمودند. در اين تحقيق ورقه هاي پرتقال در دماي ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسيوس و با سرعت هواي ۰/۵، ۱ و ۲ متر بر ثانيه، خشک شدند. اين عمل براي ورقه‌هايي به ضخامت ۲، ۴ و ۶ ميلي‌متر انجام گرفت. از قانون نخست فيک[3] استفاده شد و در نهايت پخش موثر، ثابت پخش و نيز انرژي فعال‌سازي محاسبه شد و اثرات دما و سرعت و ضخامت ورقه‌ها بر روي اين كميت ها مشخص گرديدند.

Corzo et al. (2008) ضريب پخش موثر آب در ورقه‌هاي انبه در مراحل رشد در طي خشک كردن را مورد آزمايش قرار داده و مقدار ضريب پخش را در چهار دماي ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسيوس در دو سرعت جريان هواي ۱/۸ و ۱/۹۱ متر بر ثانيه گزارش نمودند. مقدار ضريب پخش محاسبه شده در تيمارهاي مختلف آزمايش بين $۳/۲۸\times۱۰^{-۱۰}$ تا $۲/۳۰\times۱۰^{-۱۰}$ متر مربع بر ثانيه تغيير مي‌كرد.

Aghbashlo et al. (2008) در آزمايشي كه بر روي محاسبه ضريب پخش زرشک انجام دادند در محدوده دماي ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسيوس ضريب پخش را بين $۳/۳۲\times۱۰^{-۱۰}$ تا $۹/۰۰\times۱۰^{-۹}$ متر مربع بر ثانيه ثبت نمودند.

Simal et al. (2005) پخش موثر را براي خشک كردن ورقه كيوي در ظرفيت رطوبت ۴/۶۵ تا ۰/۱۵ (بر پايه خشک) محاسبه كردند.

هدف از انجام اين تحقيق، ارائة مناسب‌ترين مدل سينتيک و مدل فيک و ضريب پخش موثر براي فرآيند خشک شدن ورقه‌هاي نازك ليمو شيرين بود.

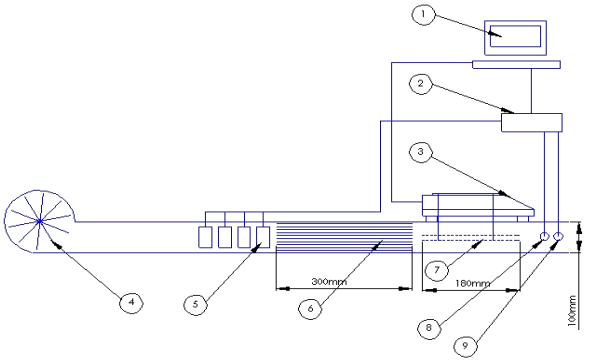
مواد و روش‌ها

تجهيزات خشک‌كن لايه نازک

در اين تحقيق از يک خشک‌كن لايه نازک آزمايشگاهي استفاده شد (شكل۱). اين خشک‌كن از يک فن سانتريفوژ براي ايجاد جريان هوا و چهار گرم‌كن برقي۵۰۰ وات جمعاً به قدرت ۲۰۰۰ وات براي گرم‌كردن هواي ورودي به محفظه خشک‌كن و دو حسگر دما (LM35) با دقت ±۰/۴°C و رطوبت (خازني، ساخت فيليپين) با دقت ±۱% براي اندازه‌گيري دما و رطوبت نسبي هواي خشک‌كننده و يک ترازوي ديجيتالي (مدل GF3000 ساخت شركت A & D ژاپن) با حساسيت ۰/۰۱g و ظرفيت ۳۱۰۰ گرم تشكيل شده است. براي اجراي الگوريتم كنترل و پايش اطلاعات، نرم افزاري در محيط ويژوال بيسيک ۶ پياده‌سازي شده كه اطلاعات مربوط به حسگرهاي دما و رطوبت و نيز روشن يا خاموش بودن هر يک از گرم‌كن‌ها را در هر لحظه نمايش مي‌دهد (Sharifi, 2005).

براي اندازه‌گيري سرعت جريان هوا از يک سرعت‌سنج نوع سيم داغ مدل TESTO 405-V1 (ساخت آلمان) با حساسيت ۰/۰۱ متر بر ثانيه استفاده شد. نحوه اندازه‌گيري بدين صورت بود كه پايه حسگر (سيم داغ) در نقاط مختلف كانال ورودي هوا قرار داده شده و سرعت‌ها قرائت گرديد و سرعت متوسط منظور شد. سرعت بعد از محفظه مستقيم كننده (شماره ۶ در شكل ۱) اندازه‌گيري مي‌شد.

1. Moisture Diffusion Coefficient
2.Effective diffusivity
3.Fick's First Law



۱- رايانه ۲- ميكروكنترلر ۳- ترازوي ديجيتال ۴- فن سانتريفيوژ ۵- گرم‌كن‌ها ۶- محفظه مستقيم‌كننده ۷- سيني نمونه‌ها ۸- حسگر دماي هواي خشك‌كن ۹- حسگر رطوبت هواي ورودي
شكل۱- طرحواره خشك‌كن آزمايشگاهي.

روش تهيه نمونه

پس از شستن سطح ليمو شيرين‌ها، به وسيله دستگاه ورقه‌بر، ورقه‌هايي با ضخامت ۳ ميلي‌متر تهيه شد. آزمايش‌هاي خشك‌كردن در پنج سطح دمايي ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسيوس و سرعت جريان هواي ورودي ۰/۵ متربرثانيه و سه تكرار انجام شد. در طي خشك شدن، وزن ورقه‌ها به وسيله ترازوي ديجيتالي متصل به رايانه و رطوبت و دماي هواي خشك‌كن در هر ۵ ثانيه اندازه‌گيري و ثبت مي‌شد. خشك شدن تا زمان ثابت شدن تقريبي وزن ورقه‌هاي نازك ليمو شيرين (تغييرات وزن نمونه تقريباً صفر شد) ادامه داشت. سپس نمونه‌ها در داخل آون با دماي ۱۰۵°C قرار داده شد و پس از خشك شدن به مدت ۷ ساعت وزن خشك نمونه‌ها به دست آمد (ASAE,2001). رطوبت ورقه‌ها طي خشك شدن به وسيله معادله زير محاسبه شد:

$$M = \frac{W_w - W_d}{W_d} \qquad (۱)$$

كه در آن M رطوبت نمونه ورقه‌هاي ليمو شيرين بر پايه خشك (d.b., kg/kg)، W_w وزن نمونه ليمو شيرين در طي خشك شدن (kg) و W_d وزن نمونه (kg) ليمو شيرين خشك است.

آماده سازي دستگاه خشك‌كن براي آزمايش

براي آماده كردن خشك‌كن، پس از روشن كردن رايانه، فن، ترازو، گرم‌كن‌ها و سامانه جمع‌آوري داده، سرعت هواي فن براي آزمايش مورد نظر تنظيم مي‌شد. بعد از آن نرم افزار مانيتورينگ و كنترل اجرا شده و دماي مورد نظر براي آزمايش در نرم افزار تنظيم مي‌گرديد. براي رسيدن شرايط سامانه به حالت پايدار كليه آزمايش‌ها ۳۰ دقيقه بعد از روشن كردن سامانه شروع مي‌شدند. سپس، سيني حاوي نمونه‌ها با احتياط در محفظه خشك‌كن قرار داده مي‌شد.

مدلسازي رياضي منحني خشك شدن

براي مدلسازي رياضي سينتيک خشك شدن توده بستر نازک ليمو شيرين از نسبت رطوبت در طي خشك شدن لايه‌هاي ليمو استفاده شد. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اوليه، رطوبت تعادلي و رطوبت نمونه در هر لحظه در طي خشك شدن به وسيله فرمول زير محاسبه گرديد (Akpinar et al., 2003):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \qquad (۲)$$

كه در آن، MR : نسبت رطوبت، M: رطوبت نمونه بر پايه خشك در لحظه جاري، M: رطوبت تعادلي بر پايه خشك، M_0: رطوبت اوليه محصول بر پايه خشك مي‌باشد.

طرف چپ معادله نسبت رطوبت را كه مشخص كننده فرآيند خشك كردن است نشان مي‌دهد. براساس تحقيقات انجام شده، در محصولاتي كه داراي رطوبت زياد هستند معادله نسبت رطوبت در طي خشك شدن به جاي معادله (۲) به صورت معادله (۳) ساده مي‌گردد (Gunhan et al., 2005).

$$MR = \frac{M}{M_0} \qquad (۳)$$

كه در آن؛ MR: نسبت رطوبت، M: رطوبت توده در لحظه جاري، M_0: رطوبت توده محصول (Doymaz, 2007a; Goyal et al, 2007; Menges & Ertekin, 2006;2006) مي‌باشد. در نتيجه براي محاسبه نسبت رطوبت نيازي به اندازه‌گيري رطوبت تعادلي نيست. مدل مورد نظر در اين تحقيق با توجه به هدف اصلي مقاله كه استخراج ضريب پخش و انرژي فعالسازي است، مدل پيج در نظر گرفته شد. زيرا اين مدل نزديک‌ترين معادله براي محاسبه ضريب پخش مي‌باشد. از طرفي خوانچه‌گردان و همكاران معادله پيج را با ۱۰ معادله ديگر مقايسه نمود و ضريب تعيين معادله پيج را ۰/۹۹۸ اعلام كرد كه با توجه به سادگي و كاربرد آن در مدلسازي ضريب پخش در اين مقاله به كار رفته است. مدل‌هاي رگرسيوني تغييرات رطوبت در طي خشك‌شدن بر اساس متغير مستقل زمان به وسيله نرم‌افزار SPSS 16 استخراج شد (Khanchegardan, 2009).

$$MR = \exp(-kt^n) \qquad (۴)$$

كه در آن t: زمان (min)، k: ضريب (l/min) و n: ضريب معادله است.

از سه معيار ضريب تعيين (R^2)،مربع كاي (χ^2) و ريشه متوسط مربع خطاي داده‌ها (RMSE) براي سنجش دقت برازش مدل استفاده مي‌شود كه هرچه مقدار R^2 بيشتر و χ^2 و RMSE كمتر باشد مدل دقيق‌تر ارزيابي مي‌شود (Goyal et al.,

(2007; Menges & Ertekin, 2006; Yaldiz; 2001). مقادير دو معيار χ^2 و RMSE با استفاده از معادلات زير محاسبه شدند:

$$\chi^2 = \frac{\Sigma_{i=1}^{n}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (۵)$$

$$RMSE = [\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(MR_{pre,i} - MR_{epx,i})]^{1/2} \quad (۶)$$

که $M_{exp,i}$ رطوبت ليمو شيرين مشاهده شده در i امين اندازه‌گيري، $M_{pre,i}$ رطوبت ليمو شيرين پيش‌بيني شده از مدل در i امين اندازه‌گيري، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و n تعداد ثابت‌هاي به كار رفته در معادله است (Akpinar et al., 2003; Togrul & Pehlivan, 2003).

تعيين ضريب پخش و انرژي فعال‌سازي

خشک كردن ميوه‌ها به مشخصات مربوط به انتقال جرم و حرارت در محصولي بستگي دارد كه براي مدلسازي انتقال حرارت و جرم نياز به محاسبه ضريب پخش و انرژي فعالسازي مي‌باشد كه براي طراحي فرايند، كنترل كيفي، تعيين شرايط محصول در طي خشک شدن و انبارداري لازم مي باشد.

قانون دوم پخش فيک، كه در معادله (۷) نشان داده شده است؛ به طور وسيعي براي توصيف فرايند خشک كردن در طول كاهش نرخ رطوبت براي بيشتر مواد بيولوژيكي استفاده مي‌شود (Rafiee et al., 2009):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla [D_{eff}(\nabla M)] \quad (۷)$$

كه در آن :

D_{eff}: ضريب پخش رطوبت موثر (m^2/s)

M: محتواي رطوبت (kg water/kg dry solid)

t: زمان (s)

D_{eff} نشان دهنده قسمت هدايت در تمام مكانيزم‌هاي انتقال رطوبت است. اين پارامتر معمولاً از منحني‌هاي خشک كردن آزمايشگاهي تعيين مي‌شود.

بيشترين فرض در تعيين اين پارامتر اين است كه خشک كردن به انتقال جرم محدود مي‌شود و نيز فرايند خشک كردن به صورت ايزوترم (هم دما) در تمام نمونه‌ها اتفاق مي افتد.

رابطه بين دما و ضريب پخش موثر در معادله (۸) نشان داده شده است (Doymaz, 2006) :

$$D_{eff} = D_0 \exp(-\frac{E_a}{RT_a}) \quad (۸)$$

كه در آن :

D_0: ثابت ضريب پخش m^2/s

E_a: انرژي فعال‌سازي kJ/mol

R: ثابت جهاني گازها kJ/mol K

T_a: دماي مطلق هوا K

انرژي فعال‌سازي از طريق نمودار $\ln(D_{eff})$ در مقابل (1/T) به دست مي‌آيد. دماي استفاده شده در معادله فوق دماي محصور شده در محيط خشک كردن مي باشد، بنابراين مي‌بايد فرض هم دما بودن هم در پخش موثر و هم در انرژي فعالسازي مد نظر قرار گيرند.

با توجه به اينكه ضخامت (۳ و ٦ ميلي‌متر) نسبت به قطر (حدود ۵۰ ميلي‌متر) ورقه‌هاي ليمو شيرين بسيار كوچک‌تر است مي‌توان ورقه‌ها را به صورت باريكه‌هاي نامحدود در نظر گرفت و مدل پخش رطوبت را براساس معادله (۹) محاسبه نمود (Doymaz, 2006). فرض‌هايي كه براي اين معادله در نظر گرفته مي شود به شرح زير است :

- رطوبت در ابتدا به صورت يكنواخت درون جرم نمونه پخش مي شود.
- انتقال جرم به صورت منظم به طرف مركز انجام مي‌گيرد.
- محتواي رطوبت سطحي نمونه در يك لحظه با شرايط هواي محيط به تعادل مي رسد.
- مقاومت سطح نمونه در برابر انتقال جرم تفاوت قابل اغماضي با مقاومت داخلي آن دارد.
- انتقال جرم فقط با پخش انجام مي گيرد.
- ضريب پخش ثابت مي باشد و افت آن قابل چشم پوشي است.

(۹)

$$MR = \frac{M}{M_0} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)^2}\exp\left(-\frac{(2n-1)^2\pi^2 D_{eff}t}{4L^2}\right)$$

كه در آن :

MR: نسبت رطوبت

L: ضخامت ورقه ها (m)

n: عدد صحيح مثبت

براي خشک شدن در زمان طولاني معادله (۹) به معادله (۱۰) ساده مي‌گردد.

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}t}{4L^2}\right) \quad (۱۰)$$

ضريب k_0 با رسم منحني $\ln(MR)$ در مقابل زمان محاسبه مي شود، مطابق معادله (۱۱) زير (Rafiee et al., 2007):

$$k_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (۱۱)$$

نتايج و بحث

رطوبت اوليه ليمو شيرين در آزمايش٧/٤ تا ٨/٥ و رطوبت نهايي ليمو شيرين تقريبا برابر ۰/۵ كيلوگرم آب به كيلوگرم ماده خشک بود. پس از توزين ورقه‌هاي ليمو شيرين در هر يك از

آزمايش‌ها و به دست آوردن ماده خشك ليمو شيرين، رطوبت ورقه‌هاي ليمو شيرين در طي خشك شدن براساس رابطه (۱) به دست آمد (Giner & Mascheroni, 2002).

با توجه به داده‌هاي آزمايشگاهي ۳۰ آزمايش انجام شده مقادير MR در طي خشک شدن به وسيله معادله (۲) محاسبه شد و مدل برازش داده شد و دقت براساس متوسط شاخص‌هاي آماري در دماهاي مختلف براي مدل پيج ارايه شد(جداول ۱-۳).

جدول ۱- مقايسه دقت برازش مدل پيج براساس متوسط شاخص‌هاي آماري درضخامت ۳ ميلي متر

مدل	ضخامت (mm)	R^2	RMSE	χ^2
پيج	۳	۰/۹۹۸۱۲	۰/۰۰۷۱۶۵	۰/۰۰۰۰۵۱۸
پيج	۶	۰/۹۹۷۷۸	۰/۰۰۸۲۲۳۳	۰/۰۰۰۰۷۱۵

جدول۲- مقادير ثابت و ضرايب مدل پيج براي ورقه ليمو شيرين با ضخامت ۳ ميلي‌متر

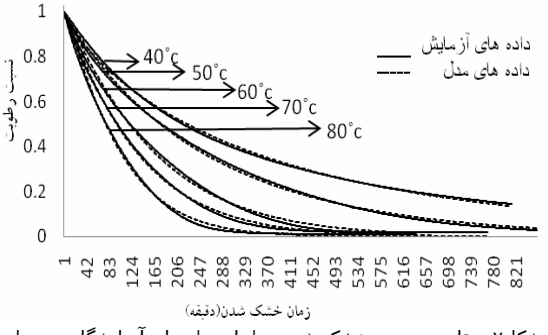
دما (°C)	n	k	R^2
٤٠	۰/۸۲٤۹٤٥	۰/۰۰۸۰۱٦	۰/۹۹۸۳۲
٥٠	۰/۹٦۹۸۹۷	۰/۰۰٤٦۱۲	۰/۹۹۸٥۸
٦٠	۱/۰۸۷۸۸٥	۰/۰۰۳۸۲۱	۰/۹۹۷۸۳
۷۰	۱/۰۷٦۰۱٦	۰/۰۰٥۱۰۷	۰/۹۹۷۷۷
۸۰	۱/۱٥۳۳۸۲	۰/۰۰٤٦۷٥	۰/۹۹۸۱

جدول۳-مقادير ثابت و ضرايب مدل پيج براي ورقه ليمو شيرين با ضخامت ٦ ميلي‌متر

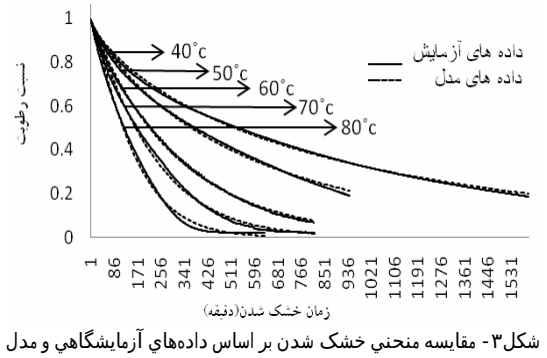
دما (°C)	n	k	R^2
٤٠	۰/۷٥۷۹۷۹	۰/۰۰٦۰۲۷	۰/۹۹۸۸۲
٥٠	۰/۸٤۹۳۳۳	۰/۰۰٤٥۹۱	۰/۹۹۷٤۱
٦٠	۰/۹۹۰۳۹٦	۰/۰۰۳۳٦۹	۰/۹۹۹۱
۷۰	۱/۱۰۸۹۱٤	۰/۰۰۲۳۸٥	۰/۹۹۷۰۸
۸۰	۱/۱۹٥۱۷٤	۰/۰۰۲۲٥٥	۰/۹۹٦٤۷

شكل (۲) و (۳) نيز تغيير رطوبت در طي خشك شدن با دماهاي مختلف حاصل از داده‌هاي آزمايشگاهي و داده‌هاي مدل پيج را نشان مي‌دهد. همان‌طور كه مشاهده مي‌شود، ميان افزايش دماي هوا و مدت زمان خشک‌شدن محصول رابطه معكوس وجود دارد. به عبارتي با گذشت زمان، رطوبت بيشتري از محصول خارج شده در نتيجه مقدار صورت كسر معادله (۲) كاهش يافته در حالي كه مقدار مخرج كسر ثابت مي‌ماند در نتيجه با گذشت زمان نسبت رطوبت كاهش مي‌يابد.

ضريب پخش موثر D_{eff} ، توسط معادله (۸) محاسبه شد و در جدول (٤) نشان داده شده است. مشاهده مي شود كه مقدار ضريب پخش موثر در نمونه هاي خشک شده در دماهاي بين ٤٠ تا ۸۰ درجه سلسيوس، از $۸/۰٤ \times ۱۰^{-۹}$ تا $۷/٦۳ \times ۱۰^{-۸}$ متر مربع بر ثانيه تغيير مي كند. بالاترين مقدار مربوط به دماي ۸۰ درجه سلسيوس و ضخامت ٦ ميلي‌متر مي‌باشد. محاسبات نشان‌دهنده رابطه مستقيم بين پخش مؤثر و درجه حرارت بود، به طوري كه هر چه دما افزايش يابد، ضريب موثر پخش نيز افزايش مي يابد. اين نتيجه با نتايجي كه رفيعي و همكاران براي ورقه نازک پرتقال و كاراو و همكاران براي پوست پرتقال انجام داده‌اند تأييد شده است. با توجه به اينكه منظور از ضريب پخش عبارت است از مقدار رطوبتي كه در يک ثانيه از واحد سطح عبور مي‌كند براي اين پديده مي‌توان دو علت را ذكر نمود ۱) با افزايش دما ميزان جنبش مولكولي آب يا بخار آب داخل محصول افزايش يافته و با سرعت بيشتري در داخل محصول جريان مي‌يابد. ۲) با افزايش دما، رطوبت تعادلي سطح محصول با هواي خشک كننده كاهش يافته و رطوبت سطح محصول بيشتر كاهش مي‌يابد، با كاهش بيشتر رطوبت سطح محصول، گراديان رطوبت سطح و مركز محصول بيشتر شده رطوبت با سرعت بيشتري در داخل محصول حركت كرده در نتيجه ضريب پخش افزايش مي‌يابد. Rafiee et al. (2010) ضريب پخش موثر پرتقال در طي خشک شدن براي محدوده دمايي ٤٠ تا ۷۰ درجه سلسيوس، از $٦/٥۷ \times ۱۰^{-۱۰}$ تا $۳٥/۰ \times ۱۰^{-۹}$ متر مربع بر ثانيه گزارش نمودند. Garau et al. (2006) در تحقيقي كه بر روي پوست پرتقال انجام دادند در محدوده دماي هواي خشک كن ۳۰ تا ۹۰ درجه سلسيوس، ضريب پخش موثر را از $۰/۸۱ \times ۱۰^{-۱۰}$ تا $٥/۱۱ \times ۱۰^{-۹}$ متر مربع محاسبه كردند.



شكل۲- مقايسه منحني خشک شدن بر اساس داده‌هاي آزمايشگاهي و مدل پيج براي ورقه ليمو شيرين با ضخامت ۳ ميلي‌متر



شكل۳- مقايسه منحني خشک شدن بر اساس داده‌هاي آزمايشگاهي و مدل پيج براي ورقه ليمو شيرين با ضخامت ۶ ميلي‌متر

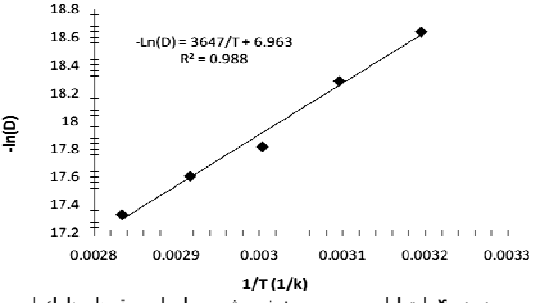
جدول ۴-ضريب پخش موثر در ورقه‌هاي نازک ليمو شيرين در شرايط مختلف خشک شدن

ضخامت ورقه (mm)	سرعت هواي خشك كن (m/s)	ضريب پخش موثر (m^2/s)				
		٤٠ºC	٥٠ºC	٦٠ºC	٧٠ºC	٨٠ºC
٣	٠/٥	$٨/٠٤\times١٠^{-٩}$	$١/١٤\times١٠^{-٨}$	$١/٨٣\times١٠^{-٨}$	$٢/٢٦\times١٠^{-٨}$	$٢/٩٧\times١٠^{-٨}$
٦	٠/٥	$١/٣١\times١٠^{-٨}$	$١/٩٥\times١٠^{-٨}$	$٣/٧\times١٠^{-٨}$	$٥/٢٨\times١٠^{-٨}$	$٧/٦٣\times١٠^{-٨}$

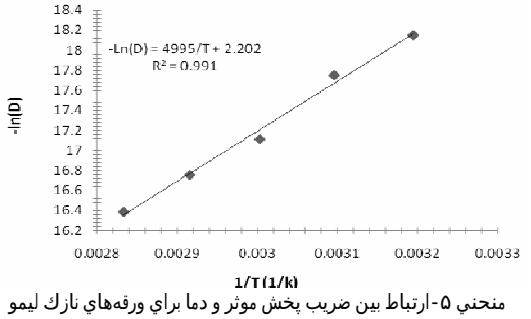
جدول ۵- ثابت ضريب پخش و انرژي فعال سازي براي ورقه‌هاي نازك ليمو شيرين

ضخامت (mm)	ثابت ضريب پخش D_0 (m²/s)	انرژي فعال سازي E_a (kJ/mol)
٣	$١/٥\times١٠^{-٤}$	٥٣/٢٨
٦	$٣٧/٩\times١٠^{-٤}$	٤٦/٣٩

با استفاده از رابطه آرهنيوس كه در معادله (٨) آمده است، وابستگي ضريب موثر پخش به دما به درستي توضيح داده شد. انرژي فعالسازي و ثابت ضريب پخش از شيب نمودار آرهنيوس(ln(D)-1/T) محاسبه شد و ثابت ضريب پخش موثر(D_0) براي ورقه‌هاي ليمو شيرين در ضخامت ۳ ميلي‌متر برابر $٥/٠١\times١٠^{-٤}$ متر بر ثانيه و انرژي فعالسازي (E_a) برابر ۲۸/۵۳ كيلو ژول بر مول و در ضخامت ٦ ميلي‌متر برابر $٩/٣٧\times١٠^{-٤}$متر بر ثانيه و انرژي فعالسازي (E_a) برابر ۳۹/۴۶ كيلو ژول بر مول در محدوده دمايي ٤٠ تا ٨٠ درجه سلسيوس به دست آمد. انرژي فعالسازي براي خشک شدن ورقه نازک پرتقال بين ١٦/٤٧ تا ٤٠/٩٠(Rafiee et al., 2010)، براي پوست پرتقال،٣٦/٤٠(Garau et al., 2006)، براي گوجه فرنگي، ٣٢/٩٤ (Doymaz, 2007b) و براي نخود سبز بين ٢٨/٤٠ تا٢٤/٧٠ كيلو ژول بر مول (Simal et al., 1996) گزارش شده است. ارتباط بين ضريب پخش موثر و دما، توسط منحني‌هاي (٤) و (٥) نشان داده شده است. اين منحني از طريق رگرسيون خطي و غير خطي به دست آمده است، ضريب تعيين (R^2) براي ارتباط بين ضريب پخش موثر و دما در ضخامت ۳ ميلي متر و ٦ ميلي متر به ترتيب برابر ۰/۹۸۸ و ۰/۹۹۱ حاصل شد.



منحني۴-ارتباط بين ضريب پخش موثر و دما براي ورقه‌هاي نازك ليمو شيرين با ضخامت ۳ ميلي‌متر



منحني ۵-ارتباط بين ضريب پخش موثر و دما براي ورقه‌هاي نازك ليمو شيرين با ضخامت۶ميلي‌متر

نتيجه گيري

۱- مدل پيج، سينتيک خشک شدن ورقه نازک ليمو شيرين را با ضريب تعيين بيش از ۰/۹۹۷، پيش بيني مي‌كند.

۲- ضريب پخش موثر خشک شدن ورقه نازک ليمو شيرين براي محدوده دماي هواي خشک كن بين ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسيوس، بين $٨/٠٤\times١٠^{-٩}$ تا $٧/٦٣\times١٠^{-٨}$ متر مربع بر ثانيه تغيير مي‌كند.

۳- ثابت ضريب پخش در معادله آرهنيوس براي ورقه نازک ليمو شيرين با ضخامت ۳ و ۶ ميلي‌متر به ترتيب $٥/٠١\times١٠^{-٤}$ و $٩/٣٧\times١٠^{-٤}$ مترمربع بر ثانيه است.

۴- انرژي فعالسازي خشک شدن ورقه نازک ليمو شيرين با ضخامت ۳ و ۶ ميلي‌متر به ۲۸/۵۳ و ۳۹/۴۶ كيلو ژول بر مول است.

سپاسگزاري

بدين وسيله از گروه مهندسي ماشين‌هاي كشاورزي دانشكده مهندسي و فناوري كشاورزي دانشگاه تهران براي تأمين وسايل و امكانات مورد نياز تشكر و قدرداني مي‌گردد.

نمادها

نماد	شرح	واحد
a, b, n, k	ثابت‌هاي تجربي مدل‌هاي رياضي خشک‌كردن	
M	محتواي رطوبت	d.b.
M_e	رطوبت تعادلي	kg water/kg dry matter
M_0	محتواي رطوبتي اوليه	kg water/kg dry matter

MR	نسبت رطوبت	
N	تعداد مشاهدات	
n	تعداد ثابت‌ها	
RMSE	ريشه متوسط مجموع مربعات خطا	
s	زمان	
W_d	وزن ليمو شيرين خشک	kg
W_w	وزن ليمو شيرين در طي خشک شدن	kg
χ^2	مربع کاي	

T	دما	°C
T_{abs}	دماي واقعي	K
χ^2	مربع کاي	
D_{eff}	ضريب پخش رطوبت موثر	m^2/s
D_0	ضريب ثابت رابطه آرهنيوس	m^2/s
E_a	انرژي فعالسازي	kJ/ mol
R	ثابت عمومي گازها	kJ/mol K
T_a	دماي مطلق هوا	K

REFERENCES

thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, 79, 176–180.

Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E., & Hepbasli, A. (2005). Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46, 1667–1679.

Khanchegardan, M.R. (2009). *Drying Kinetics Modeling of Sweet Lemon Slice*. M. Sc. thesis. Department of Food Science & Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran. p. 100. (In Farsi)

Meisami asl, E. (2007). *Mathematical modeling of apple (Golab variety) slices*. M. Sc. thesis. Department of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. (In Farsi)

Menges, H.O., & Ertekin, C. (2006). Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77, 119–125.

Midilli, A., Kucuk., H. , & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20 (7), 1503–1513.

Rafiee, S. , Kashaninejad, M., Keyhani, A.,and Jafari, A. (2009). Pistachio Nut (Ohadi) Mass Transfer Simulation during Drying with High Temperature Finite Element Method. *Journal of Agricultural Science & Technology*, 11, 137-146.

Rafiee, S., Jafari, A., Kashaninejad, M., & Omid, M. (2007). Experimental & Numerical Investigations of Moisture Diffusion in Pistachio Nuts during Drying with High Temperature & Low Relative Humidity. *International Journal of Agriculture & Biology*, 9 (3), 412-415.

Rafiee, S., Sharifi , H., Keyhani, A., & Jafari, A. (2007). Modeling Effective Moisture Diffusivity of Orange ('Thompson'). The 5th *Asia-Pacific Drying Conference* (ADC07). 1215-1221.

Rafiee, S., Sharifi, M., Keyhani, A., Omid, M., Jafari, A., Mohtasebi, S.S., & Mobli, H. (2010). Modeling Effective Moisture Diffusivity of Orange Slice (Thompson cv.), *International Journal of Food Properties*, 13(1), 32 – 40.

Simal, S., Femenia., A., Garau, M.C., & Rossello, C. (2005). Use of exponential, Page's & diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engnieering*, 66, 323–328.

Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J.andRossello, C. (1996). Drying models for green peas. *Food Chemistry*, 55 (2), 121–128.

Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H. & Samimi Akhijahani, H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation & energy consumption during the thin-layer drying of berberies fruit (berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49, 2865-2871.

Akpinar, E., Bicar., Y., & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59, 99-104.

Anonymous. (2007). Available at http://en.wikipedia.org/WIKI/ kiwi-fruit.

Anonymous. (1998). *Five garden products.* Statistics & Information Organization. Ministry of Agriculture. (In Farsi)

Anonymous. (2005). *Five garden products*. Statistics & Information Organization. Ministry of Agriculture. (In Farsi)

Anonymous. (2006). Citrus Research Institute of Iran. Ministry of Agriculture.

Anonymous., (2010). *The results of a sample survey designs garden products in 1387*. Statistics Bureau, Ministry of Agriculture, 15. (In Farsi)

ASAE standards. (2001). Thin layer drying of grains & crops. *ASAE* S448 DEC93.

Corzo, O., Bracho, N. & Alvarez, C. (2008). Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. *Journal of Food Engineering*, 87, 479-484.

Crank J., (1975). *The mathematics of diffusion*. 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, 104-106.

Doymaz, I. (2006). Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 74, 370–375.

Doymaz, I. (2007a). Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *Journal of Food Engineering*, 78, 591–596.

Doymaz, I. (2007b). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78, 1291–1297.

Garau, M.C., Simal, S., Femenia, A., & Rossello, C. (2006). Drying of orange skin: drying kinetics modeling & functional properties. *Journal of Food Engineering*, 75, 288–295.

Giner, S. A. & Mascheroni, R. H. (2002). Diffusive drying kinetics in wheat. Part 2. Applying the simplified analytical solution to experimental data. *Biosystems Engineering*, 81(1), 85–97.

Goyal, R.K., Kingsly., A.R.P. , Manikantan., M.R., & Ilyas, S.M. (2007). Mathematical modelling of

Togrul, I. T., & Pehlivan, D. (2003). Modeling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58(1), 23–32.

Sharifi, M. (2007). *Investigation of drying models & comparison of time & consumptions of orange (Thompson variety) slice*. M. Sc. thesis. Department of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

Yaldiz, O. (2001). Effect of drying properties on drying characteristics of carrot & leek. In: Proceedings of the 20th *National Congress on Agricultural Mechanization*, Sanliurfa, Turkey.