

مدل سازی ریاضی فرایند آبرزدایی اسمزی و خشک شدن با هوای داغ برای قطعات پاپایا

علیرضا یوسفی^{۱*}، الناز سیوانی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بناب، بناب، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۲۶)

چکیده

در این تحقیق، آزمایش‌های خشک کردن با هوای داغ بر روی قطعات پاپایا در سه سطح ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر و سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس در یک آون جابجایی انجام شد. سرعت، رطوبت نسبی و مطلق هوای داغ استفاده شده به ترتیب 1 ± 0.1 متر بر ثانیه، ۳۰ درصد و 0.76 ± 0.02 گرم آب بر کیلوگرم هوای داغ بود. روش آبرگیری اسمزی در محلول اسمزی ۵۰ درصد ساکارز برای قطعات پاپایا با ضخامت ۵ میلی‌متر انجام گرفت. پارامترهای اسمزی میزان کاهش آب (WL)، میزان جذب ماده جامد (SG) و میزان کاهش وزن (WR) با افزایش زمان غوطه‌وری افزایش یافت. فرایند آبرگیری اسمزی قطعات پاپایا با مدل‌های پلگ، آزورا و ویبول و فرایند خشک کردن با هوای داغ با مدل ریاضی معروف لایه نازک مدل سازی شدند. که از بین این مدل‌ها، مدل‌های پلگ و آزورا بر اساس R^2 بالاتر (۰.۹۹۲) و RMSE پایین‌تر (۰.۱۷۹) دقت بیشتری در تخمین پارامتر SG آبرگیری اسمزی داشتند و همچنین مدل‌های دوجمله‌ای و دوجمله‌ای نمایی نسبت به سایر مدل‌های پیشنهاد شده با بالاترین ضریب تبیین به عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی خشک شدن لایه نازک پاپایا با هوای داغ ارائه گردید. افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس سبب افزایش D_{eff} از $2/28 \times 10^{-10}$ به $7/58 \times 10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه گردید. مقدار انرژی فعالسازی برای قطعات پاپایا برابر ۴۸،۶۱ کیلوژول بر مول به دست آمد. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که دماهای خشک کردن اثر معنی‌داری بر پارامترهای رنگ سنجی نسبت به نمونه شاهد داشتند و همچنین اثر دما بر افزایش میزان چروکیدگی قطعات معنی‌دار بود ($p < 0.05$).

کلید واژگان: پاپایا، مدل سازی ریاضی، محلول اسمزی، آون جابجایی، خشک کردن لایه نازک

* مسئول مکاتبات: a_yousefi@bonabu.ac.ir

۱- مقدمه

تاریخچه تولید فرآورده‌های خشک در ایران به دوران بسیار قدیم بازمی‌گردد، با گذشت سالیان طولانی در بخش فرآوری این محصولات، تغییرات عمده‌ای پدیدار نشده و هنوز هم به طور غالب در ایران از روش‌های سنتی (آفتابی) استفاده می‌گردد. خشک‌کردن آفتابی دارای نارسایی‌های متعددی است که عمده مشکلات آن مواردی مانند قرار گرفتن محصولات در محیطی که بر روی پارامترهای آن کنترلی وجود ندارد، آلودگی محصول و آسیب‌های وارده به آن به علت کند بودن فرایند، را در بر می‌گیرد، در مقابل روش صنعتی آن با هزینه کمتری صورت می‌پذیرد، فرآورده‌های تولیدی در این روش از لحاظ بهداشتی و اقتصادی مطلوب نبوده و قادر به برآورده کردن شاخص‌های کیفی مورد انتظار نمی‌باشد [۱].

پاپایا یا خربزه درختی میوه‌ای شیرین است که دارای ویژگی‌هایی شبیه خربزه و طالبی می‌باشد. این میوه غنی از ویتامین ث و بتاکریپتوزانتین^۱ می‌باشد که این ترکیبات در حفظ سلامت نقش مهمی دارند [۲]. منشاء پاپایا احتمالاً مناطق جنوبی مکزیک و کاستاریکا می‌باشد و به طور گسترده‌ای در برزیل، نیجریه، هند، اندونزی، استرالیا، آفریقای جنوبی و در تمام مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری تولید می‌شود [۳]. بر اساس آمار (FAO)^۲، در سال ۲۰۱۳ حدود ۱۲/۴ میلیون تن پاپایا در جهان تولید شده است که حدود ۵۰۰ تن آن در ایران تولید شده است. در ایران پاپایا در شهر باهوکلات استان سیستان و بلوچستان پرورش داده می‌شود [۲]. زیر پوست ساقه، در برگ‌ها و در پوست میوه‌های نارس عروقی وجود دارد که شیره سفید رنگی به نام لاتکس در آن‌ها جریان دارد و یک محصول ثانویه پاپایا محسوب می‌شود و از آن پاپائین تهیه می‌کنند [۳]. پاپائین موجود در این میوه نوعی پروتئاز می‌باشد و به همین جهت استفاده از این میوه در تولید ژلاتین سبب جلوگیری از تشکیل ژلی سفت می‌گردد [۲].

خشک‌کردن اسمزی یک فرایند مناسب برای حذف بخشی از رطوبت بافت سلولی مواد غذایی مانند میوه‌ها و سبزی‌ها بدون تغییر فاز است و اغلب به عنوان یک فرایند پیش تیمار به کار می‌رود. اساس فرایند خشک‌کردن به روش اسمزی، قرار دادن قطعات مواد غذایی در یک محلول با فشار بالا می‌باشد. محلول

هیپرتونیک شامل نمک، شکر، سوربیتول، گلیسرول و .. می‌باشد [۴].

برای پیش بینی صحیح روند خشک شدن محصولات کشاورزی با هدف افزایش کیفیت محصول خشک شده، می‌توان سینتیک خشک شدن را مدلسازی نمود. مدلسازی سینتیک خشک‌کردن روابط بین متغیرهای زمان و رطوبت را ارائه می‌دهد. که می‌تواند راه مناسبی برای کنترل زمان و شرایط خشک‌کردن باشد [۵]. به منظور پیش بینی بهتر فرایند خشک شدن محصولات کشاورزی، خشک‌کردن به روش لایه نازک بهترین حالت می‌باشد [۶].

به طور کلی سه نوع مدل برای پیش بینی فرایند خشک‌کردن وجود دارد: مدل‌های تئوری که به مشخصات نمونه بستگی دارد، مدل‌های تجربی که از روی نتایج آزمایش بهترین مدل را با برازش دادن بین میانگین داده‌های آزمایش به دست می‌آورند و مدل‌های نیمه‌تجربی که حالتی بین مدل‌های تئوری و تجربی هستند و بر اساس قانون فیک در فرایند انتشار به دست می‌آیند و ضرایب آنها بسته به شرایط آزمایش تعیین می‌گردند [۲].

هدف از این پژوهش، مدلسازی نوع فرایند خشک‌کردن پاپایا بود: در ابتدا فرایند خشک‌کردن اسمزی قطعات پاپایا صورت گرفته و تغییرات میزان پارامترهای این روش خشک‌کردن مانند میزان جذب ماده جامد (Solid gain)، میزان کاهش آب (Water lost) و میزان کاهش وزن (Weight reduce) بررسی شد. همچنین به صورت مجزا خشک‌کردن قطعات پاپایا به وسیله هوای داغ در آون جابجایی نیز صورت گرفت و داده‌های به دست آمده از آزمایش توسط مدل‌های تجربی رایج و به وسیله جعبه ابزار curve fitting نرم افزار Matlab نسخه ۸،۱ سال ۲۰۱۳، مدلسازی شدند و کارایی تمام مدل‌ها به وسیله پارامترهای آماری RMSE و R² تعیین گردید. همچنین اثر دمای خشک‌کردن بر برخی خصوصیات کیفی مثل پارامترهای رنگ سنجی (L*, a* و b*) و میزان چروکیدگی بررسی گردید. این تحقیق از نقطه نظر جامعیت مدل‌های به کار برده شده در مدلسازی، بررسی اکثر پارامترهای درگیر در فرایند خشک‌کردن اسمزی و با هوای داغ و همچنین بررسی اثر دامنه دمایی پائین و متوسط هوای داغ برای خشک‌کردن پاپایا (۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس) بر برخی خصوصیات کیفی آن دارای نوآوری است.

1. β -Cryptoxanthin
2. Food and Agriculture Organization

۲- مواد و روش‌ها

پاپایای (*Carica papaya L.*) مورد استفاده از بازارهای محلی منطقه باهوکلالات سیستان و بلوچستان تهیه و در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۱ گرم (مدل H₂O و A-30، ساخت شرکت متلر سوئیس) جهت توزین استفاده شد. همچنین ساکارز تولیدی شرکت مرک آلمان جهت محلول سازی اسمزی استفاده گردید.

نحوه آماده سازی نمونه‌ها

ابتدا نمونه‌های پاپایای خریداری شده به وسیله یک کارد استیل پوست گیری شده و پس از برش دادن، دانه های موجود در آن تخلیه گردید. سپس به وسیله اسلایسر، نمونه‌های پاپایا در سه ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلی متر تهیه شدند.

تعیین رطوبت اولیه نمونه‌ها

برای تعیین میزان رطوبت از دستگاه آن استفاده شد و وزن نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تا زمان رسیدن به وزن ثابت (حدود ۱۵ ساعت) ثبت گردید و از طریق این وزن ثابت، میزان رطوبت محاسبه گردید (AOAC).

$$W.b.\% = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (1)$$

W.b.%: درصد رطوبت نمونه‌ها بر حسب وزن تر

A: وزن اولیه نمونه

B: وزن نمونه پس از خشک شدن و رسیدن به وزن ثابت

نحوه آماده سازی محلول اسمزی

محلول اسمزی مورد استفاده شامل محلول ۵۰ درصد ساکارز بود. نسبت قطعات پاپایا به محلول ۱ به ۱۰ بر اساس وزن بود [۷]. مخزن حاوی محلول اسمزی مرتباً به وسیله دماسنج جیوه‌ای کنترل دمایی می‌شد تا دمای مخزن از ۱±۲۵ درجه سلسیوس بالاتر یا پائین تر نرود.

آبگیری اسمزی

قطعات پاپایای وزن شده برای اینکه آزادانه در تماس با محلول اسمزی باشند بین دو صفحه توری مانند و مشبک فلزی قرار گرفتند و به وسیله وزنه‌های کوچک به مدت ۴ ساعت کاملاً در محلول اسمزی غوطه‌ور شدند. به طوری که هر نیم ساعت نمونه برداری از آن انجام گردید. برای این منظور در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای (یعنی زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰ و ۲۴۰ دقیقه) نمونه‌های مجزا از مخزن خارج شده

و برای این که رطوبت ناشی از محلول اسمزی از سطح آن حذف شود، به وسیله کاغذ فیلتر جاذب رطوبت آبگیری شد [۷]. نمونه‌های آبگیری شده قبل از تعیین میزان رطوبت به وسیله دستگاه آن، دوباره وزن شدند. برای هر تیمار مقادیر کاهش آب (WL)؛ جذب ماده جامد (SG)؛ و کاهش وزن (WR) که از پارامترهای آبگیری اسمزی هستند اندازه‌گیری شدند. این مقادیر بر حسب معادلات ۲، ۳ و ۴ تعیین گردیدند:

$$WL = \frac{(w w_0) - (w_t - w s_t)}{(w s_0 + w w_0)} \quad (2)$$

$$SG = \frac{(w s_t - w s_0)}{(w s_0 + w w_0)} \quad (3)$$

$$WR = WL - SG \quad (4)$$

که در این معادلات WW₀ وزن آب در نمونه اولیه (گرم)، WS₀ وزن ماده جامد اولیه نمونه‌های پاپایا (گرم)، W_t و WS_t به ترتیب وزن اولیه نمونه‌های پاپایا و پس از هر زمان از آبگیری (گرم) می‌باشد [۸ و ۹ و ۱۰]. تغییرات تمام این پارامترهای آبگیری اسمزی طی زمان‌های غوطه‌وری ذکر شده تعیین شد.

خشک کردن با هوای داغ

پس از تهیه اسلایس‌ها در ضخامت‌های ذکر شده (۳، ۵ و ۷ میلی‌متر) و اندازه‌گیری رطوبت اولیه، نمونه‌های اسلایس شده پس از توزین بر روی توری تعبیه شده در دستگاه آن جابجایی (مدل F-02G، ساخت کشور کره جنوبی) قرار گرفتند. این توری به ترازوی دیجیتال خارج از دستگاه متصل بوده و داده‌های میزان وزن نمونه‌ها در طی زمان خشک کردن هر ۵ دقیقه ثبت گردید. در این پژوهش از ۳ دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس جهت خشک کردن نمونه‌های اسلایس شده پاپایا استفاده گردید و سرعت هوای خشک‌کن ۱±۰/۱ متر بر ثانیه بود. همچنین لازم به ذکر است که رطوبت نسبی و مطلق هوای خشک‌کننده در تمام دماها به ترتیب ۳۰ درصد و ۰/۶±۰/۰۲ گرم آب بر کیلوگرم هوای خشک بود.

بر اساس معادله (۱) میزان رطوبت اولیه نمونه‌های پاپایا ۸۴/۴۸ درصد (بر پایه‌ی تر) تعیین شد و نمونه‌ها تا رطوبت نهایی ۱۵ درصد خشک شدند. بر اساس معادله موازنه جرم میزان تغییرات وزن نمونه‌ها به میزان رطوبت تبدیل شد و در نهایت با استفاده از معادله (۵) رطوبت‌های به دست آمده در هر زمان به نسبت رطوبتی تبدیل گردید:

3. Water lost
4. Solid gain
5. Weight reduce

$$XG^{\infty} = \pm \frac{1}{k_2} \quad (8)$$

علاوه بر مدل پلگ از مدل آزورا نیز جهت مدل‌سازی ریاضی استفاده شد. مدل بیان شده توسط آزورا (۱۹۹۲) بر اساس مدل موازنه جرم نشان داده شده در معادله زیر بیان می‌شود:

$$XG = XG^{\infty} - XG^* \quad (9)$$

XG^* ، مقداری از آب است که در فاصله زمانی مشخص هنوز در قطعات باقیمانده است. مقدار XG^{∞} ، مقدار آب از دست رفته پس از فرض زمان بی‌نهایت است که به دما و غلظت محلول اسمزی وابسته است. به دلیل این که مقدار XG با گذشت زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی افزایش و بالعکس مقدار XG^* کاهش می‌یابد، این متغیرها می‌توانند به هم مرتبط گردند و پارامتری به نام k را ایجاد نمایند. این پارامتر به زمان غوطه‌وری و سرعت انتقال جرم بستگی دارد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$XG^* = \frac{XG}{kt} \quad (10)$$

جاگذاری معادله قبل در این معادله منجر به تولید معادله‌ای می‌شود که برای تخمین جرم یک ماده جذب یا دفع شده در یک زمان غوطه‌وری استفاده می‌گردد:

$$XG = \frac{kt(XG^{\infty})}{1 + kt} \quad (11)$$

علاوه بر دو مدل ذکر شده برای مدل‌سازی ریاضی فرایند آبدایی اسمزی، از مدل نمایی زیر نیز برای مدل‌سازی استفاده شد. این مدل نوعی مدل ویبول بوده و دارای سه پارامتر می‌باشد [۱۳]:

$$\frac{XG}{XG^{\infty}} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \quad (12)$$

مدل‌سازی ریاضی فرایند خشک کردن با هوای

داغ

مدل‌های تجربی خشک کردن لایه نازک مواد غذایی که در جدول (۱) نشان داده شده است، جهت مدل‌سازی داده‌های به دست آمده (تغییرات MR در برابر زمان خشک کردن) مورد استفاده قرار گرفتند.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (5)$$

که در این معادله M میزان رطوبت در هر لحظه از زمان خشک کردن، M_0 میزان رطوبت اولیه و M_e میزان رطوبت تعادلی است. لازم به ذکر است که به دلیل کوچک بودن رطوبت تعادلی می‌توان از آن صرفه نظر کرد و معادله را به صورت M/M_0 نوشت [۱۱].

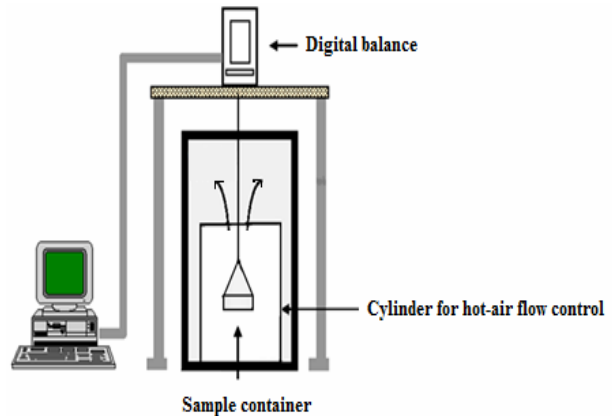


Fig 1 Weighing method of papaya slices in a hot-air oven dryer.

مدل‌سازی ریاضی آبدایی اسمزی

در این مرحله از مدل‌های ریاضی پلگ^۶، آزورا^۷ و ویبول^۸ برای مدل‌سازی نحوه فرایند آبدایی قطعات پاپایا استفاده گردید. پلگ (۱۹۸۸) مدلی را برای سیتیک جذب رطوبت پیشنهاد داد که در آن جذب رطوبت به حد تعادل برسد. این معادله به صورت زیر است [۱۲]:

$$XG = \pm \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (6)$$

در این معادله علامت منفی برای آبدایی و علامت مثبت برای حالت جذب رطوبت تعریف می‌گردد. بر اساس این مدل، معکوس مقدار k_1 برابر است با سرعت اولیه در زمان صفر ($t = 0$) از فرایند آبدایی یا جذب آب:

$$\left. \frac{d(XG)}{dt} \right|_{t=0} = \pm \frac{1}{k_1} \quad (7)$$

معکوس مقدار k_2 نشان دهنده مقدار رطوبت در حالت تعادلی است یعنی زمانی که زمان به سمت بی‌نهایت ($t \rightarrow \infty$) میل می‌کند:

6. Peleg's model
7. Azuara's model
8. Weibull

Table 1 Mathematical models used for modeling of hot-air drying of papaya slices

| Model name | Equation | Reference |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| Newton | $MR = \exp(-kt)$ | Yousefi et al. 2013 |
| Page | $MR = \exp(-ke^n)$ | Yousefi et al. 2013 |
| Modified page | $MR = \exp(-kt)^n$ | Yousefi et al. 2013 |
| Henderson and Pabis | $MR = a \exp(-kt)$ | Yousefi et al. 2013 |
| Two term | $MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$ | Yousefi et al. 2013 |
| Exponential two term | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$ | Zomorodian and Moradi, 2010 |
| Wang and Singh | $MR = 1 + at + bt^2$ | Zomorodian and Moradi, 2010 |
| Approximate diffusion | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$ | Zomorodian and Moradi, 2010 |

که در این معادله D_{eff} ضریب انتشار مؤثر (m^2/s)، t زمان خشک کردن و L نصف ضخامت (m) نمونه‌های تیغه‌ای شکل می‌باشد. همانطور که قابل مشاهده است با خطی سازی معادله از طریق لگاریتم گیری از طرفین معادله، مقدار D_{eff} از شیب نمودار لگاریتمی تغییرات نسبت رطوبتی بر حسب زمان خشک کردن قابل محاسبه است.

محاسبه انرژی فعالسازی

بر اساس رابطه آرنیوس، وابستگی میزان D_{eff} به دما قابل بیان است [۱۵]. این موضوع در رابطه زیر قابل مشاهده است:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273.15)}\right) \quad (16)$$

که در این معادله D_0 ثابت آرنیوس (m^2/s)، E_a انرژی فعالسازی (kJ/mol)، T دمای خشک کردن بر حسب سلسیوس و R ثابت جهانی گازها ($kJ/mol \cdot ^\circ K \cdot 0.0831$) می‌باشد. مقدار E_a از روی شیب نمودار $\ln(D_{eff})$ در برابر $1/(T+273.15)$ قابل محاسبه است.

ارزیابی رنگ

پس از پایان فرایند خشک شدن با هوای داغ در دماهی مختلف، رنگ محصولات مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور فاکتورهای رنگی (L^* ، a^* و b^*) از عکس تهیه شده توسط دوربین دیجیتال (مدل DSC-W120 با وضوح تصویر ۷/۲ مگاپیکسل ساخت شرکت Sony ژاپن) که درون جعبه مخصوص عکسبرداری (زاویه دوربین نسبت به نمونه صفر درجه بود) قرار داده شده بود، به کمک جعبه ابزار پردازش تصویر نرم افزار Matlab نسخه ۸،۱ سال ۲۰۱۳، اندازه گیری گردید. همچنین پس از تعیین فاکتورهای رنگی ذکر شده، تغییرات کلی رنگ (ΔE) بر اساس معادله ۱۷ تعیین گردید:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (17)$$

تعیین کارایی مدل سازی

با استفاده از معادلات ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) کارایی روش‌های مدل سازی ذکر شده تعیین و با هم مقایسه شدند. لازم به ذکر است که R^2 بالاتر و RMSE پایین تر، کارایی بالای مدل را نشان می‌دهد. این معادلات در روابط ۱۳ و ۱۴ بیان شده‌اند:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2} \quad (13)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

در این معادلات $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبتی آزمایشگاهی در هر لحظه از زمان، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبتی پیش‌بینی شده در هر لحظه از زمان، \overline{MR}_{exp} میانگین نسبت رطوبتی آزمایشگاهی، \overline{MR}_{pre} میانگین نسبت رطوبتی پیش‌بینی شده و N تعداد مشاهدات می‌باشد.

تعیین ضریب انتشار مؤثر

به دلیل نرخ نزولی در خشک کردن با هوای داغ، یک مقاومت درونی مقابل انتقال جرم (رطوبت) مشاهده می‌شود. معادله انتشار فیک فرایند خشک کردن در نرخ نزولی را آنالیز می‌کند. کرنک^۹ (۱۹۷۵) این معادله را حل نموده و معادله زیر را برای یک شکل تیغه‌ای با انتشار رطوبت درونی یکنواخت، ضریب انتشار ثابت و چروکیدگی ناچیز پیشنهاد داد [۱۴]:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (15)$$

9. Crank

شکل (۲) تغییرات پارامترهای آبدیاری اسمزی را طی فرایند آبدیاری اسمزی نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است مقدار این پارامترها با افزایش زمان آبدیاری افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج هنگ^{۱۰} و همکاران (۱۹۹۰) و پتچی و مانیواساگان^{۱۱} (۲۰۰۹) مطابقت دارد [۱۶ و ۸]. بعد از ۴ ساعت زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی، میزان فاکتور کاهش آب (WL) و کاهش وزن (WR) به ۳۳/۶۴ و ۲۲/۱۹ (g/100g) وزن اولیه نمونه) رسید. بر اساس این شکل، در انتهای فرایند اسمزی، به خصوص ۲۱۰ و ۲۴۰ دقیقه پس از غوطه‌وری، تغییرات در مقادیر سه پارامتر آبدیاری اسمزی بسیار آرام بود. دلیل این مسئله کاهش فشار اسمزی می‌باشد که عامل آبدیاری در این فرایند محسوب می‌گردد [۱۷]. افزایش زمان غوطه‌وری سبب افزایش جذب مواد جامد بیشتر توسط قطعات پاپایا شد و همزمان میزان کاهش آب نمونه‌ها نیز افزایش پیدا کرد که این مسئله مشابه نتایج کایماک-ارتکینو سلطان اغلو^{۱۲} (۲۰۰۰) بود [۱۸]. میزان رطوبت قطعات پاپایا در پایان فرایند آبدیاری اسمزی (۴ ساعت) ۶۹/۲۸ درصد (بر پایه‌ی تر) بود. این مسئله نشان می‌دهد که ۴ ساعت غوطه‌وری در محلول اسمزی ۵۰ درصد ساکارز سبب کاهش ۱۷/۹۹ درصدی رطوبت قطعات پاپایا با ضخامت ۵ میلی‌متر می‌شود.

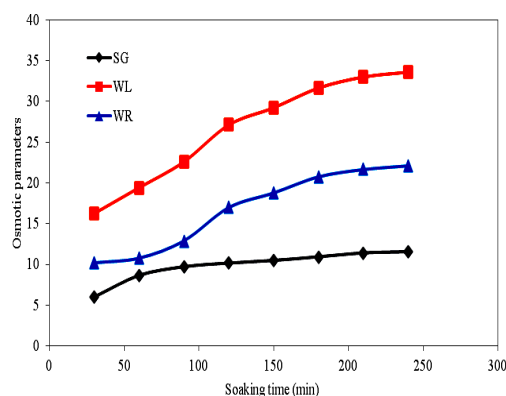


Fig 2 Changes in osmotic parameters during dehydration process

مدل‌سازی ریاضی فرایند آبدیاری اسمزی

جدول (۲) نتایج مدل‌سازی ریاضی فرایند آبدیاری اسمزی را برای فاکتور SG نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود،

فاکتورهای دارای اندیس صفر در این معادله مربوط به نمونه اولیه و بدون اندیس مربوط به نمونه خشک شده می‌باشد. لازم به ذکر است که دستورات زیر در برنامه نویسی به زبان Matlab برای تبدیل پارامترهای رنگی RGB به Lab مورد استفاده قرار گرفت:

```
I= imread ('papaya.jpg');
C= makecform ('srgb2lab');
Lab= applycform (I,C);
L= lab ((:,:,1));
a= lab ((:,:,2));
b= lab ((:,:,3));
imtool (Lab);
```

محاسبه میزان چروکیدگی

جهت تعیین میزان چروکیدگی نمونه‌های خشک شده نهایی در دماهای مختلف با استفاده از تغییرات حجم (شکل نمونه‌ها تیغه تخت فرض گردید)، مقدار سطح و ضخامت آن‌ها به ترتیب با استفاده از نرم افزار Image J (نسخه ۱,۴۸) و کولیس (میتوتویو، ساخت کشور ژاپن) اندازه‌گیری شد. سپس نسبت تغییرات حجم به حجم اولیه نمونه‌ها با استفاده از معادله ۱۸ به عنوان معیار چروکیدگی تعیین گردید:

$$S = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \times 100 \quad (18)$$

که در این معادله S، V_0 و V_d به ترتیب نسبت تغییر حجم، حجم اولیه و حجم نهایی پس از خشک شدن می‌باشد.

آنالیز آماری

از آنالیز واریانس یک طرفه (ANOVA) و آزمون چند دامنه‌ای دانکن برای مقایسه میانگین داده‌ها استفاده شد. سطح اطمینان مورد استفاده جهت آنالیز آماری ۹۵ درصد در نظر گرفته شد و کلیه آنالیزها توسط نرم افزار SPSS نسخه ۲۱ انجام پذیرفت.

۳- نتایج و بحث

آبدیاری اسمزی

مقدار رطوبت اولیه به دست آمده برای قطعات پاپایا که بر اساس روش ذکر شده به دست آمد ۸۴/۴۸ درصد (بر پایه‌ی تر) بود.

10. Heng

11. Petchi&manivasagan

12. Kaymak-Ertekin and Sultanoglu

ضخامت ۳ میلی‌متر مدل پیچ بر اساس R^2 بالا (۰,۹۹۶) و $RMSE$ پایین دقت بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد و در ضخامت‌های ۷ و ۵ میلی‌متر مدل‌های دوجمله‌ای و دوجمله‌ای نمایی با R^2 (۰,۹۹۹) و $RMSE$ (۰,۰۰۸) به عنوان بهترین مدل پیشنهاد می‌شوند. جدول (۵) نتایج مدل‌سازی ریاضی خشک‌کردن قطعات پاپایا در دمای ۶۰ درجه سلسیوس در ضخامت‌های ذکر شده را نشان می‌دهد. برای ضخامت‌های ۳ و ۷ میلی‌متر مدل‌های دوجمله‌ای و دوجمله‌ای نمایی به ترتیب با بالاترین R^2 (۰,۹۹۵) و پایین‌ترین $RMSE$ (۰,۰۲۰) -۰,۰۱۸) به عنوان بهترین مدل انتخاب شدند و برای ضخامت ۵ میلی‌متر قطعات پاپایا مدل ونگ-سینگ با R^2 بالا (۰,۹۸۷) و $RMSE$ پایین (۰,۰۳۲) پیشنهاد می‌شود. همچنین جداول (۶)، (۷) و (۸) که بهترین مدل‌های ریاضی انتخاب شده در دماهای (۴۰، ۵۰ و ۶۰) درجه سلسیوس را برای سه ضخامت (۳، ۵ و ۷) میلی‌متر همراه با پارامترهای آن‌ها با توجه به بالاترین R^2 و پایین‌ترین $RMSE$ نشان می‌دهد. تورات^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۲) مدل‌سازی ریاضی و تجربی لایه نازک خشک‌کردن زنجبیل را انجام دادند. آزمایش‌ها در یک خشک‌کن تحت خلاء و در ۴ دمای متفاوت ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۶۵ درجه سلسیوس انجام شد. نتایج نشان داد که مدل دوجمله‌ای برازش بهتری نسبت به ۵ مدل دیگر انتخاب شده با داده‌های آزمایشگاهی دارد [۲۲]. کینگزلی و سینگ^{۱۷} (۲۰۰۷) داده‌های حاصل از خشک‌کردن لایه نازک انار را در دماهای ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درجه سلسیوس، با مدل‌های ریاضی مختلف مدل‌سازی کردند، که در این تحقیق مدل پیچ به عنوان بهترین مدل ارائه شد [۲۳]. وگا-گالوز^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیق سیب‌تیک خشک‌کردن خارتوت (انگور فرنگی) را مورد مطالعه قرار دادند [۲۴]. فرایند خشک‌کردن در دماهای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس انجام شد. نتایج رضایت بخش مقایسه مقادیر تجربی با رطوبت پیش بینی شده توسط مدل میدیلی سبب شد تا این مدل برای پیش‌بینی فرایند خشک شدن خارتوت ارائه شود.

هر سه مدل استفاده شده برازش بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی SG داشته‌اند ولی بر اساس R^2 بالاتر (۰,۹۹۲) و $RMSE$ پایین‌تر (۰,۱۷۹) مدل‌های پلگ و آزورا دقت بیشتری در تخمین این فاکتور داشتند. لازم به ذکر است که صورت معادله‌ای مدل‌های پلگ و آزورا قابل تبدیل به یکدیگر می‌باشند و تنها پارامترهای مربوط به آن‌ها متفاوت است که مفهوم این پارامترها ذکر گردید. اشمیت^{۱۳} و همکاران (۲۰۰۹) به مطالعه فرایند اسمزی قطعات سینه مرغ در محلول‌های نمکی پرداختند. برای این مهم آن‌ها از مدل‌های آزورا و ویبول برای مدل‌سازی ریاضی این فرایند استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل ویبول برازش بالاتری نسبت به مدل آزورا با داده‌های آزمایشگاهی دارد [۱۹]. سوتار و گوپتا^{۱۴} (۲۰۰۷) مدل‌سازی ریاضی انتقال جرم در آگیری اسمزی تکه‌های پیاز را مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به نتایج به دست آمده، مدل دوپارامتری توسعه یافته آزورا و همکاران توانست سیب‌تیک انتقال جرم در آگیری اسمزی را به صورت رضایت بخش توصیف کند [۲۰]. گنجلو^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۱) طی تحقیقی با هدف بررسی سیب‌تیک آگیری اسمزی گووا داده‌های حاصل از آزمایش را با مدل‌های تجربی پلگ، پیچ و آزورا برازش دادند [۲۱]. پس از تجزیه تحلیل داده‌های به دست آمده مدل تجربی پلگ را با بالاترین R^2 و کمترین $RMSE$ پیشنهاد کردند.

مدل‌سازی ریاضی خشک‌کردن با هوای داغ

جدول (۳) نتایج مدل‌سازی ریاضی خشک‌کردن قطعات پاپایا در دمای ۴۰ درجه سلسیوس برای سه ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر را نشان می‌دهد، با توجه به جدول از بین مدل‌های مورد بررسی شده در ضخامت‌های مختلف مدل‌های دوجمله‌ای و دوجمله‌ای نمایی با بالاترین R^2 (۰,۹۹۹) -۰,۰۱۲) و پایین‌ترین $RMSE$ (۰,۰۰۴) به عنوان بهترین مدل‌های ریاضی انتخاب شده‌اند. جدول (۴) نتایج مدل‌سازی ریاضی خشک‌کردن قطعات پاپایا در دمای ۵۰ درجه سلسیوس برای هر سه ضخامت قطعات را نشان می‌دهد. در

16. Thorat
17. Kingsly & Singh
18. Vega-Galvez

13. Schmidt
14. Sutar and Gupta
15. Ganjloo

Table 2 Mathematical modeling results for osmotic dehydration process of papaya slices

| Model | Parameters | R ² | RMSE |
|---------|--|----------------|-------|
| Peleg | k ₁ = 2.523 k ₂ = 0.0768 | 0.992 | 0.179 |
| Azuara | k = 0.031 s _G [∞] = 13.030 α = 0.740 | 0.992 | 0.179 |
| Weibull | β = 44.130 s _G [∞] = 11.73 | 0.989 | 0.228 |

Table 3 Statistical results obtained for the models at 40 °C

| Model | Thickness (mm) | R ² | RMSE |
|-----------------------|----------------|----------------|-------|
| Newton | 3 | 0.993 | 0.022 |
| Page | 3 | 0.994 | 0.020 |
| Modified page | 3 | 0.993 | 0.022 |
| Henderson and Pabis | 3 | 0.993 | 0.022 |
| Two term | 3 | 0.993 | 0.022 |
| Exponential two term | 3 | 0.995 | 0.018 |
| Wang and Singh | 3 | 0.990 | 0.026 |
| Approximate diffusion | 3 | 0.994 | 0.021 |
| Newton | 5 | 0.995 | 0.017 |
| Page | 5 | 0.997 | 0.013 |
| Modified page | 5 | 0.995 | 0.017 |
| Henderson and Pabis | 5 | 0.996 | 0.017 |
| Two term | 5 | 0.998 | 0.012 |
| Exponential two term | 5 | 0.998 | 0.012 |
| Wang and Singh | 5 | 0.992 | 0.023 |
| Approximate diffusion | 5 | 0.996 | 0.016 |
| Newton | 7 | 0.997 | 0.015 |
| Page | 7 | 0.999 | 0.004 |
| Modified page | 7 | 0.997 | 0.015 |
| Henderson and Pabis | 7 | 0.998 | 0.009 |
| Two term | 7 | 0.999 | 0.004 |
| Exponential two term | 7 | 0.999 | 0.005 |
| Wang and Singh | 7 | 0.993 | 0.022 |
| Approximate diffusion | 7 | 0.993 | 0.005 |

Table 4 Statistical results obtained for the models at 50 °C

| Model | Thickness (mm) | R ² | RMSE |
|-----------------------|----------------|----------------|-------|
| Newton | 3 | 0.996 | 0.016 |
| Page | 3 | 0.996 | 0.015 |
| Modified page | 3 | 0.996 | 0.017 |
| Henderson and Pabis | 3 | 0.996 | 0.017 |
| Two term | 3 | 0.996 | 0.017 |
| Exponential two term | 3 | 0.996 | 0.017 |
| Wang and Singh | 3 | 0.990 | 0.027 |
| Approximate diffusion | 3 | 0.996 | 0.017 |
| Newton | 5 | 0.998 | 0.011 |
| Page | 5 | 0.998 | 0.009 |
| Modified page | 5 | 0.998 | 0.011 |
| Henderson and Pabis | 5 | 0.998 | 0.011 |
| Two term | 5 | 0.999 | 0.008 |
| Exponential two term | 5 | 0.999 | 0.008 |
| Wang and Singh | 5 | 0.988 | 0.030 |
| Approximate diffusion | 5 | 0.997 | 0.013 |
| Newton | 7 | 0.994 | 0.020 |
| Page | 7 | 0.998 | 0.009 |
| Modified page | 7 | 0.994 | 0.020 |
| Henderson and Pabis | 7 | 0.996 | 0.017 |
| Two term | 7 | 0.999 | 0.008 |
| Exponential two term | 7 | 0.999 | 0.008 |
| Wang and Singh | 7 | 0.995 | 0.020 |
| Approximate diffusion | 7 | 0.994 | 0.021 |

Table 5 Statistical results obtained for the models at 60 °C

| Temperature (°C) | Thickness (mm) | Selected models | Parameters | The highest R ² | The lowest RMSE |
|------------------|----------------|----------------------|---|----------------------------|-----------------|
| 40 | 3 | Exponential two term | k = 0.013 a = 1.503 | 0.995 | 0.188 |
| 40 | 5 | Exponential two term | k = 0.012 a = 1.552 | 0.998 | 0.012 |
| 40 | 7 | Two term | k ₀ =0.013 k ₁ =0.011 a = -2.957 b = 3.971 | 0.999 | 0.004 |

Table 6 The best models selected for drying at 40 °C

| Model | Thickness (mm) | R ² | RMSE |
|-----------------------|----------------|----------------|-------|
| Newton | 3 | 0.993 | 0.022 |
| Page | 3 | 0.993 | 0.022 |
| Modified page | 3 | 0.993 | 0.022 |
| Henderson and Pabis | 3 | 0.994 | 0.019 |
| Two term | 3 | 0.995 | 0.020 |
| Exponential two term | 3 | 0.993 | 0.022 |
| Wang and Singh | 3 | 0.976 | 0.043 |
| Approximate diffusion | 3 | 0.993 | 0.023 |
| Newton | 5 | 0.983 | 0.035 |
| Page | 5 | 0.985 | 0.033 |
| Modified page | 5 | 0.983 | 0.036 |
| Henderson and Pabis | 5 | 0.983 | 0.036 |
| Two term | 5 | 0.983 | 0.037 |
| Exponential two term | 5 | 0.983 | 0.036 |
| Wang and Singh | 5 | 0.987 | 0.032 |
| Approximate diffusion | 5 | 0.983 | 0.036 |
| Newton | 7 | 0.994 | 0.020 |
| Page | 7 | 0.995 | 0.019 |
| Modified page | 7 | 0.994 | 0.021 |
| Henderson and Pabis | 7 | 0.994 | 0.021 |
| Two term | 7 | 0.994 | 0.021 |
| Exponential two term | 7 | 0.995 | 0.018 |
| Wang and Singh | 7 | 0.986 | 0.032 |
| Approximate diffusion | 7 | 0.994 | 0.021 |

Table 7 The best models selected for drying at 50 °C

| Temperature (°C) | Thickness (mm) | Selected models | Parameters | The highest R ² | The lowest RMSE |
|------------------|----------------|----------------------|---|----------------------------|-----------------|
| 50 | 3 | Page | k = 0.011 n = 1.045 | 0.996 | 0.015 |
| | | Two term | k ₀ =0.0163 k ₁ =0.0176 a = 3.906 b = -2.909 | 0.999 | 0.008 |
| 50 | 5 | Exponential two term | k = 0.0151 a = 1.428 | 0.999 | 0.008 |
| | | Two term | k ₀ =0.0182 k ₁ =0.016 a = -4.272 b = 5.279 | 0.999 | 0.008 |
| 50 | 7 | Exponential two term | k = 0.0146 a = 1.613 | 0.999 | 0.008 |

Table 8 The best models selected for drying at 60 °C

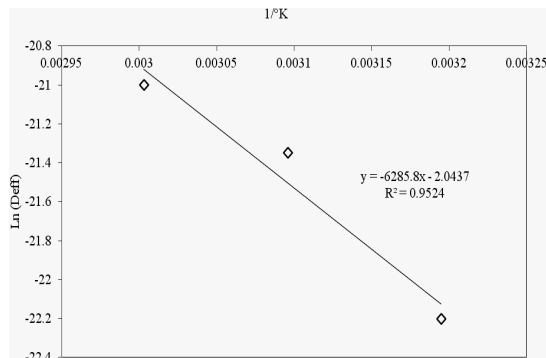
| Temperature (°C) | Thickness (mm) | Selected models | Parameters | The highest R ² | The lowest RMSE |
|------------------|----------------|----------------------|---|----------------------------|-----------------|
| 60 | 3 | Two term | k ₀ =0.033 k ₁ =0.035 a = 9.234 b = -8.3 | 0.995 | 0.020 |
| 60 | 5 | Wang and Singh | a = -0.013 b = 4.68E-5 | 0.987 | 0.032 |
| 60 | 7 | Exponential two term | k = 0.018 a = 1.484 | 0.995 | 0.018 |

Table 9 Influence of temperature on the color parameters and shrinkage

| Shrinkage% | ΔE | b* | a* | L* | Temperature (°C) |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| --- | --- | 55.46±2.04 ^b | -2.03±0.64 ^a | 50.42±1.21 ^b | Control |
| 25.16±3.45 ^c | 9.31±0.48 ^a | 60.83±2.18 ^a | -6.39±0.89 ^b | 56.65±2.01 ^a | 40 |
| 27.91±1.01 ^b | 8.34±0.56 ^a | 58.47±1.87 ^a | -5.79±0.83 ^b | 57.23±1.43 ^a | 50 |
| 34.85±2.27 ^a | 9.75±0.71 ^a | 61.36±1.92 ^a | -6.55±0.78 ^b | 56.73±1.06 ^a | 60 |

تعیین مقدار انرژی فعالسازی (E_a)

مقدار انرژی فعالسازی به دست آمده برای قطعات پاپایا با استفاده از معادله (۱۶) برابر ۴۸/۶۱ کیلوژول بر مول بود. این مقدار بر اساس شیب خط نمودار شکل (۴) تعیین گردید. این مقدار به دست آمده کمتر از مقدار انرژی اکتیواسیون برای فلفل سبز (۵۱/۴ کیلوژول بر مول) تعیین شده توسط کایماک-ارتکین^{۲۳} [۲۹]، نعنای خشک شده (۸۲/۹۳ کیلوژول بر مول) تعیین شده توسط پارک^{۲۴} و همکاران [۳۰] و بیشتر از فلفل قرمز (۲۴/۴۷ کیلوژول بر مول) تعیین شده توسط کلیم الله و کایلاپان [۲۶] بود

**Fig 4** Determination of activation energy (E_a) based on the changes of D_{eff} with temperature.**ارزیابی رنگ و چروکیدگی**

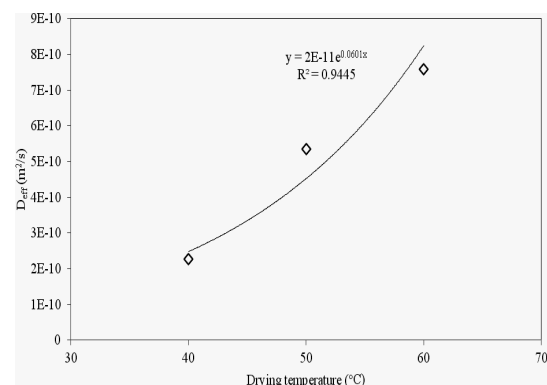
جدول ۹ نتایج ارزیابی پارامترهای رنگ سنجی و همچنین میزان چروکیدگی نمونه های پاپایا با ضخامت ۵ میلیمتر را

23. Kymak-Ertekin
24. Park

تعیین ضریب انتشار مؤثر

بر اساس معادله (۱۵) مقدار ضریب انتشار مؤثر در دماهای مختلف خشک کردن برای قطعات پاپایا تعیین گردید که نتایج آن در شکل (۳) آمده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش دما میزان D_{eff} افزایش می یابد. افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس سبب افزایش D_{eff} از $۲/۲۸ \times 10^{-10}$ به $۷/۵۸ \times 10^{-10}$ متر مربع بر ثانیه گردید.

مادامبا^{۱۹} و همکاران (۱۹۹۶) بیان کردند که میزان D_{eff} برای نمونه های مواد غذایی بین $۱۰^{-۱۱}$ تا $۱۰^{-۹}$ می باشد [۲۵]. همانطور که مشاهده می شود مقدار به دست آمده برای قطعات پاپایا نیز در این دامنه قرار دارد. نتایج مشابهی در مورد اثر دما توسط کلیم الله و کایلاپان^{۲۰} (۲۰۰۵)، ساسیلیک^{۲۱} و همکاران (۲۰۰۶) و دویماز^{۲۲} (۲۰۰۷) گزارش شده است [۲۶ و ۲۷ و ۲۸].

**Fig 3** Influence of drying temperature on the effective diffusivity (D_{eff})

19. Madamba
20. Kaleemullah and Kailapan
21. Sacilik
22. Doymaz

بهترین مدل‌ها برای نشان دادن تغییرات رطوبت قطعات پاپایا حین فرایند آبیگری اسمزی انتخاب شدند. همچنین مدل‌های ریاضی دوجمله‌ای و دوجمله‌ای نمایی به عنوان بهترین مدل‌ها برای مدل‌سازی ریاضی خشک‌کردن با هوای داغ انتخاب گردیدند. در کل با توجه به نتایج در شرایط ذکر شده (خشک‌کردن با هوای داغ و آبیگری اسمزی)، مدل‌های انتخاب شده با دارا بودن R^2 بالا و RMSE پائین می‌توانند برای پیش بینی محتوی رطوبتی و تخمین میزان SG برای آبیگری اسمزی بصورت رضایت بخش مورد استفاده قرار گیرند. شاید بتوان گفت که چون اختلاف بین دماها در مورد اثر بر میزان پارامترهای رنگ سنجی مورد آزمایش معنی دار نبود و میزان چروکیدگی نیز در همه دماها تا حدودی قابل قبول بود، دمای ۶۰ درجه سلسیوس به دلیل سرعت بالاتر دمایی بهتر جهت خشک کردن قطعات پاپایا با هوای داغ باشد.

۵- منابع

- [1] Zirjani, L. and Tavakolipour, H. 2010. Banana sheets production possibility by using a combination of hot air and microwave drying. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 6: 58-67.
- [2] Yousefi, A., Asadi, V., Nassiri, S.M., Niakousari, M. and Aghdam, S.K. 2013. Comparison of mathematical and neural network models in the estimation of papaya fruit moisture content. *The Philippine Agricultural Scientist*, 95: 192-198.
- [3] Krishna, K., Paridhavi, M. and Patel, J.A. 2008. Review on nutritional, medicinal and pharmacological properties of Papaya (*Carica papaya* Linn.). *Natural Product Radiance*, 7: 364-373.
- [4] Moura, C., Masson, M. and Yamamoto, C. 2005. Effect of osmotic dehydration in the apple (*Pyrus-malus*) varieties Gala, Gold and Fuji. *Revista de Engenharia Térmica*, 4: 46-49.
- [5] Giner, S. and Bruce, D. 1998. Two-dimensional simulation model of steady-state mixed-flow grain drying. Part 2: Experimental validation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71: 51-66.
- [6] Zomorodian, A. and Moradi, M. 2010. Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for *Cuminum cyminum*. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12: 401-408.

تحت تاثیر دماهای مختلف خشک‌کردن نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان فاکتورهای روشنایی (L^*) و آبی-زردی (b^*) نمونه‌های خشک شده به طور معنی داری بیشتر از نمونه شاهد (قبل از خشک شدن) بود ($p < 0.05$)، در حالی که فاکتور رنگی سبزی-قرمزی (a^*) نمونه شاهد به طور معنی داری بیشتر از نمونه‌های خشک شده بود ($p < 0.05$). نمونه‌های خشک شده در دماهای مختلف (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) در هیچ یک از فاکتورهای رنگی با هم اختلاف معنی دار نداشتند ($p > 0.05$). نتایج فاکتور تغییرات کل رنگ (ΔE) نیز همین مسئله را تأیید کرد، به طوری که تفاوت معنی داری بین تغییرات کلی رنگ نمونه‌های خشک شده در دماهای مختلف مشاهده نشد ($p > 0.05$). شاید بتوان گفت که دامنه دمایی انتخاب شده برای خشک کردن (۶۰-۴۰ درجه سلسیوس) به آن حد بالا نبوده است که تغییرات معنی دار در فاکتورهای رنگی ایجاد کند. بسیاری از تحقیقات اثر معنی دار دما را بر تغییرات فاکتورهای رنگی نشان داده اند که از آن جمله می‌توان به نتایج ساسیلیک و الیسین (۲۰۰۶) برای قطعات سیب قرمز و لی^{۲۵} و همکاران (۲۰۱۱) برای نوعی قارچ اشاره کرد [۳۱ و ۳۲].

نتایج چروکیدگی نمونه‌ها نشان داد که دما اثر معنی داری در افزایش میزان چروکیدگی دارد، به طوری که با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس میزان چروکیدگی حدود ۹،۶۹ درصد افزایش یافت. شعبانی و توکلی پور (۲۰۱۲) بیان کردند که در بالاترین دمای خشک کردن (دمای ۸۰ درجه سلسیوس) بیشترین مقدار چروکیدگی برای قطعات لایه نازک فلفل دلمه که با هوای داغ خشک می‌شد، به دست آمد [۳۳]. مولا و همکاران (۲۰۱۰) دلیل افزایش میزان چروکیدگی با دما را افزایش سرعت خشک شدن (افزایش سرعت خروج آب) در دمای بالاتر بیان کردند [۳۴].

۴- نتیجه گیری

نتایج نشان داد که در هر دو روش خشک‌کردن با هوای داغ و خشک‌کردن اسمزی مرحله سرعت ثابت خشک‌کردن مشاهده نگردید و خشک‌کردن پاپایا به طور کامل در مرحله آهنگ نزولی رخ داد. با افزایش دما میزان ضریب انتشار موثر (D_{eff}) رطوبت افزایش یافت. مدل‌های ریاضی پلگ و آزورا به عنوان

- osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, 46: 243-250
- [19] Schmidt, F., Carciofi, B. and Laurindo, J. 2009. Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. *Journal of Food Engineering*, 91: 553-559.
- [20] Sutar, P. and Gupta, D. 2007. Mathematical modeling of mass transfer in osmotic dehydration of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 78: 90-97.
- [21] Ganjloo, A., Rahman, R., Bakar, J., Osman, A. and Bimakr, M. 2011. Mathematical modelling of mass transfer during osmotic dehydration of seedless guava (*Pisidium guajava* L.) cubes. *International Food Research Journal*. 18: 1105-1110.
- [22] Thorat, I. D., Mohapatra, D., Sutar, R., Kapdi, S. and Jagtap, D. D. 2012. Mathematical modeling and experimental study on thin-layer vacuum drying of ginger (*Zingiber Officinale* R.) slices. *Food and Bioprocess Technology*, 5: 1379-1383.
- [23] Kingsly, A. and Singh, D. 2007. Drying kinetics of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 79: 741-744.
- [24] Vega Gálvez, A., Puente Díaz, L., Lemus Mondaca, R., Miranda, M. and Torres, M.J. 2014. Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Cape Gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 38: 728-736.
- [25] Madamba, P.S., Driscoll, R. H. and Buckle, K.A. 1996. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29: 75-97.
- [26] Kaleemullah, S. and Kailappan, R. 2005. Drying kinetics of red chillies in a rotary dryer. *Biosystems Engineering*, 92: 15-23.
- [27] Sacilik, K., Keskin, R. and Elicin, A. K. 2006. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73: 231-238.
- [28] Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79: 243-248.
- [29] Kaymak Ertekin, F. 2002. Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. *Journal of Food science*, 67: 168-175.
- [30] Park, K. J., Vohnikova, Z. and Brod, F.P.R. 2002. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispata* L.). *Journal of Food Engineering*, 51: 193-199.
- [7] Antonio, G., Azoubel, P., Alves, D., El-Aouar, A. and Murr, F. 2004. Osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.): Influence of process variables. In: *Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Sao Paulo, Brazil*. p 1998-2004.
- [8] Petchi, M. and Manivasagan, R. 2009. Optimization of osmotic dehydration of radish in salt solution using response surface methodology. *International Journal of Food Engineering*, 5: 1-11.
- [9] Mujica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E. and Welti-Chanes, J. 2003. Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Engineering*, 57: 305-314.
- [10] Lazarides, H. N., Katsanidis, E. and Nickolaidis, A. 1995. Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering*, 25: 151-166.
- [11] Akgun, N.A. and Doymaz, I. 2005. Modelling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of Food Engineering*, 68: 455-461.
- [12] Peleg, M. 1988. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53: 1216-1219.
- [13] Cunha, L. M., Oliveira, F. A., Aboim, A. P., Frías, J.M. and Pinheiro Torres, A. 2001. Stochastic approach to the modelling of water losses during osmotic dehydration and improved parameter estimation. *International Journal of Food Science & Technology*, 36: 253-262.
- [14] Crank, J. 1975. *The Mathematics of Diffusion*. second ed. Clarendon Press, Oxford. p. 414.
- [15] Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J. and Rosselló, C. 1996. Drying models for green peas. *Food Chemistry*, 55: 121-128.
- [16] Heng, K., Guilbert, S. and Cuq, J. 1990. Osmotic dehydration of papaya: influence of process variables on the product quality. *Sciences des Aliments*, 10: 831-848.
- [17] Lević, L.B., Koprivica, G.B., Mišljenović, N.M., Filipčev, B.V., Šimurina, O.D. and Kuljanin, T.A. 2008. Effect of starch as an edible coating material on the process of osmotic dehydration of carrot in saccharose solution and sugar beet molasses. *Acta Periodica Technologica*, 39: 29-36.
- [18] Kaymak-Ertekin, F. and Sultanoğlu, M. 2000. Modelling of mass transfer during

- thin layer capsicum. Iranian Journal of Innovation in Food Science and Technology, 4: 33-42 [in Persian].
- [34] Mowla, D., Honarvar, B., Seif-kordi, A.A., Soltanieh, M. and Bastani, D. 2010. Experimental study on physical properties of potato in a convective-infra red combined dryer. Iranian Journal of Chemistry and Chemical engineering, 29: 81-93 [in Persian].
- [31] Sacilik, K., Elicin, A. K. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. Journal of Food Engineering, 73: 281-289.
- [32] Lee, S.K., Kim, W., Kim, H., Lee, H. J. and Han, J.W. 2011. Determination of boxthorn drying conditions and using agricultural dryer. Biosystem Engineering, 36: 273-278.
- [33] Shabani, B. and Tavakolipour, H. 2011. Mathematical modeling for drying kinetics of

Mathematical Modeling of Osmotic Dehydration and Hot-air Drying for Papaya Fruit Slices

Yousefi, A. R. ^{1*}, Seyvani, E. ²

1. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran
2. M.Sc. Student, Department of Food Science and Technology, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

(Received: 2016/03/04 Accepted: 2016/08/16)

In this research, the drying process of papaya slices was conducted at three temperature levels of 40, 50 and 60 °C and three thicknesses of 3, 5 and 7 mm in a hot-air oven. The velocity, relative and absolute humidity of the hot-air used were 1 ± 0.1 m/s, 30% and 0.6 ± 0.02 g water/kg dry air, respectively. An osmotic solution containing 50% sucrose solution was used for dehydration of papaya slices with 5 mm thickness. The osmotic parameters of water lost (WL), solid gain (SG) and weight reduce (WR) increased with increasing immersion time. The osmotic dehydration process was modeled by Plege, Azuara and Weibull models. In addition the kinetics of hot-air drying was modeled by 8 well-known thin layer mathematical models. The results demonstrated that the Plege and Azuara's models with R^2 and RMSE amounts of 0.992 and 0.179, respectively, had more precision to predict the SG values. Also, the two terms and exponential two terms models had the highest and lowest amounts of R^2 and RMSE, respectively, to estimate the MR (moisture ratio) values during hot-air drying. Increase in temperature resulted in an increase in the effective diffusivity coefficient, so that this coefficient reached to 7.58×10^{-10} m²/s at 60 °C from the initial value of 2.28×10^{-10} m²/s at 40 °C. The activation energy (E_a) calculated for the papaya slices were 48.61 kJ/mol. Analysis of variance results showed that the drying temperature had a significant effect on the color parameters compared to the control sample, and also the influence of temperature on shrinkage was significant ($p<0.05$).

Keywords: Papaya, Mathematical modeling, Osmotic solution, Hot-air oven, Thin layer drying

* Corresponding Author E-Mail Address: a_yousefi@bonabu.ac.ir