

بهینه سازی ضریب نفوذ موثر رطوبت و مدلسازی ریاضی سینتیک خشک کردن برش های میوه به (*Cydonia oblonga*)

مرتضی محمدی^a، زهرا پورفلاح^a، منیره نهاردانی^a، سید محمد مشکانی^{b*}

^a دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران
^b دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۹/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۶/۳

چکیده

مقدمه: خشک کردن یکی از قدیمی ترین روش های نگهداری محصولات کشاورزی می باشد و کوشش بر این است تا آهنگ خشک کردن از طریق انتقال گرما و رطوبت به بیشترین مقدار ممکن رسانده شود.

مواد و روش ها: در مطالعه پیش رو، فرآیند خشک کردن برش های میوه به، با ضخامت های ۰.۳، ۰.۵ و ۰.۷ میلی متر، در دماهای ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد مدلسازی و شرایط برای رسیدن به حداکثر ضریب نفوذ و کاهش زمان خشک کردن، به کمک روش شناسی سطح پاسخ بهینه یابی گردید.

یافته ها: نتایج نشان داد که مدل میدلی دارای کمترین مقادیر RMSE، MRPD و χ^2 و بالاترین مقدار R^2 بود و اعمال دمای ۷۱ درجه سانتی گراد در ضخامت ۰.۷ میلی متر منجر به ایجاد بیشترین ضریب نفوذ و کمترین زمان خشک کردن گردید.

نتیجه گیری: روش خشک کردن جریان هوای داغ برای قطعات میوه به، خروج رطوبت را از میوه تسهیل نمود. بطور کلی این روش یکی از روش های مناسب جهت خشک کردن میوه به بود.

واژه های کلیدی: خشک کردن لایه نازک، ضریب نفوذ موثر، مدل سازی ریاضی، میوه به

مقدمه

میوه به^۱ از تیره وردسانان^۲ و زیر تیره سیبان^۳ می‌باشد. میوه به دارای گوشت خشک و کرکی است که طعمی ترش و تقریباً گس دارد. میوه‌های بزرگ (۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر قطر) با ابعاد متغیر، شکل نامتقارن و بوی مشخص می‌باشد. به طور کلی، میوه به طور خام برای مصرف مناسب نیست. مهمترین استفاده از این میوه در تولید مربا و ژله می‌باشد (Silva et al., 2004).

خشک کردن به عنوان یک روش نگهداری با کاهش محتوای آب و فعالیت آب میوه‌ها و سبزیجات که به وسیله هوای گرم انجام می‌شود شناخته شده و منجر به کاهش تغییرات بیوشیمیایی، شیمیایی و میکروبی محصولات می‌گردد. هدف اصلی خشک کردن تولیدات کشاورزی، کاهش محتوای رطوبت به سطحی ایمن برای رسیدن به حداکثر ماندگاری^۴ می‌باشد. کاهش هزینه‌های بسته‌بندی و حمل و نقل از دیگر اهداف خشک کردن بوده که در نتیجه کاهش وزن و حجم محصول به دست می‌آید (Doymaz & Ismail, 2011).

چندین روش خشک کردن برای کاهش رطوبت از وارسته وسیعی از محصولات غذایی، شامل میوه‌ها و سبزیجات مورد استفاده است. خشک کردن آفتابی عمومی‌ترین و قدیمی‌ترین روش مورد استفاده برای تولیدات کشاورزی می‌باشد که به خاطر استفاده از خورشید به عنوان منبع انرژی، روشی ارزان و مقرون به صرفه تلقی می‌شود. اما به دلیل کند و وقت گیر بودن فرآیند، قرار گرفتن محصول در معرض آلودگی‌های محیطی، عدم ثبات شرایط آب و هوایی (ابری و بارانی شدن هوا)، هجوم حشرات و نیاز به نیروی کارگری بالا، روشی غیر کارآمد می‌باشد (Kostaropoulos & Saravacos, 1995).

به منظور بهبود کیفیت تولیدات، می‌بایست تکنیک خشک کردن آفتابی با روش‌های صنعتی خشک کردن، مانند خشک کردن خورشیدی و خشک کردن به وسیله هوای گرم جایگزین شود (Sacilik et al., 2006). از طرفی به خاطر اینکه محصولات کشاورزی معمولاً با محتوای رطوبت بالایی برداشت می‌شوند، خشک کردن یکی از بهترین روش‌های مقدماتی برای افزایش عمر

بهینه سازی ضرب نفوذ موثر رطوبت و سینتیک خشک کردن برش‌های میوه به

انبارداری محصولات بوده و در نتیجه خشک کردن نامناسب کیفیت محصولات را به شدت کاهش می‌دهد (Akpınar et al., 2004).

خشک کردن، فرآیندی متشکل از انتقال جرم و حرارت بین مواد و مواد تشکیل دهنده فرآورده‌ها است. مدل‌های بسیاری برای توصیف فرآیند خشک کردن استفاده می‌شوند که در میان آنها مدل‌های نیمه تجربی و تجربی خشک کردن لایه نازک، وسیع‌ترین دامنه کاربرد را دارا هستند (Duc et al., 2011). خشک کردن ترکیبات مواد غذایی مانند میوه‌ها و سبزی‌ها یا غذاهای عملگرا^۵، به تکنیک‌های خاصی جهت جلوگیری از هم‌پاشیدگی دمایی و اکسیداسیون ترکیبات موثره و یا جلوگیری از واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی نیاز دارد. بافت، رنگ و آروما مهمترین خصوصیات کیفی تولیدات غذایی هستند که در بازار پسندی محصولات تولید شده اهمیت دارند. در طی فرآیند مواد غذایی، با توجه به محتوای رطوبت موجود در بافت محصول، ممکن است این خصوصیات کاهش پیدا کند و یا دگرگون شود، خصوصاً در مواد غذایی خشک شده (Baini & Langrish, 2008). مطالعه سینتیک خشک کردن میوه‌ها برای رسیدن به اطلاعاتی درباره زمان مورد نیاز برای خشک کردن و انتخاب مدل مناسب بسیار ضروری می‌باشد. بررسی سینتیک خشک کردن، بوسیله عواملی مانند دما و رطوبت نسبی هوا و همچنین محتوای رطوبت میوه تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Zomorodian & Moradi, 2010).

با توجه به مطالعات انجام شده، با تجزیه یک فرآیند ترکیبی مانند خشک کردن، به عناصر اصلی آن، به یک سیستم ساده‌تر تبدیل شده که می‌تواند مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. بنابراین اندازه‌گیری خصوصیات خشک کردن مانند پارامترهای موثر در سینتیک خشک کردن لایه نازک می‌تواند در ایجاد دور نمایی مناسب برای طراحی تجهیزات صنعتی خشک کردن مورد استفاده قرار گیرد (Marquez et al., 2006). از این رو هدف از مطالعه پیش رو مدلسازی فرآیند خشک کردن برش‌های لایه نازک میوه به توسط مدل‌های ریاضی و بهینه سازی این فرآیند به منظور رسیدن به حداکثر مقدار ضرب نفوذ، به عنوان تابعی

¹ Cydonia Obloga

² Rosaceae

³ Pomoidae

⁴ Shelf Life

⁵ Functional Food

نسخه ۱۰ انجام گرفت و بهترین مدل براساس بالاترین مقدار ضریب تبیین^۳ (R^2) و کمترین مقادیر برای میانگین نسبی درصد انحراف^۴ (MRPD)، مجذور میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE) و مربع کای کاهش یافته^۶ (χ^2) انتخاب شد.

$$MRPD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|MR_P - MR_E|}{MR_E} \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_P - MR_E)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_P - MR_E)^2}{N - Z} \quad (4)$$

که MR_P نسبت رطوبت پیش بینی شده، MR_E نسبت رطوبت آزمایشی، N تعداد داده‌ها و Z تعداد ضرایب ثابت در هر مدل می‌باشد.

- محاسبه ضریب نفوذ موثر^۷:

برای محاسبه ضریب نفوذ موثر از قانون دوم فیک^۸ استفاده شد (Hamdami et al, 2004).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (5)$$

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان، x مشخصه فضایی^۹ و D_{eff} ضریب نفوذ موثر (m^2/s) می‌باشد. قانون دوم فیک اغلب برای توصیف پدیده نفوذ رطوبت به کار می‌رود (Babalıs & Belessiotis, 2004). حل معادله فیک برای یک تیغه بصورت زیر می‌باشد:

$$MR = \frac{(x_t - x_e)}{(x_0 - x_e)} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{L^2}\right) \quad (6)$$

که در آن D_{eff} ضریب نفوذ موثر (m^2/s)، L نیمی از ضخامت تیغه (m) و t زمان خشک کردن بر حسب دقیقه می‌باشد.

با رابطه مستقیم با تبخیر رطوبت، و حداقل زمان مورد نیاز برای خشک کردن بود.

مواد و روش‌ها - آزمون خشک کردن

ابتدا رطوبت اولیه نمونه توسط آون گذاری در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت، اندازه گیری شد (Goyal et al., 2007).

برش های میوه در ضخامت‌های ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر، به وسیله چاقوی تیز، تهیه و برای ایجاد برش‌هایی با مساحت سطح ثابت از یک قالب استیل دایره‌ای شکل با قطر ۴/۵ سانتی‌متر استفاده شد. برش‌های تهیه شده بدون هیچ پیش‌تیماری، بصورت لایه نازک، درون پلیت‌های شیشه‌ای قرار گرفته و در نهایت درون آون جابجایی هوای داغ (JEIO TECH, Type F-02G) در سه دمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در فاصله‌های زمانی مختلف پلیت‌ها خارج شده و توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ± 0.01 گرم (A&D company, N92, D0001, made in Japan)، تا رسیدن به رطوبت تعادلی ۲ درصد، توزین شدند (۳ مرتبه).

- محاسبه نسبت رطوبت^۱:

این پارامتر، مقدار رطوبت برش‌های میوه را در هر لحظه نسبت به رطوبت اولیه و تعادلی بیان کرده و از رابطه زیر بدست می‌آید (Ozdemir et al., 2010):

$$MR = \frac{M(t) - M(e)}{M_0 - M(e)} \quad (1)$$

که در آن MR ، $M(t)$ ، M_0 و $M(e)$ به ترتیب نسبت رطوبت، رطوبت در مبنای خشک در لحظه t ، رطوبت تعادلی در مبنای خشک و رطوبت اولیه در مبنای خشک $\left(\frac{kg_{water}}{kg_{d.m}}\right)$ می‌باشد.

- مدل سازی ریاضی^۲:

ده مدل مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. مدل سازی ریاضی مورد نظر توسط نرم افزار Sigma plot

¹ Moisture Ratio ² Mathematical Modeling

⁴ Mean Relative Percent Deviation

⁷ Effective Moisture Diffusivity

³ Coefficient of Determination

⁵ Root Mean Squares Error ⁶ Reduced chi - square

⁸ Fic second's low

⁹ Spatial Coordinate

بهبود سازی ضرب نفوذ موثر رطوبت و سینتیک خشک کردن برش‌های میوه به

- تجزیه و تحلیل آماری

روش شناسی سطح پاسخ (RSM)، با استفاده از یک طرح چرخش پذیر مرکب مرکزی برای ارزیابی عوامل تحت بررسی، دمای خشک کردن (x_1) و ضخامت برش (x_2) بر روی ضرب نفوذ موثر رطوبت (m^2/s) و زمان خشک کردن (دقیقه)، به عنوان پاسخ‌های آزمایش، مورد استفاده قرار گرفت. توابع پاسخ (Y) در مورد پارامترهای اندازه گیری شده با استفاده از یک چند جمله‌ای ساده (معادله ۷) و چند جمله‌ای ساده پیشرفته (معادله ۸) مورد بررسی قرار گرفتند.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (7)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1 \cdot x_2 \quad (8)$$

آنالیز آماری توسط نرم افزار Design Expert نسخه 6.0.2 صورت گرفت.

یافته‌ها

با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مطالعه در طی فرآیند خشک کردن، با استفاده از رابطه شماره ۲ و سپس برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت - زمان، به وسیله مدل‌های مذکور، نتایج برای هر مدل مورد بررسی قرار گرفت. بهترین مدل می‌بایست دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین (R^2) و حداقل مقادیر RMSE، MRPD و χ^2 می‌بود. نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، مطابق با شرایط ذکر شده، در مورد فرآیند خشک کردن برش‌های لایه نازک میوه به با ضخامت‌های ۳ تا ۷ میلی‌متر، در دمای ۶۰ - ۸۰ درجه سانتی‌گراد، مدل میدلی بود.

میانگین مقادیر مربوط به پارامترهای R^2 ، RMSE، MRPD و χ^2 برای تمامی ده مدل مورد بررسی در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۱- جدول معادلات ریاضی

منابع	مدل	معادله	
Sarsavadia et al (1999)	MR=exp(-k.t)	نیوتنی ^۱	۱
Sun and Woods (1994)	MR=exp(-k.t^n)	پیچ ^۲	۲
Yaldiz et al. (2001)	MR=exp(-(k.t)^n)	پیچ اصلاح شده ^۳	۳
Yagcioglu et al. (1999)	MR=a.exp(-k.t)	هندرسون و پابیس ^۴	۴
Yaldiz and Ertekin (2001)	MR=a.exp(-k.t)+c	لگاریتمی ^۵	۵
Rahman et al. (1998)	MR=a.exp(-k.t)+b.exp(-h.t)	دو جمله‌ای ^۶	۶
Sharaf-Eldeen et al (1980)	MR=a.exp(-k.t)+b.exp(-h.t)	دو جمله‌ای نمایی ^۷	۷
Verma et al. (1985)	MR=a.exp(-k.t)+b.exp(-g.t)+c.exp(-h.t)	هندرسون و پابیس اصلاح شده ^۸	۸
Kassem (1998)	MR=a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-k.b.t)	تقریب نفوذ ^۹	۹
Midilli et al (2002)	MR=a.exp(-k.t^n)+b.t	میدلی ^{۱۰}	۱۰

جدول ۲- میانگین مقادیر R^2 و MRPD و RMSE و χ^2 برای مدل‌های مورد مطالعه.

مدل	R^2	χ^2	RMSE	RMSE
نیوتنی	۰/۹۸۰۱۶۷	۰/۰۰۱۶۰۱	۹۹/۰۳۴۴۶	۰/۰۳۳۸۷۲
پیچ	۰/۹۹۶۷۵	۰/۰۰۰۲۸۸	۴۹/۵۲۵۲۲	۰/۰۱۵۵۱
پیچ اصلاح شده	۰/۹۹۶۷۵	۰/۰۰۰۲۸۸	۴۹/۵۲۴۴۵	۰/۰۱۵۳۸۶
هندرسون و پابیس	۰/۹۸۲۶	۰/۰۰۱۶۰۷	۱۰۵/۲۲۶۱	۰/۰۳۴۸۵۶
لگاریتمی	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۰۲۰۴	۳۸/۸۰۷۵۱	۰/۲۹۹۱۹۶
دو جمله‌ای	۰/۹۹۷۱۵	۰/۰۰۰۲۶۴	۳۹/۰۱۷۸۹	۰/۰۱۳۳۲۶
دو جمله‌ای نمایی	۰/۹۹۵۱۸۳	۰/۰۰۰۴۴۲	۵۹/۳۵۳۸۲	۰/۰۱۵۷۲۸
هندرسون و پابیس اصلاح شده	۰/۹۹۶۸۳۳	۰/۰۰۰۲۶۳	۴۱/۱۹۱۸۳	۰/۰۱۲۳۳۳
تقریب نفوذ	۰/۹۹۸۳۱۷	۰/۰۰۰۱۷۴	۲۴/۷۷۳۹۸	۰/۰۱۱۶۶۱
میدلی	۰/۹۹۹۱۱۷	۸/۹×۱۰ ^{-۵}	۱۷/۴۰۵۶۴	۰/۰۰۹۶۲۶

¹ Newton ² Page ³ Modified Page ⁴ Henderson and Pabis ⁵ Logarithmic ⁶ Two Term ⁷ Two Term Exponential ⁸ Modified Henderson and Pabis ⁹ Diffusion Approximation ¹⁰ Midli

انتخاب مدل

مدل چند جمله ای ساده در مورد ضریب نفوذ موثر رطوبت و مدل چند جمله ای درجه دوم ساده در مورد زمان خشک شدن، در برازش داده ها نسبت به سایر مدل های پیشنهادی، اختلاف معنی داری در سطح ۰/۰۱ داشتند (جدول ۴). با توجه به جدول ۵ و مقادیر بالای R^2 شاهد برازش مناسب داده ها توسط مدل های انتخابی بودیم. مقدار ضریب تبیین برای ضریب نفوذ موثر رطوبت و زمان خشک کردن به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۹۳ بود. ضریب تغییرات بسیار پایین نیز دلیل دیگری بر این ادعاست که مدل ها، برازش مناسبی از داده ها داشتند. پارامترهای موثر در مدل های بدست آمده با توجه به آنالیز واریانس انجام شده و جدول ANOVA انتخاب و در مدل نهایی جایگذاری شدند.

مقادیر پارامترهای R^2 ، RMSE، MRPD و χ^2 نشان دهنده برازش مناسب داده ها به وسیله مدل میدلی بود. با توجه به اینکه ده مدل مورد استفاده به منظور مدلسازی فرآیند خشک کردن لایه نازک محصولات به کار می روند، مقادیر ضریب تبیین (R^2) مدل ها اختلاف چندانی با یکدیگر نداشتند و مقادیر بالای این پارامتر برای مدل های مورد بررسی نشان از برازش خوب داده ها به وسیله این ده مدل می باشد اما بیشترین اختلاف میان مدل میدلی و سایر مدل ها در مورد پارامتر مربع کای کاهش یافته (χ^2) و میانگین نسبی درصد انحراف (MRPD) مشاهده شد. پس از انتخاب مدل میدلی، مقادیر ثابت موجود در مدل میدلی برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه، محاسبه و در جدول ۳ ارائه شد.

جدول ۳- پارامترهای ثابت مدل میدلی* در تیمارهای آزمایش

پارامترهای ثابت				ضخامت	دما
a	b	k	n	(mm)	(°C)
۰/۹۹۵۹	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۶۸	۳	
۱/۰۰۱۶	-۹/۴۰×۱۰ ^{-۵}	-۰/۰۰۷۹	۱/۰۴۳۳	۵	۶۰
۱/۰۰۲۶	-۳/۰۷×۱۰ ^{-۵}	۰/۰۰۱۷	۱/۲۲۸۴	۷	
۰/۹۹۵۵	-۰/۰۰۰۴	-۰/۰۰۸۵	۱/۲۲۶۶	۳	
۱/۰۰۰۱	-۵/۵۵×۱۰ ^{-۵}	۰/۰۰۵۸	۱/۱۵۷۹	۵	۷۰
۰/۹۹۴۲	-۲/۲۰×۱۰ ^{-۶}	۰/۰۰۲۷	۱/۲۵۰۳	۷	
۱/۰۰۰۳	-۰/۰۲۶۴	-۰/۰۰۵۱	۱/۱۴۲۲	۳	
۰/۹۹۱۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۶۳	۱/۱۵۲۸	۵	۸۰
۰/۹۹۳۴	-۰/۰۰۰۲	-۰/۰۰۴۳	۱/۱۷۹۱	۷	

* midli equation: $MR=a.exp(-k.t^n)+b.t$

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) مدل های مختلف برای متغیرهای خشک کردن.

ضریب نفوذ موثر (m^2/s)		زمان (دقیقه)		
مجموع مربعات	سطح احتمال	مجموع مربعات	سطح احتمال	
$۲/۸۲ \times ۱۰^{-۱۴}$		۹۴۴۵۳۴/۳		عرض از مبدا
$۲/۱۴ \times ۱۰^{-۱۵}$	۰/۰۰۰۵	۲۵۸۶۳۹/۴	<۰/۰۰۰۱	مدل خطی
$۱/۲۸ \times ۱۰^{-۱۶}$	۰/۱۰۱۸	۲۴۸۰۶/۲۵	۰/۰۲۱	چندجمله ای
$۱/۱۳ \times ۱۰^{-۱۶}$	۰/۲۲۹۱	۱۱۱۷/۰۴۵	۰/۲۸۲۵	چندجمله ای درجه دوم
$۱/۲۲ \times ۱۰^{-۱۸}$	۰/۹۸۷	۶۹۱/۲۰۳۷	۰/۴۵۶۴	چندجمله ای درجه سوم
$۱/۳۹ \times ۱۰^{-۱۶}$		۱۰۰۶/۲۵		باقیمانده
$۳/۰۷ \times ۱۰^{-۱۴}$		۱۲۳۰۷۹۴		کل

بهبود سازی ضرب نفوذ موثر رطوبت و سینتیک خشک کردن برش‌های میوه به

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) مدل‌های پیشنهادی سطح پاسخ و نتایج آزمون ضعف برازش برای متغیرهای خشک کردن

ضرب نفوذ موثر (m ² /s)		زمان (دقیقه)		ضرب نفوذ موثر (m ² /s)		زمان (دقیقه)		
مجموع مربعات	سطح احتمال	درجه آزادی	ضرب نفوذ موثر	مجموع مربعات	سطح احتمال	درجه آزادی	ضرب نفوذ موثر	
-7/9×10 ⁻⁸	2/14×10 ⁻¹⁰	0/0005	3	305889/6	0/0002	2	-	عرض از مبدا
1/19×10 ⁻⁹	8/5×10 ⁻¹⁶	0/0029	1	450667	0/0075	1	-	A
7/31×10 ⁻⁹	1/28×10 ⁻¹⁰	0/0008	1	3747917	<0/0001	1	-	B
-	-	-	1	3/937	0/282	-	-	A×B
-	3/81×10 ⁻¹⁶	-	7	22851/33	-	8	-	باقیمانده
-	3×10 ⁻¹⁶	0/5138	5	22834/66	0/12	6	-	فقدان برازش
-	8/14×10 ⁻¹⁷	-	2	167	-	2	-	خطای خالص
-	2/52×10 ⁻¹⁰	-	10	328740/9	-	10	-	مجموع مربعات کل
0/8485	-	-	0/93	-	-	-	-	ضرب تبیین
0/8107	-	-	0/90	-	-	-	-	ضرب تبیین اصلاح شده
3/5	-	-	6/84	-	-	-	-	ضرب تغییرات

- بهینه سازی فرآیند خشک کردن

با توجه به جدول تجزیه واریانس، پارامترهای خطی درجه حرارت و ضخامت خشک کردن، اثر معنی داری در مقدار ضرب نفوذ موثر رطوبت داشتند و در نتیجه شکل نهایی مدل به صورت زیر قابل تعریف می باشد:

$$Y = -6.9 \times 10^{-8} + 1.9 \times 10^{-9} X_1 + 7.31 \times 10^{-9} X_2 \quad (8)$$

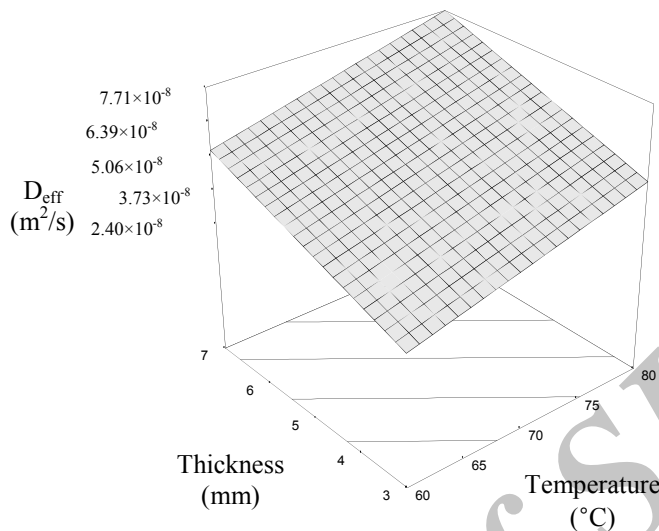
مطابق شکل ۱، در تمامی ضخامت‌های مورد مطالعه، با افزایش دما از ۶۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار ضرب نفوذ افزایش یافت. همچنین با افزایش ضخامت در تمامی دماهای مورد مطالعه نیز ضرب نفوذ رطوبت دارای روند افزایشی بود. افزایش دما باعث افزایش انرژی وارد شده به بافت و در نتیجه افزایش تبخیر آب و افزایش ضخامت نیز با توجه به رابطه مستقیم میان ضرب نفوذ و ضخامت در معادله ۷، اثری مشابه با افزایش دما داشت (Midilli et al., 2002).

نتایج نشان داد که پارامترهای خطی درجه حرارت خشک کردن و ضخامت تیغه‌ها و همچنین اثر متقابل دمای خشک کردن و ضخامت تیغه‌ها، دارای اثر معنی داری بر زمان خشک شدن بودند و در نتیجه شکل نهایی مدل به صورت زیر ارائه گردید:

$$Y = -2097.73 + 37.74X_1 + 224.37X_2 - 3.94X_1.X_2 \quad (9)$$

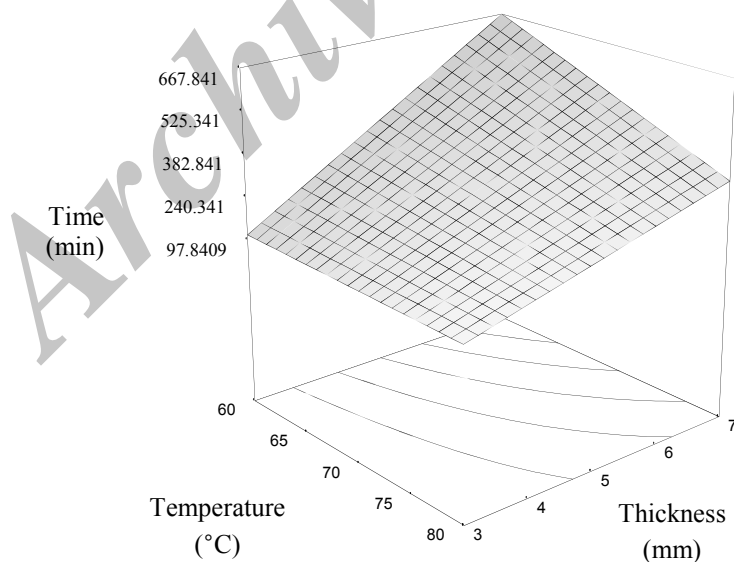
شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت از ۳ به ۷ میلی‌متر زمان خشک کردن دارای روند افزایشی بود که این افزایش در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت به دماهای بالاتر از شدت بیشتری برخوردار بود. به نظر می‌رسد کم بودن انرژی وارد شده در فرآیند خشک کردن از طرفی و همچنین افزایش ضخامت باعث بروز چنین اختلافی بوده است. تغییرات دما نیز نشان داد که با افزایش دما از ۶۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد در ضخامت ۳ میلی‌متر، تغییر چندانی در زمان خشک کردن ایجاد نکرد هرچند که کاهش ناچیزی اتفاق افتاد. کم بودن ضخامت در دماهای مورد مطالعه باعث می‌شد که فرآیند خشک کردن وابستگی چندانی به تغییرات دما نداشته باشد. اما با افزایش ضخامت در تمامی دماهای مورد مطالعه مشاهده شد که زمان مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت تعادلی نهایی افزایش می‌یابد که این افزایش در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد با شیب بیشتری رخ داد. دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دو دمای ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد، انرژی کمتری به مولکول‌های آب موجود در بافت وارد نموده و در نتیجه

باعث می‌شد افزایش ضخامت، در کنار دمای پایین‌تر طولانی‌تر شدن فرآیند خشک شدن شود. (۶۰°C) نسبت به سایر دماها (۷۰ و ۸۰°C)، منجر به



شکل ۱- اثر متقابل دما و ضخامت تیغه‌ها بر تغییرات ضریب نفوذ موثر رطوبت.

۵۵



شکل ۲- اثر متقابل دما و ضخامت تیغه‌ها بر تغییرات ضریب نفوذ موثر رطوبت.

بحث

در ادامه بررسی ها در زمینه مدل سازی ریاضی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی تحقیقات متعددی صورت پذیرفته که در ادامه به برخی از آن ها اشاره شده است. در برخی تحقیقات مشخص شد که مدل دو جمله ای به عنوان مدل برگزیده فرآیند خشک کردن لایه نازک گندم در دمای ۴۰ - ۶۰ و مدل تقریب نفوذ نیز در فرآیند خشک کردن گوجه فرنگی به وسیله خشک کن خورشیدی و خشک کردن آفتابی انتخاب شد (Mohapatra & Srinivasa Rao, 2005; Sacilik *et al.*, 2006). داک و همکاران در سال ۲۰۱۱ بر روی خشک کردن کلزا در دماهای ۲۰-۷۰ مطالعه نمودند، بیان کردند که مدل پیچ بهترین برازش را از فرآیند خشک کردن ارائه می نمود (Duc *et al.*, 2011). مدل سازی خشک کردن فلفل قرمز در دماهای ۵۰ تا ۶۵ درجه سانتی گراد مدل پیچ را به عنوان مدل برتر نشان داد (Kaleemullah & Kailappan, 2006) و مدلسازی انجام شده بر روی لایه نازک برش های پیاز نشان داد که مدل پیچ بهترین برازش از فرآیند خشک کردن در دماهای ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی گراد، با استفاده از پرتو افکنی مادون قرمز را ارائه می نماید (Sharma *et al.*, 2005). مطالعه انجام شده بر روی خشک کردن لایه نازک سیب طلایی در دماهای ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد با جریان هوای ۱-۳ متر بر ثانیه نشان داد که مدل میدلی بهترین مدل بود (Menges & Ertekin, 2006). اما مطالعه وانگ و همکاران بر روی خشک کردن سیب به وسیله امواج ماکروویو با و بدون پیش فرآوری به وسیله هوای گرم نشان داد که مدل پیچ برازش مناسبی از فرآیند خشک کردن داشت (Wang *et al.*, 2007). همچنین خشک کردن برش های زرد آلو در دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه مدل لگاریتمی را به عنوان مدل منتخب معرفی نمود (Togrul & Pehlivan, 2004). و در فرآیند خشک کردن برش های آلو برقانی مدل لگاریتمی انتخاب شد (Goyal *et al.*, 2007). اما زرد آلو خشک شده در خشک کردن به روش آفتابی و زرد آلو خشک شده پیش فرآوری شده به وسیله گوگرد، به ترتیب مدل های تقریب نفوذ و هندرسون و پاییس را ارائه نمودند (Togrul & Pehlivan, 2004). با مقایسه نتایج ارائه شده به وسیله محققان، در مورد مدلسازی محصولات مشابه با

بهبهینه سازی ضریب نفوذ موثر رطوبت و سینتیک خشک کردن برش های میوه به

اعمال فرآیندهای مختلف می توان گفت که خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی به نوع فرایند مقدماتی مثل بلانچینگ (آنزیم بری)، دامنه دمایی و نوع روش و روند خشک کردن وابسته است (Lee & Kim, 2009). در ادامه افضل و همکاران جهت خشک کردن نمونه های سیب زمینی از ضخامت ۲/۵، ۶/۵ و ۱۰/۵ میلی متر و دماهای ۲۳/۵ تا ۵۵/۳ درجه سانتی گراد استفاده کرده بهترین برازش را برای مدل خطی چند گانه گام به گام گزارش کردند و مقادیر ضریب نفوذ را $0.59 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ تا 17.32×10^{-1} نشان دادند (Afzal & Abe, 1998). همچنین مشکانی و همکاران در سال ۱۳۹۱، با بررسی روند خشک کردن اسلایس های کدوی سبز به روش جریان هوای داغ و مدل سازی ریاضی این روش به کمک ۱۰ مدل سینتیکی خشک کردن، نشان دادند که مدل میدلی بهترین مدل جهت برازش فرآیند خشک کردن قطعات کدوی سبز بود. آن ها نیز از ضخامت های ۳ تا ۷ میلی متر و دماهای ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد استفاده نمودند (مشکانی و همکاران، ۱۳۹۱). در بحث بهینه سازی فرآیند خشک کردن برش های میوه به در ضخامت های ۳، ۵ و ۷ میلی متر، در دماهای ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد به منظور رسیدن به حداکثر ضریب نفوذ موثر رطوبت و کمترین زمان مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت تعادلی، حاکی از این بود که اعمال دمای ۷۱ درجه سانتی گراد در ضخامت ۷ میلی متر باعث رسیدن به ضریب نفوذ 6.74×10^{-8} در زمان ۲۰۸ دقیقه گردید. در حالیکه درجه مطلوبیت این شرایط حدوداً ۷۷٪ گزارش شد. توکلی و همکاران در سال ۱۳۸۷ به بهینه سازی اثر خشک کردن پسته در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد و شعاع بستر ۱، ۳ و ۵ سانتی متر پرداخته و نشان دادند که بیشترین ضریب نفوذ در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد و ضخامت ۰/۶۳ متر، معادل $2/105 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ می باشد. همچنین زمان بهینه خشک کردن را با توجه به مطلوب بودن فرایند از جهت صنعتی دمای ۷۰ درجه سانتی گراد و ضخامت ۵ سانتی متر نشان دادند (Tavakoli *et al.*, 2008).

نتیجه گیری

خشک کردن یکی از قدیمی ترین روش های نگهداری

Duc, L. A., Han, J. W. & Keum, D. H. (2011). Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Journal of Stored Products Research*, 47:32-38.

Goyal, R. K., Manikantan, M. R. & Ilyas, S. M. (2007). Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, 79:176-180.

Hamdami, N., Monteau, J. Y. & Bail, A. L. (2004). Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures. Part 2: Evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data, *Journal of Food Engineering*, 62, 385:393.

Kaleemullah, S. & Kailappan, R. (2006). Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies. *Journal of Food Engineering*, 76:531-537.

Kostaropoulos, A. E. & Saravacos, G. D. (1995). Microwavepre-treatment for sun-dried raisins. *Journal of Food Science*, 60: 344-347.

Lee, J. H. & Kim, H. J. (2009). Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanussativus* L.) slices. *LWT - Food Science and Technology*, 42: 180-186.

Marquez, C. A. & DeMichelis, S. A. G. (2006). Drying kinetics of rose hip fruits (*Rosa eglanteria* L.), *Journal of Food Engineering*, 77, 566:575.

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 singlelayer drying, *Drying Technology* 20, 1503:1510.

Mohapatra, D. & SrinivasaRao, P. (2005). A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, 66:513-518.

Ozdemir, M. B., Menlik, T., & Kirmaci, V. (2010). Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network, *Expert Systems with Applications*, 9, 1:10.

Sacilik, K., Elicin, A. K. & Unal, G. (2006). Drying kinetics of uryaniplum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, 76:362-368.

Sacilik, K., Keskin, R. & Elicin, A. K. (2006). Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layerorganic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73:231-238.

Sharma, G.P., Verma, R.C., & Pathare, P. (2005). Mathematical modeling of infrared

محصولات کشاورزی است و همواره از روش‌های متعددی می‌توان در خشک کردن مواد غذایی استفاده نمود که یکی از این روش‌ها استفاده از جریان هوای داغ می‌باشد. هدف از این تحقیق رو مدلسازی فرآیند خشک کردن برش‌های لایه نازک میوه به توسط مدل‌های ریاضی و بهینه سازی این فرآیند به منظور رسیدن به حداکثر مقدار ضریب نفوذ، به عنوان تابعی با رابطه مستقیم با تبخیر رطوبت و حداقل زمان مورد نیاز برای خشک کردن بود. به همین منظور، فرآیند خشک کردن برش‌های میوه به با جریان هوای داغ و با ضخامت‌های ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر، در دماهای ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد مدلسازی و شرایط برای رسیدن به حداکثر ضریب نفوذ و کاهش زمان خشک کردن، به کمک روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با توجه به نتایج حاصله در بخش مدل سازی ریاضی فرآیند خشک کردن میوه به مشخص گردید که مدل میلی دارای کمترین مقادیر $RMSE$ ، $MRPD$ و χ^2 و بالاترین مقدار R^2 بود و پس از بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن و اعمال دمای ۷۱ درجه سانتی‌گراد در ضخامت ۷ میلی‌متر باعث رسیدن به ضریب نفوذ $6/74 \times 10^{-8}$ در زمان ۲۰۸ دقیقه گردید.

منابع

مشکانی، س. م.، پورفلاح، ز.، توکلی پور، ح.، محمدی، م. و نهاردانی، م. (۱۳۹۱). بررسی سینتیک خشک کردن لایه ای نازک کدوی سبز با فرآیند جابجایی هوای داغ. *مجله علوم و فناوری غذایی*، سال چهارم، شماره سوم، صفحات ۷۵-۸۲.

Afzal, T. M. & Abe, T. (1998). Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering*, 37: 353-365

Babalıs, S. J. & Belessiotıs, V. G. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering* 65:449-458.

Baini, R. & Langrish, T. A. G. (2008). An assessment of the mechanisms for diffusion in the drying of bananas, *Journal of Food Engineering*, 85, 201:215.

Doymaz, I. & Ismail, O. (2011). Drying characteristics of sweet cherry. *Food and bio products processing*, 89:31-38.

radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* 71: 282–286.

Silva, B. M., Andrade, P. B., Valentao, P., Ferreres, F., Seabra, M. R. & Ferreira, M. A. (2004). Quince (*Cydonia Oblonga* Miller) fruit and jam: Antioxidant Activity. *J. Agric. Food Chem*, 52: 4705-4712.

Tavakoli pour, H., KalbasiAshtari, A. & Basiri, A. (2008). Effect of drying parameters on quality indicators pistachio Damghan and effective diffusion factors in determine the optimum process conditions. *Journal of Food Science*. 5:4. [in Persian].

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*, 65:413–425.

Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X. & Hu, X. (2007). Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering*, 80:536–544.

Zomorodian, A. & Moradi, M. (2010). Mathematical Modeling of Forced Convection Thin Layer Solar Drying for *Cuminumcyminum*. *J. Agr. Sci. Tech.* Vol. 12: 401-408.

Archive of SID