

# تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و مدل سازی ریاضی خشک کردن صمغ دانه بالنگو با فروسرخ

نوید گودینی<sup>a</sup>، اشرف گوهری اردبیلی<sup>b\*</sup>، فخرالدین صالحی<sup>c</sup>

<sup>a</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی بهار، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

<sup>b</sup> استادیار گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی بهار، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

<sup>c</sup> دانشیار گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی بهار، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۹

DOI:10.30495/JFTN.2022.65896.11190

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20080123.1401.19.4.4.1>

## چکیده

**مقدمه:** امروزه، خشک کردن محصولات کشاورزی روشی توسعه یافته است که با حذف بخشی از رطوبت منجر به پایداری فیزیکیوشیمیایی محصول شده و همچنین باعث تولید محصولات مختلف با خواص کیفی جدید و با ارزش غذایی و اقتصادی متفاوت می شود. ضریب نفوذ رطوبت مهمترین ویژگی در محاسبات خشک کردن است. در این پژوهش مدل سازی سینتیک خشک شدن صمغ دانه بالنگو در یک خشک کن فروسرخ بررسی شد.

**مواد و روش ها:** تأثیر فاصله نمونه ها از لامپ پرتو دهی در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی متر و اثر ضخامت صمغ درون ظرف در سه سطح ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ سانتی متر بر سرعت انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در طی فرآیند خشک شدن صمغ دانه بالنگو بررسی شد. مدل های استاندارد (ونگ و سینگ، هندسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، پیچ اصلاح شده، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی) جهت بررسی سینتیک خشک شدن بر داده های آزمایشی برازش داده شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

**یافته ها:** نتایج نشان داد فاصله نمونه ها از لامپ پرتو دهی و ضخامت نمونه ها بر سرعت انتقال جرم هنگام خشک شدن این صمغ اثر معنی داری دارند. با افزایش فاصله نمونه ها از منبع حرارتی از ۵ به ۷/۵ سانتی متر و از ۷/۵ به ۱۰ سانتی متر، زمان خشک شدن صمغ دانه بالنگو به ترتیب ۲۱/۴۹ درصد و ۱۵/۲۰ درصد افزایش یافت. اثر فاصله نمونه از لامپ حرارتی فروسرخ و ضخامت نمونه بر تغییرات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت صمغ دانه بالنگو بررسی و نشان داد که با کاهش فاصله و افزایش ضخامت نمونه ها مقادیر این ضریب افزایش می یابد. با کاهش فاصله نمونه از لامپ از ۱۰ به ۵ سانتی متر، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از  $4/82 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  به  $7/05 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  افزایش یافت.

**نتیجه گیری:** در مدل سازی فرآیند خشک کردن صمغ دانه بالنگو مدل پیچ نسبت به سایر مدل ها با بزرگترین مقدار ضریب تبیین و کوچکترین خطا، نتایج نزدیک تری به داده های آزمایش را داشت.

**واژه های کلیدی:** انتقال جرم، صمغ دانه بالنگو، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، مدل پیچ

## مقدمه

گیاه بالنگو یکی از گیاهان بومی ایران می باشد که در اکثر نقاط دنیا امکان کشت آن وجود دارد. در مقایسه با سایر هیدروکلوئیدها، صمغ حاصل از دانه بالنگو ویسکوزیته ظاهری بالاتری دارد (Satorabi *et al.*, 2021a). دانه های گیاه بالنگو دارای مقادیر زیادی صمغ با خواص عملکردی مناسب هستند که بعد از استخراج از این دانه ها و خشک شدن، می توانند به صورت پودر در فرمولاسیون محصولات غذایی مختلف استفاده شود. صمغ استخراج شده از دانه های بالنگو رطوبت بالایی داشته و به شدت نسبت به فساد حساس می باشد، لذا باید سریعاً خشک شود. در مجموع، هدف از فرآیند خشک کردن این صمغ ها، جلوگیری از فساد، افزایش زمان ماندگاری، کاهش وزن و صرفه جویی در هزینه حمل و نقل است. در همین راستا پژوهشی توسط Nasirpour و Amini Rastabi (۲۰۱۹) بر روی صمغ فارسی انجام شده است. در این پژوهش اثر تیمار حرارتی توسط هوای داغ با دماهای ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درجه سلسیوس، دمای خشک کن و غلظت محلول صمغ ورودی به خشک کن بر خصوصیات صمغ فارسی بررسی شده است. بر اساس نتایج گزارش شده توسط این پژوهشگران، ویسکوزیته صمغ به شدت وابسته به دمای خشک کن و شدت تیمار حرارتی بوده است، به گونه ای که با افزایش دمای خشک کن و تیمار حرارتی ویسکوزیته به صورت خطی کاهش یافته است. هیچ کدام از عوامل تیمار حرارتی، دمای خشک کن و غلظت محلول صمغ ورودی به خشک کن در سطح P کمتر از ۰/۰۵ تأثیر معنی داری بر ظرفیت جذب آب صمغ فارسی نداشتند؛ اما با افزایش دمای خشک کن و افزایش دمای تیمار حرارتی حلالیت افزایش یافته است.

در بین روش های مختلف فرآوری، خشک کردن فرآیندی است که طی آن فعالیت آبی ماده غذایی با حذف آب از طریق پدیده تبخیر کاهش می یابد؛ اما کیفیت محصولاتی که به روش سنتی خشک می شوند و به شکل بارزی تحت تأثیر تغییرات طی تولید و نگهداری هستند، نسبت به ماده غذایی اصلی کمتر است (Khodadadi *et al.*, 2017). اشعه فرورسرخ سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم بر روی محصول می شود که نسبت به خشک کن های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می رود سریع تر است و راندمان بالاتری

دارد. بیشتر اشعه فرورسرخ توسط مولکول های سطحی جذب می شود. این پدیده سبب گرم شدن سریع محصول شده و سبب کاهش تنش های حرارتی در محصول و در نتیجه حفظ کیفیت آن می شود. این موضوع می تواند زمان خشک کردن را کاهش دهد، هزینه انرژی را پایین آورده و همچنین دما در تمام نقاط نمونه به شکل یکسان توزیع می شود که منجر به تولید محصول دارای کیفیت بالاتری می شود (Farokhpour *et al.*, 2021; Rastogi, 2012; Salehi, 2020).

مدل سازی ریاضی فرآیند خشک کردن برای طراحی، بهبود سیستم های خشک کن موجود و حتی کنترل فرآیند استفاده می شود (Doymaz, 2011). برای مثال، Senadeera و همکاران (۲۰۲۰) اثر دمای خشک کن (۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درجه سلسیوس) و سرعت هوای خشک کن (۲/۳ m/s) را بر تغییر خصوصیات میوه خرمالو بررسی کردند و مدل های تجربی برای آن را یافتند. آنها دریافتند که مدل پیچ بهترین برازش را در رابطه با نسبت رطوبت با داده های آزمایشگاهی نشان داده است. در پژوهشی دیگر، Zojaji و همکاران (۲۰۱۶) سینتیک خشک کردن توت سیاه در آن ماکروویو را بررسی کردند. در این مطالعه برای فرآیند مدل سازی ریاضی، ۹ مدل تجربی بر داده های آزمایشگاهی برازش داده شد و نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی مدل های مورد بررسی نشان داد که مدل میدیلی بهترین برازش را با داده های به دست آمده نشان می دهد.

تاکنون در ارتباط با بررسی سینتیک انتقال جرم و محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت هنگام خشک کردن صمغ دانه بالنگو با روش فرورسرخ تحقیقی صورت نگرفته است؛ لذا، هدف از این مطالعه، بررسی اثر ضخامت لایه صمغ و فاصله لامپ از نمونه بر سرعت انتقال جرم در صمغ دانه بالنگو و مدل سازی فرآیند با مدل های تجربی می باشد.

## مواد و روش ها

### - استخراج صمغ دانه بالنگو

در این پژوهش دانه های بالنگو از استان کرمانشاه تهیه و ناخالصی آن ها کاملاً جداسازی گردید. جهت استخراج صمغ، ابتدا دانه های بالنگو به مدت ۲۰ دقیقه درون آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس و نسبت آب به دانه برابر ۲۰ به ۱

محتوای رطوبت اولیه بر مبنای خشک و  $M_e$  محتوای رطوبت تعادلی (گرم آب بر گرم ماده خشک) است.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر  $M_e$  در مقایسه با مقادیر  $M_0$  و  $M_t$  بسیار کوچک می‌باشد؛ بنابراین می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نمی‌باشد (Doymaz, 2007).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

#### – محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

در سراسر فرآیند خشک کردن، انتشار پدیده‌ی غالب انتقال رطوبت از مرکز نمونه به سطح است، بنابراین در این مطالعه فضای انتقال جرم به صورت یک صفحه تخت (تیغه) در نظر گرفته شد و حذف رطوبت بر اساس قانون دوم فیک، طبق رابطه‌ی ۳ محاسبه شد (Wong, 2001).

(۳)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} (2n+1)^2\right)$$

در این رابطه،  $L$  نصف ضخامت نمونه (برحسب متر)،  $n$  تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله،  $t$  زمان خشک شدن ( $s$ ) و  $D_{eff}$  ضریب نفوذ مؤثر ( $m^2 s^{-1}$ ) می‌باشند. به صورت متداول، جمله‌ی اول این سری در نظر گرفته می‌شود و معادله‌ی بالا به صورت رابطه ۴ ساده شده و ضریب نفوذ مؤثر از طریق این رابطه و محاسبه شیب به دست می‌آید.

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (4)$$

با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین رابطه ۴، رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$\ln MR = Ln \frac{8}{\pi^2} + \left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

قرار گرفتند (Satorabi et al., 2021b). سپس جهت جدا کردن صمغ خارج شده از دانه‌ها، از دستگاه آمیوه‌گیری (ناسیونال، مدل MG-176NR، ژاپن) استفاده شد. برای هر مرحله از خشک کردن، صمغ تازه استخراج و به خشک کن منتقل شد. در مرحله بعدی صمغ استخراج شده درون ظروف آلومینیومی مخصوص خشک کردن با سامانه فرورسرخ با ضخامت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر ریخته شده و درون خشک کن فرورسرخ با ابعاد ۴۴ سانتی‌متر طول، ۲۰ سانتی‌متر عرض و ۴۰ سانتی‌متر ارتفاع قرار گرفت. میانگین رطوبت اولیه صمغ استخراج شده توسط آون (شیماز، ایران) در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس (با دقت ۱ درجه سلسیوس) اندازه‌گیری شد که ۹۹٪ بر پایه مرطوب به دست آمد.

#### – فرآیند خشک کردن

خشک کردن مواد غذایی یک فرآیند پیچیده شامل انتقال هم‌زمان جرم و حرارت است که دچار تغییرات متعددی در ترکیبات شیمیایی، ساختاری و ویژگی‌های فیزیکی خود می‌شود. جهت خشک کردن صمغ استخراج شده از خشک کن فرورسرخ با توان ۲۵۰ وات استفاده گردید و فاصله نمونه‌ها از سطح لامپ در سه فاصله ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر تنظیم شد.

#### – محتوای رطوبت

کاهش محتوای رطوبت صمغ استخراج شده از دانه بالنگو، بر مبنای خشک در برابر زمان خشک کردن رسم و تأثیر تیمارهای مختلف خشک کردن بر آن مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی<sup>۱</sup> با دقت ۰/۰۱ ± گرم که در زیر خشک کن قرار گرفته بود، ثبت گردید (Satorabi et al., 2021a).

#### – نسبت رطوبت

پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن صمغ دانه بالنگو با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد که در آن،  $MR$ : نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$  محتوای رطوبت بر مبنای خشک در هر زمان  $t$  (گرم آب بر گرم ماده خشک)،  $M_0$

<sup>1</sup> Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)

تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و مدل سازی ریاضی خشک کردن صمغ دانه بالنگو با فروسرخ

انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد. برای رسم نمودارها نیز از برنامه Excel (۲۰۰۷) استفاده شد.

### یافته‌ها

#### - بررسی سینتیک انتقال جرم

اشعه فروسرخ سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم در محصول می‌شود که نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود، سریع‌تر است و بازده بالاتری دارد (Ratti and Mujumdar, 1995). نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر فاصله نمونه‌ها از لامپ فروسرخ و ضخامت صمغ موجود در ظرف بر زمان خشک شدن صمغ دانه بالنگو آنالیز و در جدول ۲ به نمایش درآمده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود اثر فاکتورهای فاصله و ضخامت در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است ( $P < 0.05$ ) اما اثر متقابل آن‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار نشده است ( $P > 0.05$ ). در شکل ۱ اثر فاصله نمونه‌ها از لامپ فروسرخ و ضخامت صمغ موجود در ظرف بر زمان خشک شدن صمغ دانه بالنگو گزارش شده است. همان‌گونه که در این دیده می‌شود، با کاهش فاصله لامپ از سطح نمونه‌ها و همچنین کاهش ضخامت نمونه، سرعت خشک شدن نمونه افزایش یافته است.

سپس ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های تجربی ( $LnMR$ ) در مقابل زمان خشک کردن و با استفاده از رابطه ۶ محاسبه گردید.

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (6)$$

در این رابطه، Slope شیب خط می‌باشد.

#### - مدل سازی سینتیک

در این مطالعه، به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن صمغ دانه بالنگو، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های تجربی مختلف خشک کردن، مدل سازی سینتیک انجام گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل سازی فرآیند خشک کردن صمغ دانه بالنگو در جدول ۱ به نمایش درآمده است (Salehi and Satorabi, 2021).

در این مطالعه به منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها، از نرم افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

#### - تجزیه و تحلیل آماری

این پژوهش در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تمام آزمون‌ها در سه تکرار

جدول ۱- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای مدل سازی سینتیک خشک شدن صمغ دانه بالنگو

Table 1- Mathematical models used to model the drying kinetics of Balangu seed gum

Model	مدل	معادله
Wang and Singh	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$
Henderson and Pabis	هندسون و پابیس	$MR = a \exp(-kt)$
Approximation of diffusion	تقریب انتشار	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
Page	پیج	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified Page -II	پیج اصلاح شده	$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$
Newton	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$
Midilli	میدیلی	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Logarithmic	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$

MR: نسبت رطوبت، t زمان (min) و a، b، c، l، n و k ثابت‌های مدل‌ها می‌باشند.

زمان در فواصل مختلف و ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. شکل ۳ نیز روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت نسبت به زمان برای ضخامت‌های مختلف در فاصله ۷/۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. شیب این خطوط جهت محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده گردید.

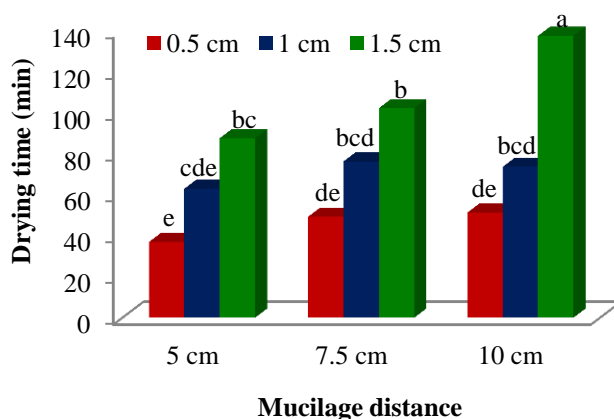
**نتایج محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت**

بررسی سینتیک انتقال جرم و ضرایب نفوذ رطوبت می‌تواند یک ابزار سودمند برای کنترل شرایط فرآیند خشک‌کردن و افزایش کیفیت محصول باشد. شکل ۲ روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت (LnMR) را نسبت به

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس برای پارامترهای زمان خشک‌کردن صمغ دانه بالنگو در طی خشک شدن با فرسرخ.

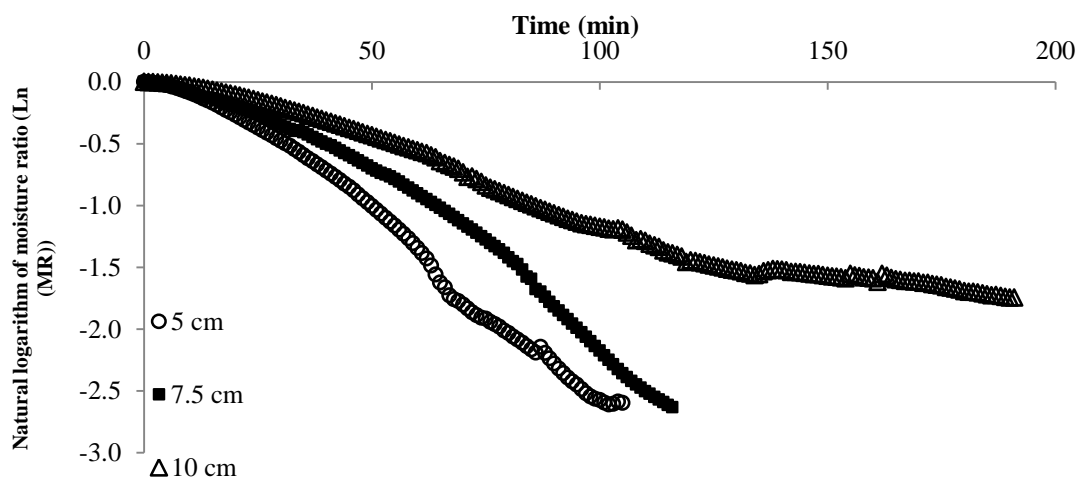
**Table 2- Results of analysis of variance for drying time parameters of Balangu seed gum during drying by infrared**

Sources of changes	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	P
Distance	2	2817.9	1408.9	0.029
Thickness	2	18307.9	9153.9	0.000
Distance × Thickness	4	1805.9	451.5	0.275
Error	18	5822.7	323.5	
Total	26	28754.3		



**Figure 1- Average of Balangu seed gum drying time at different drying conditions by infrared system Means with different superscripts differ significantly (P<0.05).**

شکل ۱- میانگین زمان خشک شدن صمغ دانه بالنگو در شرایط مختلف خشک کردن با سامانه فرسرخ



**Figure 2- Variations of the natural logarithm of moisture ratio (Ln (MR)) values versus drying time of Balangu seed gum at different samples distance (1.5 cm thickness).**

شکل ۲- تغییرات لگاریتم طبیعی مقادیر نسبت رطوبت (Ln (MR)) در مقابل زمان خشک شدن صمغ دانه بالنگو در فواصل مختلف نمونه‌ها (ضخامت برابر ۱/۵ سانتی‌متر).

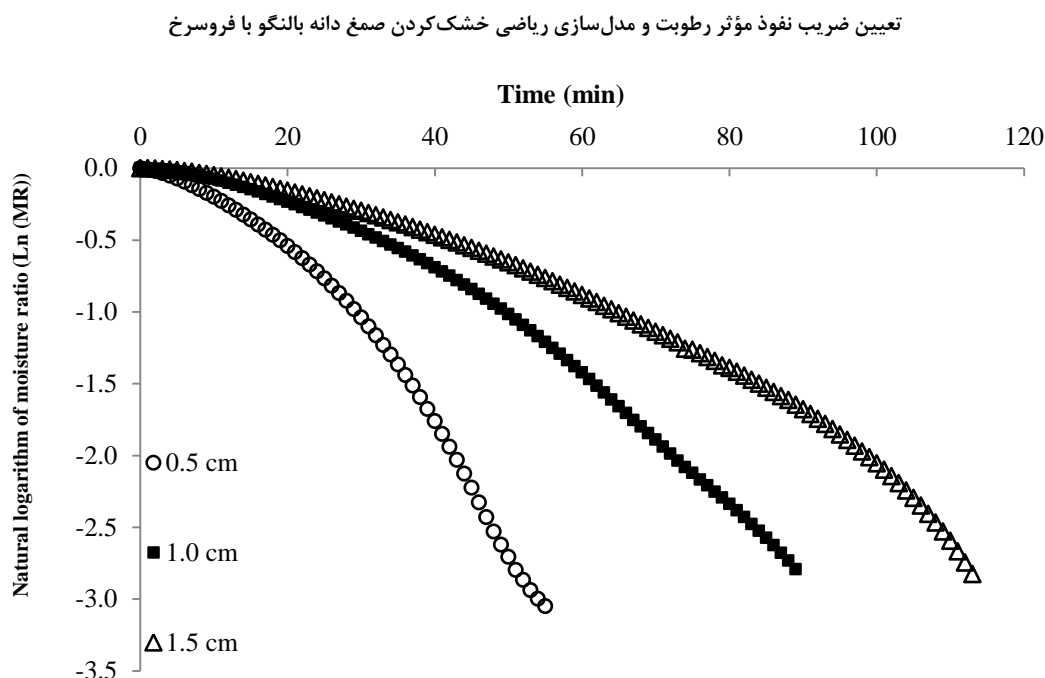


Figure 3- Variations of the natural logarithm of moisture ratio (Ln (MR)) values versus drying time of Balangu seed gum at different samples thickness (7.5 cm distance).

شکل ۳- تغییرات لگاریتم طبیعی مقادیر نسبت رطوبت (Ln (MR)) در مقابل زمان خشک شدن صمغ دانه بالنگو در فواصل مختلف نمونه‌ها (فاصله برابر ۷/۵ سانتی‌متر).

توسط مدل پیچ با نتایج تجربی مقایسه شده است. این شکل به خوبی توانایی مدل پیچ برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار خشک شدن صمغ دانه بالنگو را نشان می‌دهد.

### بحث

#### - بررسی سینتیک انتقال جرم

با کاهش فاصله لامپ پرتودهی فروسرخ از سطح نمونه‌ها، دمای سطح نمونه‌ها سریع‌تر افزایش یافته و این افزایش دما باعث افزایش فشار بخار در داخل نمونه و در نتیجه افزایش سرعت خروج رطوبت از محصول می‌گردد. با کاهش فاصله لامپ از سطح نمونه‌ها از ۱۰ به ۵ سانتی‌متر، زمان خشک شدن صمغ دانه بالنگو ۶۷/۹ درصد کاهش یافت. بیش‌ترین زمان خشک شدن مربوط به نمونه با ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر بود که در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح لامپ قرار داشت و کمترین زمان خشک شدن نیز مربوط به نمونه با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر بود که در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح لامپ قرار داشت که میانگین مدت‌زمان خشک شدن برای این تیمار ۳۷ دقیقه به دست آمد. این نتایج هم‌راستا با نتایج Amini و همکاران (۲۰۲۰) برای خشک کردن موسیلاژ دانه ریحان با خشک‌کن

مقادیر مختلف میزان ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول ۳ گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با کاهش فاصله نمونه از لامپ و افزایش ضخامت نمونه‌ها، به دلیل افزایش نفوذ پرتو فروسرخ و افزایش سرعت انتقال حرارت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است. با کاهش فاصله نمونه از لامپ از ۱۰ به ۵ سانتی‌متر، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از  $4/82 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  به  $7/05 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  افزایش یافت (شکل ۴).

#### - انتخاب بهترین مدل برای برازش داده‌ها

با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل پیچ در طی بررسی سینتیک خشک شدن صمغ دانه بالنگو، نتایج این مدل در جدول ۴ گزارش شده است. در این جدول ضریب تعیین، خطای استاندارد و ضرایب این مدل ارائه شده است. در مدل‌سازی فرآیند خشک کردن صمغ دانه بالنگو مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها با بزرگ‌ترین مقدار ضریب تبیین و کوچک‌ترین خطا، نتایج نزدیک‌تری به داده‌های آزمایش را داشت. لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن این نوع صمغ‌ها با استفاده از سامانه فروسرخ توصیه می‌شود. در شکل ۵ نیز داده‌های به دست آمده

فروسرخ است. این پژوهشگران گزارش کرده‌اند که تغییر فاصله لامپ حرارت دهی فرسرخ از سطح نمونه‌های مرطوب بر زمان خشک شدن آنها اثر معنی‌داری دارد و با کاهش فاصله لامپ، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد.

جدول ۳- مقادیر ضریب نفوذ مؤثر ( $D_{eff}$ ) صمغ دانه بالنگو در شرایط مختلف خشک کردن فرسرخ

Table 3- Effective moisture diffusivity values ( $D_{eff}$ ) of Balangu seed gum at different infrared drying conditions

Distance (cm)	Thickness (cm)	Effective diffusivity ( $m^2s^{-1}$ )	r
5	0.5	$2.44 \times 10^{-9}$	0.981
5	1.0	$7.03 \times 10^{-9}$	0.972
5	1.5	$1.17 \times 10^{-8}$	0.975
7.5	0.5	$2.21 \times 10^{-9}$	0.976
7.5	1.0	$5.67 \times 10^{-9}$	0.979
7.5	1.5	$9.17 \times 10^{-9}$	0.974
10	0.5	$1.93 \times 10^{-9}$	0.983
10	1.0	$5.52 \times 10^{-9}$	0.942
10	1.5	$7.02 \times 10^{-9}$	0.972

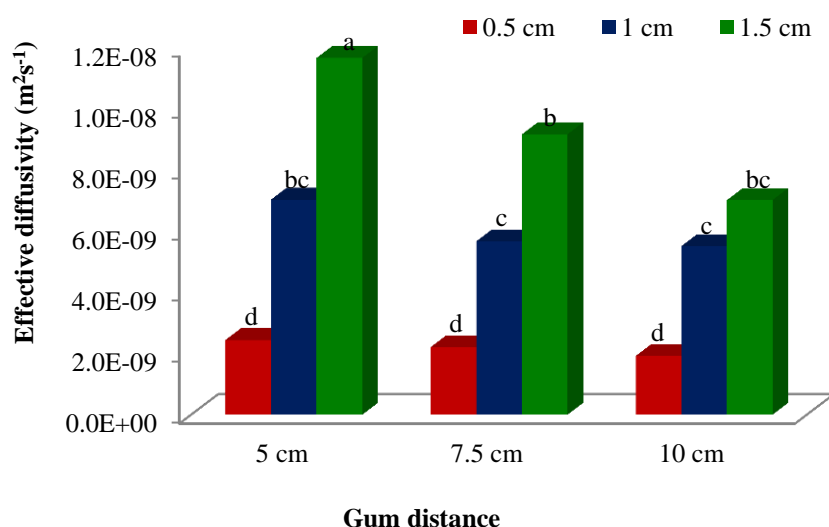


Figure 4- Average of effective moisture diffusivity values ( $D_{eff}$ ) of Balangu seed gum at different infrared drying conditions

Means with different superscripts differ significantly ( $P < 0.05$ ).

شکل ۴- میانگین ضریب نفوذ مؤثر ( $D_{eff}$ ) صمغ دانه بالنگو در شرایط مختلف خشک کردن فرسرخ

جدول ۴- ضرایب مدل پیچ برای صمغ دانه بالنگو در شرایط مختلف خشک کردن فرسرخ

Table 4- Page model constants for Balangu seed gum at different infrared drying conditions

Distance (cm)	Thickness (cm)	k	n	SSE	r	RMSE
5	0.5	0.0104	1.4770	0.0108	0.998	0.0168
5	1.0	0.0038	1.5477	0.0108	0.999	0.0122
5	1.5	0.0023	1.5577	0.0224	0.999	0.0148
7.5	0.5	0.0040	1.6387	0.0063	0.999	0.0106
7.5	1.0	0.0020	1.6513	0.0056	0.999	0.0080
7.5	1.5	0.0025	1.4953	0.0329	0.998	0.0160
10	0.5	0.0050	1.5930	0.0093	0.999	0.0066
10	1.0	0.0009	1.7970	0.0442	0.997	0.0239
10	1.5	0.0021	1.5090	0.1120	0.995	0.0213

تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و مدل سازی ریاضی خشک کردن صمغ دانه بالنگو با فرورسرخ

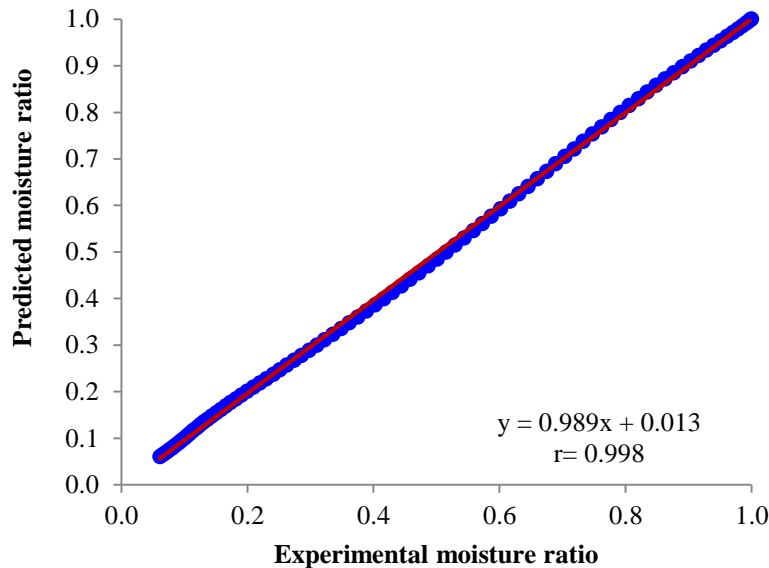


Figure 5- Comparison of fitted data by Page model with experimental results (7.5 cm distance and 1.0 cm thickness).  
شکل ۵- مقایسه داده‌های برازش شده توسط مدل پیچ با نتایج تجربی (۷/۵ سانتی متر فاصله و ۱/۰ سانتی متر ضخامت)

سانتی متر، این ضریب به ترتیب از  $۱۴/۴ \times ۱۰^{-۹}$  به  $۵/۱۶ \times ۱۰^{-۹}$  مترمربع بر ثانیه و از  $۱۳/۲ \times ۱۰^{-۹}$  به  $۴/۳۱ \times ۱۰^{-۹}$  مترمربع بر ثانیه کاهش یافته است.

#### انتخاب بهترین مدل برای برازش داده‌ها

با به کارگیری مدل‌های ریاضی می‌توان با صرف هزینه و زمان کمتر به درک بهتر از فرآیند خشک کردن به عنوان تابعی از متغیرهای گوناگون دست یافت. با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه در طی فرآیند خشک کردن صمغ دانه بالنگو (با استفاده از رابطه شماره ۲) و 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 و حداقل مقادیر خطا باشد. نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، مطابق با شرایط ذکر شده، در مورد فرآیند خشک کردن صمغ دانه بالنگو، مدل پیچ است.

#### نتیجه گیری

در این پژوهش اثر فاصله نمونه از لامپ پرتودهی فرورسرخ و ضخامت نمونه‌ها بر سینتیک خشک کردن صمغ دانه بالنگو در یک خشک کن آزمایشگاهی فرورسرخ مورد

#### نتایج محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

با افزایش ضخامت نمونه‌های صمغ دانه بالنگو از ۰/۵ به ۱ و از ۱ به ۱/۵ سانتی متر، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت به ترتیب از  $۲/۱۹ \times ۱۰^{-۹} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  به  $۶/۰۷ \times ۱۰^{-۹} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  و از  $۶/۰۷ \times ۱۰^{-۹} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  به  $۹/۲۹ \times ۱۰^{-۹} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  افزایش می‌یابد. این بخش از نتایج هم‌راستا با نتایج Mohamadi و همکاران است. این پژوهشگران بهینه‌سازی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک کردن برش‌های میوه "به" را بررسی و گزارش کردند که با افزایش ضخامت در تمامی دماهای مورد مطالعه، ضریب نفوذ رطوبت دارای روند افزایشی بوده است. Amini و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر خشک کردن فرورسرخ بر سینتیک خشک شدن موسیلاژ (صمغ) دانه مرو را بررسی کردند. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای سیستم خشک‌کن فرورسرخ شامل توان فرورسرخ، فاصله صمغ از سطح لامپ و ضخامت موسیلاژ بر سینتیک خشک شدن صمغ دانه مرو در سیستم خشک‌کن فرورسرخ بررسی شده است. این پژوهشگران گزارش کرده‌اند که متوسط نفوذ مؤثر رطوبت ( $D_{\text{eff}}$ ) با افزایش توان لامپ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات از  $۴/۶۱ \times ۱۰^{-۹}$  به  $۱۵/۸ \times ۱۰^{-۹}$  مترمربع بر ثانیه افزایش یافته است، اما با افزایش فاصله صمغ از ۴ به ۱۲ سانتی متر و کاهش ضخامت صمغ از ۱/۵ به ۰/۵



temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation* 35 (2), 280-289.

Farokhpour, F., Roomiani, L. & Zarinabadi, S. (2021). Experimental investigation of fish fillet drying process using IR radiation. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 10 (1), 83-94.

Khodadadi, M., Rahmati, M.H., Alizadeh, M.R. & Rezaei Asl, A. (2017). Investigating the effect of air temperature and paddy final moisture on the crack percent and conversion coefficient of Iranian rice varieties in fluidized bed dryer. *Journal of Food Science and Technology*, 13 (60), 81-91 [In Persian].

Mohamadi, M., Pour Falah, Z., Nahardani, M. & Meshkani, S.M. (2015). Mathematical modeling and optimization of drying kinetic of quince (*Cydonia oblonga*) fruit slices. *Journal of Food Technology and Nutrition*, 12 (1), 49-58.

Rastogi, N.K. (2012). Recent trends and developments in infrared heating in food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52 (9), 737-760.

Ratti, C. & Mujumdar, A. (1995). Infrared drying. *Handbook of Industrial Drying*, Ed. Mujumdar, A. S., Second edition, New York, NY, Marcel Dekker Inc. 1, 567-588.

Salehi, F. (2020). Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review. *International Journal of Fruit Science*, 20 (3), 586-602.

Salehi, F. & Satorabi, M. (2021). Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums. *International Journal of Fruit Science*, 21 (1), 519-527.

Satorabi, M., Salehi, F. & Rasouli, M. (2021a). The influence of xanthan and balangu seed gums coats on the kinetics of infrared drying of apricot slices: GA-ANN and ANFIS modeling. *International Journal of Fruit Science*, 21 (1), 468-480.

Satorabi, M., Salehi, F. & Rasouli, M. (2021b). Effect of edible coatings on the color and surface changes of apricot slices during drying in infrared system. *Food science and technology*, 18 (112), 21-30.

Senadeera, W., Adiletta, G., Önal, B., Di Matteo, M. & Russo, P. (2020). Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices. *Foods*, 9 (1), 101.

Wong, J.Y. (2001). *Theory of ground vehicles*. John Wiley & Sons.

مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان دادند که جهت به حداقل رساندن زمان خشک کردن و سرعت بخشیدن به فرآیند خشک کردن، فاکتورهای ضخامت نمونه و فاصله نمونه از منبع پرتو دهی اثر معناداری طی فرآیند داشته و باید طی خشک کردن صمغ دانه بالنگو با خشک کن فروسرخ به این دو فاکتور توجه کرد. بیشترین زمان خشک شدن (۱۹۲ دقیقه) مربوط به نمونه با ضخامت ۱/۵ سانتی متر بود که در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح لامپ قرار داشت و کمترین زمان خشک شدن (۳۲ دقیقه) نیز مربوط به نمونه با ضخامت ۰/۵ سانتی متر بود که در فاصله ۵ سانتی متری از سطح لامپ قرار داشت. با کاهش فاصله نمونه از لامپ و افزایش ضخامت نمونه‌ها، به دلیل افزایش نفوذ پرتو فروسرخ و افزایش سرعت انتقال حرارت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است. با کاهش فاصله نمونه از لامپ از ۱۰ به ۵ سانتی متر، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از  $4/82 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  به  $9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$   $7/05 \times 10^{-9}$  افزایش یافت. برای مدل سازی سینتیک خشک شدن صمغ دانه بالنگو، از مدل های مختلفی استفاده گردید که در نهایت مدل پیچ به دلیل بالا بودن شاخص ضریب تبیین و پایین بودن خطای محاسبه شده، جهت بررسی سینتیک و پیش بینی روند خشک شدن این صمغ انتخاب گردید.

## منابع

Amini, G., Salehi, F. & Rasouli, M. (2020). Drying process modeling of basil seed mucilage by infrared dryer using artificial neural network. *Journal of Food Science and Technology*, 17 (106), 23-31 [In Persian].

Amini, G., Salehi, F. & Rasouli, M. (2022). Effect of infrared drying on drying kinetics and color changes of wild sage seed mucilage. *Journal of Agricultural Machinery*, 12 (1), 67-79.

Amini Rastabi, J. & Nasirpour, A. (2019). Effect of drying temperature, heating treatment and gum concentration on functional properties of farsi gum. *Journal of Food Science and Technology*, 15(85), 233-244 [In Persian].

Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering* 79 (1), 243-248.

Doymaz, I. (2011). Drying of eggplant slices in thin layers at different air

Zojaji, M., Mazaheri, A.F., Namayande, S. & Abolhasani, M. (2016). Investigation of black mulberry drying kinetics and energy

consumption under microwave oven. Journal of Food Technology and Nutrition, 13 (3), 57-64.

# Determination of the Effective Moisture Diffusivity Coefficient and Mathematical Modeling of Balangu Seed Gum Drying with Infrared

N. Godini<sup>a</sup>, A. Gohari Ardabili<sup>a\*</sup>, F. Salehi<sup>c</sup>

<sup>a</sup> MSc Student of the Department of Food Science and Technology, Bahar Faculty of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

<sup>b</sup> Assistant Professor of the Department of Food Science and Technology, Bahar Faculty of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

<sup>c</sup> Associate Professor of the Department of Food Science and Technology, Bahar Faculty of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Received: 8 February 2022

Accepted: 29 April 2022

## Abstract

**Introduction:** Today, drying of agricultural products is a developed method that removes part of the moisture leads to physicochemical stability of the product, also, produces different products with new qualitative properties and different nutritional and economical value. Moisture diffusivity coefficient is the most crucial property in drying calculations.

**Materials and Methods:** In this study, drying kinetics modeling of Balangu seed gum in an infrared dryer was investigated. The effect of samples distance from the radiation lamp in three levels of 5, 7.5 and 10 cm and the effect of gum height in the container in three levels of 0.5, 1.0 and 1.5 cm on the mass transfer rate and effective moisture diffusivity coefficient during the dry process of Balangu seed gum was investigated. Standard models (Wang and Singh, Henderson and Pabis, Approximation of diffusion, Page, Modified Page, Newton, Midilli, and Logarithmic) were fitted to experimental data to study the drying kinetics and was analyzed.

**Results:** The results showed that samples distance from the radiation lamp and samples thickness had significant effect on the mass transfer rate during drying of gum. By increasing samples distance from the heat source from 5 to 7.5 cm and from 7.5 to 10 cm, the drying time of Balangu seed gum increased by 21.49% and 15.20%, respectively. The effect of sample distance from infrared heat lamp and sample thickness on changes in effective moisture diffusivity coefficient of Balangu seed gum was investigated and results showed that this coefficient values were increased with decreasing in distance and increasing samples thickness. By reducing sample distance from the lamp from 10 to 5 cm, it was observed that the effective moisture diffusivity coefficient increased from  $4.82 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  to  $7.05 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

**Conclusion:** In drying process modeling of Balangu seed gum, the Page model with the highest coefficient of determination and the lowest error, had closer results to the experimental data than the other models.

**Keywords:** *Balangu Seed Gum, Effective Moisture Diffusivity Coefficient, Mass Transfer, Page Model.*

\* Corresponding Author: a.gohari@basu.ac.ir; aagohari@yahoo.com