



مدل‌سازی خشک شدن ریشه اکیناسه با استفاده از خشک کن مادون قرمز

زهرا رستمی قرخلو^۱، فاروق شریفیان^{۲*}، امیر رحیمی^۳، ابوالفضل آخوندزاده یامچی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه؛ St_Za.rostami@urmia.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه F.sharifian@urmia.ac.ir

^۳ استادیار گروه زراعت، دانشگاه ارومیه، A.rahimi@urmia.ac.ir

^۴ دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، A.akhoundzadeh@urmia.ac.ir

چکیده

سنتیک خشک کردن ریشه‌ی اکیناسه در سه دمای ۴۰، ۴۵ و ۴۹ درجه سلسیوس در سه فاصله‌ی ۷، ۱۱ و ۱۵ سانتی‌متر انجام شد. مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با استفاده از قانون دوم فیک، محاسبه و فرآیند خشک کردن به وسیله‌ی معادلات ریاضی، مدل‌سازی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش دمای خشک کن، زمان لازم برای خشک شدن، نرخ خشک شدن و ضریب نفوذ مؤثر کاهش می‌یابد. اما تغییر فاصله از لامپ‌ها تأثیر معنی‌داری بر روی زمان خشک شدن نمونه‌ها ندارد. بهترین مدل‌ها برای نمونه خشک‌شده‌ی دستگاه مادون قرمز در ۴۹ درجه سلسیوس به ترتیب میدلی، دو جمله‌ای با ضریب تبیین، ۰/۹۹۹۸۸۴ و ۰/۹۹۹۶۴۷، مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۰۰۴۳۲۲ و ۰/۰۰۷۵۵۱ و مربع کای کاهش یافته ۰/۰۰۰۰۳۱ و ۰/۰۰۰۰۹۵ بودند.

کلمات کلیدی: اکیناسه، خشک کردن، مادون قرمز، زمان خشک کردن، ضریب نفوذ.

* نویسنده مسئول: F.sharifian@urmia.ac.ir



مدل‌سازی خشک شدن ریشه اکیناسه با استفاده از خشک کن مادون‌قرمز

مقدمه

اکیناسه گیاهی علفی و چندساله با نام علمی (*Echinaceae*) متعلق به خانواده میناسانان (گل ستاره) (*Asteraceae*) می‌باشد. ترکیبات ریشه گیاه در مقایسه با قسمت‌های هوایی آن بسیار متفاوت است، به طوری که ریشه، روغن‌های فرار و آلکالوئیدهای پیرولیزیدین بیشتری نسبت به قسمت‌های هوایی گیاه دارد [11]. اسید سیکوریک، ترکیب اصلی ریشه اکیناسه، یک نشانگر مناسب از کیفیت محصول حاوی پوره پودر اکیناسه است، زیرا دارای خواص قوی آنتی‌اکسیدان، ایمنی و ضدویروسی است و حساسیت به تخریب دارد [20]. با توجه به محدودیت روز افزون استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها و انحصاری بودن درمان برخی از بیماری‌ها با گیاهان دارویی اکیناسه در تغذیه‌ی طیور عملکرد و ایمنی جوجه‌های گوشتی را بیشتر می‌کند و از ابتلای آن‌ها به بیماری به شدت جلوگیری می‌کند [10]. خوراکی ماهی با افزودن اکیناسه می‌تواند به‌عنوان یک مکمل غذایی در پیشگیری از بیماری‌های ماهی ناشی از استرس اکسیداتیو مورد استفاده قرار گیرد [18]. بومیان آمریکا از اوایل قرن ۱۷ اکیناسه را برای درمان مارگزیدگی، بیماری‌های لثه و دهان، سرماخوردگی، سرفه، مسمومیت‌های خونی، گلودرد، درد معده و روده استفاده می‌نمودند. این گیاه همچنین از دیرباز برای درمان مخملک، سفلیس، مالاریا و دیفتتری به کار می‌رفت [17]. سازمان بهداشت جهانی (WHO) نیز مصرف موضعی آن را، در درمان التهابات پوستی تأیید کرده است و همچنین به‌عنوان کاندیدای درمان بیماری ایدز مطرح می‌باشد [8]. در حال حاضر چند دارو از این گیاه در ایران تولید شده ولی به دلیل کمبود پیکر رویشی آن تاکنون وارد بازار دارویی کشور نشده است. با توجه به اهمیت و حساسیت گیاه اکیناسه نسبت به اعمال حرارت در فرایند خشک کردن ضرورت انجام این تحقیق به این دلیل می‌باشد که ریشه‌ی اکیناسه همچون سایر گیاهان دارویی حساسیت زیادی در برابر عمل خشک کردن به لحاظ حفظ کیفیت و ترکیبات معطر دارد، از پارامترهای بسیار مهم و مؤثر در فرآیند خشک کردن، تغییرات دما است که اثرات زیان‌باری بر گیاه دارویی می‌گذارد چراکه با افزایش دما، بافت‌های ماده آسید دیده و علاوه بر تغییر رنگ، میزان چروکیدگی در سطح زیاد شده، که این پدیده فرایند خشک کردن و به دنبال آن باز جذب آب را با مشکل مواجه می‌کند. خشک کردن گیاهان دارویی به‌منظور تلفات کم‌تر و کیفیت مناسب‌تر، که تحت تأثیر تغییرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است و چون مکانیزم انتقال حرارت تابش مادون‌قرمز، جریان هوای گرم نیست جزو بهترین روش‌های توصیه شده می‌باشد [6]. خشک کردن محصول در دمای مناسب نقش مهمی در حفظ کیفیت مواد مؤثره آن‌ها دارد. تحقیقات انجام شده روی ریشه گونه پورپورا نشان می‌دهد، چنانچه برای خشک کردن از دمای بیش از ۴۰ درجه سلسیوس استفاده شود، از مقدار اسید شیکوریک و همچنین ترکیب‌های آلکیل آمیدی آن به شدت کاسته می‌شود. خشک کردن ریشه اکیناسه به‌وسیله خشک کن مادون‌قرمز یک‌راه مؤثر برای ماندگاری بالاتر و استفاده خارج از فصل محصول می‌باشد که از نظر کیفیت در سطح بالایی قرار دارد و باعث کاهش انرژی مصرفی و مدت‌زمان فرآیند می‌شود. در خشک کن مادون‌قرمز وقتی که اشعه به سمت محصول تابانده می‌شود، با توجه به نوع محصول، میزان آب، ضخامت و ماهیت فیزیکوشیمیایی، بخشی از طول موج اشعه تابیده شده، به داخل محصول نفوذ کرده و گرادیان حرارتی در داخل جسم در طی مدت کوتاهی به شدت افزایش پیدا می‌کند [13]. طی تحقیقی که بر روی خشک کردن به روش لایه‌نازک گندم انجام گرفته شده است مشاهده شده که دما اثر زیادی بر روی سرعت خشک کردن دارد درحالی که سرعت جابه‌جایی و رطوبت نسبی هوای خشک کن اثر کمی روی سرعت خشک کردن دارند [12]. همچنین نمونه‌های سیر (*Allium sativum* L.) و هویج (*Daucus carota* L.) با خشک کن مادون‌قرمز خشک

شدند و مشاهده شد که در مقایسه با خشک کن ماکروویو و هوای گرم در حفظ صفات کیفی برتری داشت [2]. تحقیقات تئوری به کمک مدل سازی ریاضی و شبیه سازی عددی، یک ابزار قدرتمند و سریع جهت آنالیز روند انتقال جرم و گرما تحت شرایط واقعی

خشک کردن را فراهم می کند. مدل سازی عملیات خشک کردن به دلیل هم زمانی انتقال جرم و گرما بین ماده خشک شونده و حامل انرژی، پیچیده است [3]. پژوهش های قابل توجهی در زمینه به کارگیری برنامه های کامپیوتری کارآمد جهت حل عددی صورت گرفته است. در مدل سازی خشک کردن، آزمایش ها در سه سطح دمایی ۵۵، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد و سرعت ۲-۴ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی بین ۱۰-۲۵٪ انجام شد. در این تحقیق مدل هنرسون و پاپیس^۱ اصلاح شده و مدل ورمای^۲ و همکاران نتایج بهتری نشان دادند. [4]. مدل سازی سینتیک خشک کردن ریشه ی اکیناسه و دستیابی به یک روش جدید برای خشک کردن این محصول و همچنین استفاده از نتایج تحقیق در توسعه ی فرایند خشک کردن گیاهان دارویی از اهداف تحقیق می باشد.

مواد و روش

تهیه گیاه

اکیناسه در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه در گلدان ها شامل خاک زراعی، کود دامی پوسیده و ماسه به ترتیب با نسبت ۲: ۱: ۱ کشت شد. پس از برداشت ریشه گیاهان بلافاصله عمل خشک کردن انجام گرفت. از آنجا که ریشه ها به گل ولای آلوده می باشند، با آب مقطر شسته شدند و بلافاصله با دستمال مخصوص رطوبت گیری می شوند، سپس به قطعات ۳ سانتی متری برش خوردند. جهت اندازه گیری رطوبت اولیه اکیناسه از روش (AOAC, 1990) استفاده می شود. بدین منظور، ۱۰۰ گرم از ریشه تریا ترازوی آزمایشگاهی با دقت 0/001 گرم مدل (DJ-V320A) اندازه گیری شده سپس در داخل آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. و بعد از بیرون آوردن نمونه، بلافاصله نمونه ها را وزن کرده و وزن ثانویه آن ها به دست آمد و رطوبت اولیه اکیناسه بر مبنای وزن خشک محاسبه گردید [9]. میزان رطوبت اولیه اکیناسه حدود ۷۸,۲٪ می باشد که جهت نگهداری باید به کمتر از ۱۲٪ کاهش یابد. بدین ترتیب فرایند خشک کردن اکیناسه امری ضروری است و چون تبخیر رطوبت از سطح است، با ایجاد یک مقاومت در انتقال آب به سطح محصول، شدت خشک کردن در مراحل پایانی کاهش می یابد [16].

خشک کن مادون قرمز

نمونه های ۱۰۰ گرمی ریشه اکیناسه داخل خشک کن مادون قرمز مدل GC400 ساخت شرکت مهندسی و طراحی گروک ایران منتقل می شوند که گستره ی دمایی این خشک کن از ۳۵ °C تا ۹۰ °C، گستره ی رطوبتی آن تا ۹۰٪ و توان مصرفی ۳kW تا ۹kW می باشد. دمای مادون قرمز در سه سطح ۴۰، ۴۵ و ۴۹ درجه سلسیوس و فاصله نمونه از لامپ در سه سطح ۷، ۱۱ و ۱۵ سانتی متر تغییر داده شدند و داده های جرم و زمان در طول فرایند خشک کردن تا رسیدن به رطوبت نهایی اندازه گیری شد.

مدل سازی ریاضی منحنی های خشک کردن

نسبت رطوبت و آهنگ خشک کردن ریشه ی اکیناسه با استفاده از معادله (۱) و (۲) محاسبه گردید [5].

$$MR = \frac{m_e - m_t}{m_0 - m_t} \quad (1)$$

1- Henderson and Pabis

2- Verma

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{\Delta t} \quad (2)$$

m_t مقدار رطوبت در زمان t ، m_0 مقدار رطوبت اولیه، m_e مقدار رطوبت تعادلی، M_t مقدار رطوبت در لحظه t برابر M_{t+dt} مقدار رطوبت در زمان $t+dt$ و Δt فاصله زمانی بین دو رطوبت متوالی بر حسب دقیقه می باشد.

مدل‌های مورد استفاده به منظور مدل‌سازی ریاضی در جدول (۱) نشان داده شده است. مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک کردن جهت به دست آوردن مقادیر ضرایب ثابت این مدل‌های توصیفی (a, b, c, n و k) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سینتیک خشک کردن ریشه‌ی اکیناسه به کمک ابزار برازش منحنی در نرم افزار Stat Graphics Plus v5 برآورد گردید. در این تحقیق برای انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف کننده سینتیک خشک کردن ریشه‌ی اکیناسه، ضریب همبستگی، R^2 ریشه‌ی میانگین مربعات خطا، RMSE و کای اسکوار χ^2 مابین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل، محاسبه و با مدل‌های دیگر، مورد مقایسه قرار گرفت. این معیارها توسط معادلات (۳)، (۴) و (۵) زیر محاسبه شدند [5].

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - Z} \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (5)$$

در این معادلات، $MR_{exp,i}$ رطوبت پسته‌ها مشاهده شده در i امین اندازه‌گیری، $MR_{pre,i}$ رطوبت پسته‌ها پیش‌بینی شده از مدل در i امین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و Z تعداد ضرایب ثابت به کاررفته در هر مدل می باشد. برای سنجش بهترین مدل جهت پیش‌بینی نحوه‌ی خشک شدن پسته هر سه معیار $RMSE$ ، R^2 و χ^2 مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، مدل مناسب خشک کردن با حداکثر همبستگی R^2 و حداقل χ^2 و $RMSE$ به عنوان مدل مناسب برای توصیف سینتیک خشک کردن ریشه اکیناسه انتخاب شد [5].

جدول ۱- مدل‌های ریاضی اعمال شده به منحنی خشک کردن.

model name	model	Reference
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Roberts et al. (2008)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Erbay and Icier (2010)
Midilli et al	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Al-Muhtasab et al. (2010)
Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$	Sharma and Prasad (2004)
Two-term	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	Zielinska and Markowski (2010)

تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یک ویژگی مهم در مدل‌سازی فرآیند خشک کردن مواد غذایی و دیگر مواد است که تابع درجه حرارت و رطوبت مواد می باشد. قانون دوم فیک طبق معادله (۶) و (۷) برای شرایط ناپایدار می تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (7)$$

T، مقدار رطوبت موضعی بر مبنای خشک، X که در آن شاخص فضایی می‌باشد. معادله‌ی انتشاری قانون دوم فیک بر انتشار جرم در طی دوره‌ی سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد. برای به کار بردن قانون فیک فرض می‌گردد که

فرآورده‌ی غذایی تک‌بعدی است، رطوبت اولیه‌ی یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت به‌مانند مقاومت اصلی در برابر انتقال رطوبت است. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از حل معادله فیک برای یک تیغه با استفاده از معادله‌های (۸)، (۹) و (۱۰) به دست آمد [5].

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

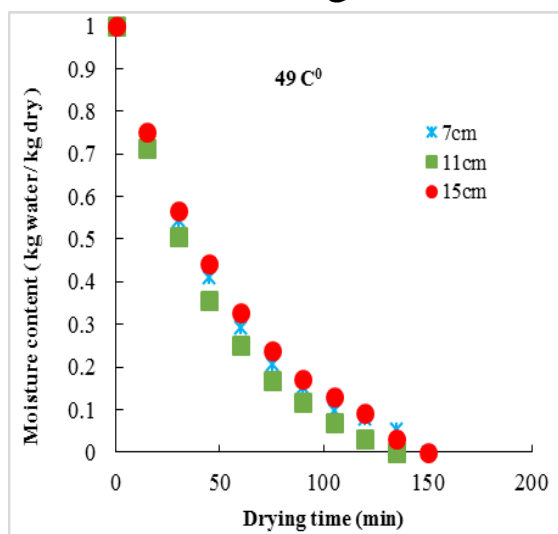
$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (9)$$

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (10)$$

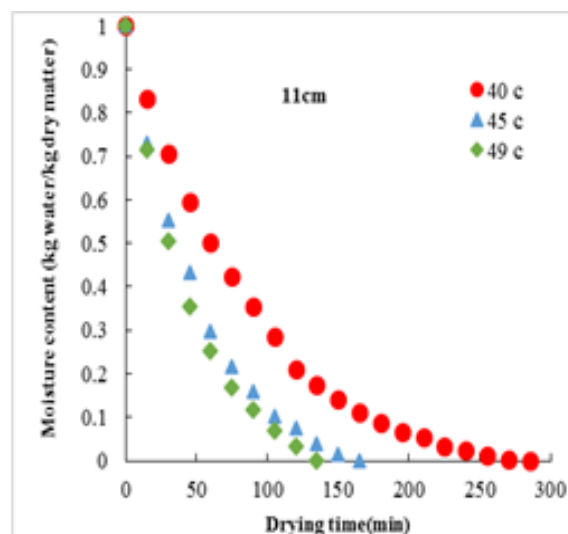
K شیب خط، MR میزان رطوبت ریشه اکیناسه بر مبنای خشک، L ضخامت و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر می‌باشد.

نتایج و بحث

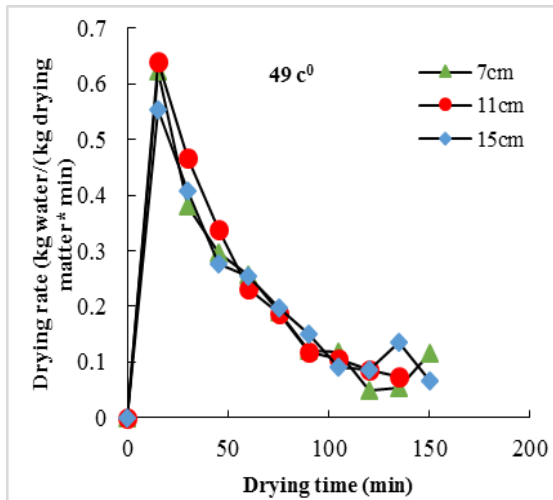
شکل (۱) و (۲) سینتیک خشک شدن اکیناسه بر مبنای تر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مدت زمان خشک شدن با افزایش دمای خشک‌کن مادون‌قرمز کاهش می‌یابد. اما تغییر فاصله از لامپ‌ها تأثیر معنی‌داری بر روی زمان خشک شدن نمونه‌ها نداشت. شکل (۳) و (۴) نشان‌دهنده‌ی تأثیر دمای خشک‌کن مادون‌قرمز و فاصله از لامپ‌ها بر نرخ خشک شدن اکیناسه می‌باشد. افزایش دمای خشک‌کردن و فاصله از لامپ‌ها به ترتیب باعث افزایش و بدون تأثیر معنی‌دار بر نرخ خشک شدن ریشه اکیناسه داشت.



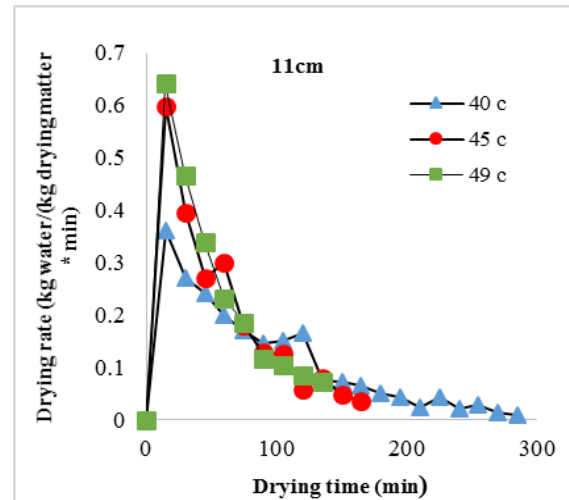
شکل ۲- منحنی خشک کردن اکیناسه در فاصله‌های مختلف مادون‌قرمز



شکل ۱- منحنی خشک کردن اکیناسه در دماهای مختلف مادون‌قرمز



شکل ۴- منحنی نرخ خشک کردن اکتیناسه در فاصله‌های مختلف مادون قرمز



شکل ۳- منحنی نرخ خشک کردن اکتیناسه در دماهای مختلف مادون قرمز

تجزیه و تحلیل رگرسیون غیرخطی بر اساس شش مدل خشک کردن برای نمونه خشک شده با فاصله ۱۱ سانتی‌متر انجام شد. جدول (۱). بهترین مدل‌های ریاضی برازش شده با داده‌های تجربی بر اساس حداکثر R^2 و حداقل χ^2 و RMSE انتخاب شدند. تجزیه و تحلیل آماری انجام شده بر روی مدل‌های خشک کردن در جدول (۲) خلاصه شده است. برای خشک کردن ریشه اکتیناسه، مدل‌های میدلی و همکاران و دو جمله‌ای به‌عنوان بهترین مدل‌ها انتخاب گردیدند. جدول (۳).

شکل (۳)، داده‌های تجربی را با داده‌های پیش‌بینی شده در سه مدل انتخابی مقایسه می‌کند. محتوای رطوبت پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌ها و مقادیر محتوای رطوبت تجربی در امتداد یک خط مستقیم می‌باشند، که نشان‌دهنده مناسب بودن این مدل‌ها در توصیف ویژگی‌های خشک شدن ریشه اکتیناسه می‌باشد.

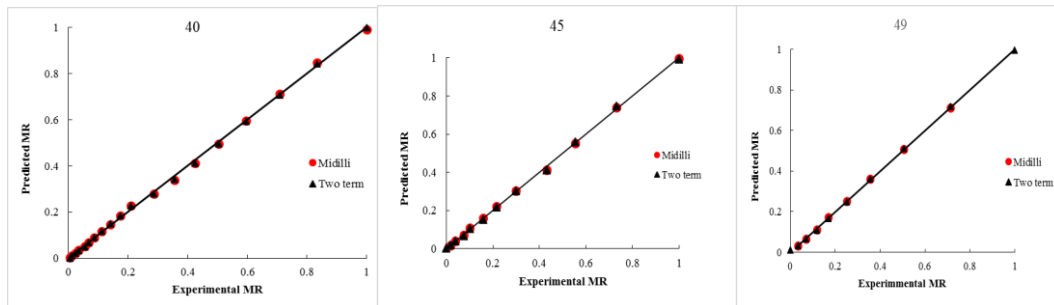
جدول ۲- مقادیر ضرایب آماری تحلیل مدل خشک شدن برای خشک کردن ریشه اکتیناسه.

model	40C	45C	49C
Lewis	k=0.012418	k=0.020484	k=0.023542
Page	k=0.015581	k=0.014803	k=0.017501
	n=0.951829	n=1.078950	n=1.075110
Henderson and Pabis	k=0.012681	k=0.020658	k=0.023806
	a=1.022780	a=1.058770	a=1.011230
Midilli et al	k=0.008772	k=0.020749	k=0.023789
	a=0.991793	a=0.99768	a=1.000740
	b=-0.000123	b=-0.000318	b=-0.000394
	n=1.061470	n=0.975503	n=0.975309
Parabolic	a=0.939618	a=0.940825	a=0.951769
	b=-0.007814	b=-0.012976	b=-0.015428
	c=0.000016	c=0.000045	c=0.000064
Two-term	a=1.167840	a=1.109420	a=1.101960
	b=-0.168364	b=-0.117990	b=-0.105906
	k0=0.010124	k0=0.017102	k0=0.019926
	k1=0.002999	k1=0.003783	k1=0.003772



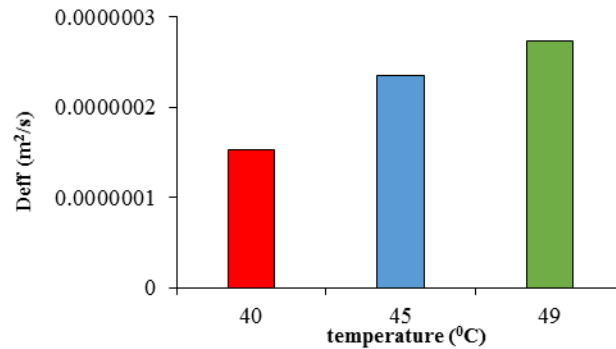
جدول ۳- ضرایب همبستگی تحلیل مدل خشک شدن برای خشک کردن ریشه‌ی اکیناسه.

Degree	model	R ²	RMSE	χ ²
40	Lewis	0.994137	0.023130	0.000563
	page	0.990348	0.030492	0.001033
	parabolic	0.992704	0.027279	0.000875
	middili	0.999184	0.009406	0.000111
	hendeson & pabis	0.994777	0.022431	0.000559
	two term	0.99926	0.008958	0.000100
45	Lewis	0.996053	0.019994	0.000436
	page	0.997359	0.017153	0.000353
	parabolic	0.990425	0.034427	0.001580
	middili	0.999387	0.009241	0.000128
	hendeson & pabis	0.996157	0.020692	0.000514
	two term	0.999289	0.009950	0.000149
49	Lewis	0.996801	0.018558	0.000383
	page	0.998173	0.014879	0.000277
	parabolic	0.990355	0.036542	0.001908
	middili	0.999884	0.004322	0.000031
	hendeson & pabis	0.996977	0.019136	0.000458
	two term	0.999647	0.007551	0.000095



شکل ۳- مقایسه مقادیر رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده در دماهای مختلف با استفاده از مدل‌های میدلی و دو جمله‌ای.

مقادیر تعیین شده از ضریب نفوذ مؤثر در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود انتشار رطوبت مؤثر با افزایش دمای خشک‌کن مادون‌قرمز، افزایش می‌یابد. نمونه خشک‌شده در دمای ۴۹ درجه با $2/74 \times 10^{-7}$ مترمربع بر ثانیه دارای بیشترین و نمونه خشک‌شده در دمای ۴۰ درجه با $1/52 \times 10^{-7}$ مترمربع بر ثانیه دارای کمترین ضریب مؤثر رطوبت بودند.



شکل ۴- اختلاف انتشار رطوبت مؤثر برای ریشه اکیناسه در دماهای متفاوت مادون قرمز.

نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر خشک‌کن مادون قرمز روی ویژگی‌های خشک‌کردن ریشه اکیناسه، مورد بررسی قرار گرفت. افزایش دمای خشک‌کردن، سبب کاهش زمان خشک‌کردن و بالا رفتن آهنگ خشک‌کردن و انتشار مؤثر گردید به گونه‌ای که نمونه تیمار شده در دمای ۴۹ درجه سلیسیوس دارای کم‌ترین زمان خشک‌کردن بود. بعد از آنالیز آماری مدل، نتایج، نشان داد که در بین مدل‌های دینامیکی مورد برآزش، مدل‌های میدلی و دوجمله‌ای به دلیل داشتن حداکثر R^2 و حداقل χ^2 و RMSE به عنوان بهترین مدل برای خشک‌کردن ریشه‌ی اکیناسه با خشک‌کن مادون قرمز انتخاب گردید. انتشار رطوبت مؤثر برای نمونه‌های خشک شده با مادون قرمز در دمای ۴۹ درجه سلیسیوس در دامنه‌ی $10^{-7} \times 2.74 - 1.52$ مترمربع بر ثانیه ارزیابی گردید.

مراجع:

- 1- AOAC International, (1990). Official Methods of Analysis of AOAC. AOAC International, Gaithersberg, MD.
- 2- Baysal, T., Icier, F., Ersus, S. and Yildiz, H. (2003). Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. Journal of European Food Research and Technology, 218: 68-73.
- 3- Chandra Mohan & Talukdar. (2010). Tree dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convecting drying. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(21):4638-4650
- 4- Doymaz, I. (2009). Mathematical Modelling Of Thin-Layer Drying Of Kiwifruit Slices. Journal of Food Processing and Preservation, 33: 145-160.
- 5- Doymaz, İ. (2012). Drying of pomegranate seeds using infrared radiation. Journal of Food Science and Biotechnology, 21(5), 1269-1275.
- 6- Ebadi, M., Rahmati, M., Azizi, M., Hassanzadeh Khayyat, M., (2011). Effects of different drying methods (natural method, oven and microwave) on drying time, essential oil content



- and composition of Savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of medicinal. Aromatic.* 26 (P1), 477-489.
- 7- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). Thin-layer drying behaviors of olive leaves (*Olea europaea* L.). *Journal of Food Process Engineering*, 33(2), 287-308.
 - 8- Guidelines on good agricultural and collection practices (GACP) for medicinal plants. (2011). available at www.who.int/medicinedocs/2011/pdf
 - 9- Kashaninejad, M., & Tabil, L. G. (2009). Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to airflow. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 104-109.
 - 10- Landy, N., Ghalamkari, Gh., Toghyani, M., Moattar F. (2011) The effects of *Echinacea purpurea* L. (purple coneflower) as an antibiotic growth promoter substitution on performance, carcass characteristics and humoral immune response in broiler chickens. *Journal of Medicinal Plants Research*. 11: 2332-2338
 - 11- Percival, S. (2000). Use of echinacea in medicine. *Journal of Biochemical Pharmacology*, 50:155-8.
 - 12- Patak, P.T. (1991). Thin layer drying model for rapeseed. *Transactions of The ASABE.*, 134 (6), 2505-2508.
 - 13- Pawar, S. B., & Pratape, V. M. C. e. (2017). Fundamentals of Infrared Heating and Its Application in Drying of Food Materials: A Review. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1), e12308-n/a.
 - 14- Roberts, J. S., Kidd, D. R., & Padilla-Zakour, O. (2008). Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 460-465.
 - 15- Sharma, G. P., & Prasad, S. (2004). Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 609-617.
 - 16- Shen, F., Peng, L., Zhang, Y., Wu, J., Zhang, X., Yang, G., Peng, H., Qi, H. & Deng, S. (2011). Thin-layer drying kinetics and quality changes of sweet sorghum stalk for ethanol production as affected by drying temperature. *Ind. Crops Products*, 34 (3), 1588-1594.
 - 17- O'Hara, M; Kiefer, D; Farrell, K; Kemper, K. (1998). A Review of 12 Commonly Used Medicinal Herbs. *Archives of Family Medicine*, 7:523-536.
 - 18- Oniszczuk, T., Oniszczuk, A., Gondek, E., Guz, L., Puk, K., Kocira, A., Kusz, A., Kasprzak, K., Wojtowicz, A. (2016). Active polyphenolic compounds, nutrient contents and antioxidant capacity of extruded fish feed containing purple coneflower (*Echinacea purpurea*(L.) Moench.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 44: 20-280.
 - 19- Zielinska, M., & Markowski, M. (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Journal of Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(2), 212-218.
 - 20- Zolgharnein, J., Niazi, A., Afiuni-Zadeh, S., Zamani, K., (2010). Determination of cichoric acid as a biomarker in *echinacea purpurea* cultivated in Iran using high performance liquid chromatography. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 1: 23-27.



modeling of drying Echinacea root using infrared dryer .

Zahra Rostami Gerekhlu¹, Faroogh Sharifian^{2*}, Amir Rahimi³ and Abolfazl Akhoundzadeh Yamchi⁴

1. Department of Biosystems Engineering, University of Urmia
2. Department of Agronomy, University of Urmia
3. Department of Biosystems Engineering, University of Urmia
4. Department of Biosystems Engineering, University of Urmia

Abstract

Echinacea drying kinetics was performed at three level temperatures 40°C, 45°C and 49°C and at three level distances of 7, 11 and 15 centimeter. The effective diffusivity coefficient of moisture was calculated using the Fick's second law. The drying process was modeled by mathematical equations. The results showed that by increasing the infrared temperature, the time required for drying, drying rate and effective diffusivity coefficient reduced but changing the distance from the lamps had no significant effect on the drying time of the samples. The best models for infrared machine drying samples in 49°C Respectively Midlli and Two part, coefficient of determination (R^2), 0.999884 and 0.999647, root mean square error (RMSE), 0.004322 and 0.007551 and reduced chi-square (χ^2), 0.000031 and 0.000095.

Key words: Echinacea, Drying, Infrared, Drying time, Diffusivity Coefficient.

*Corresponding author

E-mail: f.sharifian@urmia.ac.ir