



بررسی سرعت انتشار رطوبت و سینتیک خشک شدن جوانه‌های کینوا در یک خشک‌کن فروسرخ

سپیده وجدانی وحید^۱، فخرالدین صالحی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

کلمات کلیدی:

توان پرتودهی،
زمان خشک کردن،
ضریب نفوذ مؤثر رطوبت،
مدل پیچ.

DOI: 10.22034/FSCT.22.165.289.

* مسئول مکاتبات:

F.Salehi@basu.ac.ir

با به کارگیری فناوری‌های نوین خشک کردن مانند فروسرخ و انتخاب شرایط مناسب این فناوری، می‌توان جوانه کینوا خشک شده با کیفیت مطلوب و ارزش غذایی بالایی تولید کرد که امکان استفاده از این محصول خشک و پودر آن برای غنی سازی مواد غذایی مختلف مانند انواع نان، شیرینی، پروتئین بار، کیک، پنکیک و غیره وجود دارد. در این پژوهش اثر توان پرتودهی لامپ فروسرخ و فاصله نمونه از منبع حرارتی بر سینتیک خشک شدن جوانه‌های کینوا بررسی و مدل سازی شد. با افزایش توان لامپ فروسرخ از ۲۵۰ وات به ۳۷۵ وات، رطوبت با سرعت بیشتری از جوانه‌های کینوا خارج و محصول در زمان کوتاه‌تری خشک شد. البته هنگام استفاده از توان ۳۷۵، جوانه‌ها قبل از خشک شدن کامل، سریع می‌سوختند. با کاهش فاصله لامپ فروسرخ از ۱۰ سانتی متر به ۵ سانتی متر، رطوبت با سرعت بیشتری از جوانه‌های کینوا خارج و محصول در زمان کوتاه‌تری خشک شد. متوسط زمان خشک کردن جوانه‌های کینوا هنگام خشک شدن با لامپ فروسرخ با توان ۲۵۰ وات در فواصل ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی متر به ترتیب برابر ۱۰/۷، ۱۷/۳ و ۱۸/۰ دقیقه بود. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه شده برای جوانه‌های کینوا هنگام خشک شدن با لامپ فروسرخ با توان ۲۵۰ وات در فواصل ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی متر به ترتیب برابر $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ، $6/60 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و $2/55 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بود. جهت بررسی سینتیک خشک شدن جوانه‌های کینوا، مدل‌های ریاضی مختلفی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش و مدل پیچ بر اساس بالاترین برازش و کمترین خطا به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. در مجموع، استفاده از منبع حرارتی فروسرخ با توان ۲۵۰ وات در فاصله ۵ سانتی متری از سطح جوانه‌های کینوا، برای خشک کردن این محصول به دلیل زمان کوتاه خشک شدن و عدم سوختگی، توصیه می‌شود.

۱- مقدمه

کینوا از خانواده *Chenopodiaceae* بوده و به عنوان یک شبه غله دو لپه‌ای شناخته می‌شود. درصد پروتئین کینوا بالا بوده و حاوی انواع ویتامین (فولات، نیاسین و ریبوفلاوین)، ترکیبات فعال زیستی (ساپونین‌ها، ترکیبات فنلی، فیتواسترول‌ها و پپتیدها)، مواد معدنی (آهن، منیزیم، فسفر، پتاسیم و روی)، فیبر و اسیدهای آمینه ضروری است. بذر کینوا به عنوان یک منبع پروتئین کامل شناخته می‌شود، زیرا حاوی تمامی ۹ اسید آمینه ضروری مورد نیاز بدن است [۱-۳]. این ویژگی‌ها کینوا را به یک ماده افزودنی ارزشمند در تولید انواع محصولات غذایی نوآورانه، از جمله محصولات بدون گلوتن، شیر کینوا، غذای کودک و فرآورده‌های غذایی-دارویی، تبدیل کرده است [۴، ۵]. بذر کینوا به دلیل ارزش غذایی بالا، عدم وجود گلوتن، شاخص گلیسمی پایین و خواص درمانی، می‌تواند به عنوان یک ماده غذایی بسیار مفید برای کودکان، افراد مسن، زنان در معرض خطر پوکی استخوان، ورزشکاران و افراد مبتلا به کم‌خونی، دیابت، دیس‌لیپیدمی و سلیاک در نظر گرفته شود [۶].

غلات و شبه غلات جوانه‌زده، ارزش غذایی و فواید فیزیولوژیکی بیشتری نسبت به غلات و شبه غلات معمولی و محصولات فرآوری شده از آن‌ها دارند [۷]. هنگام جوانه‌زنی، برخی از ترکیبات برای تنفس و سنتز اجزای سلولی جدید، تجزیه می‌شوند که این امر منجر به تغییرات چشمگیری در ویژگی‌های بیوشیمیایی، تغذیه‌ای و حسی می‌گردد. به طور کلی، جوانه‌زنی باعث بهبود ارزش غذایی غلات و حبوبات می‌شود. طی این فرآیند، ترکیبات ضد تغذیه‌ای مانند اسید فیتیک کاهش و مقدار ویتامین‌ها، فیبر و ترکیبات گیاهی مفید مانند اسید فرولیک افزایش می‌یابند [۸]. کریمی و صارم‌نژاد (۲۰۲۰) تأثیر فرآیند جوانه‌زدن بر برخی از ویژگی‌های فراسودمند ارقام عدس ایرانی را بررسی کردند. تمامی آزمون‌ها روی آرد عدس ارقام ایرانی کیمیا و گچساران در حالت‌های جوانه نرزه (شاهد) و جوانه‌زده به مدت ۲۴ و

۴۸ ساعت صورت پذیرفت. بر اساس نتایج این پژوهش، جوانه‌زدن سبب افزایش غلظت گاما آمینو بوتیریک اسید در هر دو رقم مورد بررسی گردید درحالی‌که دارای اثر کاهشی بر غلظت آهن بود [۹].

یکی از روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی، خشک کردن آنها است که باعث کاهش رطوبت و فعالیت آبی محصول شده و از رشد میکروارگانیسم‌ها جلوگیری می‌کند [۱۰، ۱۱]. بر اساس روش انتقال حرارت، خشک‌کن‌های مختلف، روش‌های مختلفی برای گرم کردن محصول و خروج رطوبت از آن دارند. در اکثر روش‌های خشک کردن، حرارت ابتدا به سطح خارجی ماده مرطوب و سپس به داخل آن منتقل می‌شود [۵، ۱۰]. پرتو فروسرخ یک فناوری نوین و کارآمد است که با استفاده از امواج الکترومغناطیسی، انرژی گرمایی را به طور مستقیم به مواد غذایی منتقل می‌کند. این روش با نفوذ به داخل دانه‌ها و ایجاد تغییرات ساختاری در نشاسته، ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی دانه‌ها را بهبود می‌بخشد. مزایای فروسرخ شامل کاهش زمان خشک کردن، کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت محصول است. این اشعه باعث کاهش مقاومت مکانیکی دانه‌ها، افزایش تردی و بهبود فرآیند آسیاب کردن آنها هم می‌شود. همچنین، ظرفیت جذب آب و ویسکوزیته نشاسته را تغییر داده و آن را برای استفاده در محصولاتی مانند پودینگ، سوپ و سس‌ها مناسب‌تر می‌کند. از طرفی، این فناوری هضم پذیری نشاسته را افزایش داده و با کاهش زمان و هزینه فرآوری، بازدهی فرآیند را افزایش می‌دهد [۱۲، ۱۳].

هدف این مطالعه بررسی اثر توان لامپ فروسرخ و فاصله منبع حرارتی بر سرعت خشک شدن، ضریب نفوذ رطوبت و سیستیک خشک شدن جوانه‌های کینوا و انتخاب بهترین شرایط خشک کردن است. همچنین سیستیک خروج رطوبت از جوانه‌ها با کمک مدل‌های تجربی مختلف مدل‌سازی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- فرآیند جوانه‌زدن کینوا

ریخته شدند و روی آن‌ها توسط حوله نازک نم‌دار پوشانده شد. هر ۶ ساعت توسط یک آبپاش، بذرها مرطوب می‌شدند. در مجموع، بذرها به مدت ۷۲ ساعت در دمای حدود ۲۵ درجه سلسیوس جهت جوانه‌زنی قرار گرفتند (شکل ۲).

در این پژوهش، بذر کینوا سفید، برداشت شده از مزارع کشور پرو و بسته‌بندی شده در ایران توسط شرکت سیکاس فرآیند سبز به سفارش شرکت جام نور طلایی با برند آ.آ.ب (ایران)، تهیه شد. ابتدا بذرها شسته شدند و به مدت ۱ ساعت در آب شهری با دمای حدود ۲۵ درجه سلسیوس، خیسانده شدند (شکل ۱). در مرحله بعد، بذرها درون ظروف مسطح



Figure 1- Soaking and sprouting steps of quinoa seeds



Figure 2- Sprouted quinoa seeds

سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تغییرات وزن نمونه‌ها طی خشک شدن هر دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی (GM-300p، لوترون، تایوان) با دقت ± 0.01 گرم، ثبت گردید.

۲-۲- خشک کردن با فروسرخ

در این پژوهش جهت خشک کردن جوانه‌های کینوا از خشک‌کن فروسرخ با دو توان پرتودهی ۲۵۰ وات (شکل ۳) و ۳۷۵ وات استفاده شد. برای بررسی اثر فاصله منبع پرتودهی از سطح نمونه، فاصله جوانه‌ها از سطح لامپ در



Figure 3- Infrared dryer

جوانه‌های کینوا، بر مبنای خشک در برابر زمان خشک کردن رسم و تأثیر شرایط مختلف جوانه‌زنی بر آنها مورد بررسی

۲-۳- پارامتر نسبت رطوبت

سرعت خشک شدن، مقدار آب حذف شده در واحد زمان است [۱۰]. در این پژوهش، ابتدا کاهش محتوای رطوبت

قرار گرفت. سپس پارامتر نسبت رطوبت^۱ (MR) از طریق معادله ۱، محاسبه گردید [۱۴].

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

در این معادله، MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t محتوای رطوبت بر مبنای خشک در هر زمان t (گرم آب بر گرم ماده خشک) و M_0 محتوای رطوبت اولیه بر مبنای خشک است.

۲-۴- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

در سراسر فرآیند خشک کردن، انتشار پدیده‌ی غالب انتقال رطوبت از مرکز نمونه به سطح است. مدل نظری استفاده شده برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت^۲ جوانه‌های کینوا بر اساس قانون دوم نفوذ فیک^۳ و با استفاده از مختصات کروی^۴ بود. از معادله ۲ برای محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت استفاده شد [۱۵].

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (2)$$

در این معادله، r شعاع کینوا (m)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ($m^2 s^{-1}$)، n اعداد صحیح مثبت، t زمان خشک شدن (s) و $Slope$ شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت

داده‌های تجربی ($\ln MR$) در مقابل زمان خشک کردن می‌باشد.

۲-۵- مدل‌سازی سینتیک

مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن برای طراحی، بهبود سیستم‌های خشک‌کن موجود و حتی کنترل فرآیند استفاده می‌شود. به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن جوانه‌های کینوا، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های تجربی مختلف خشک کردن، مدل‌سازی سینتیک انجام گردید. معادله‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی، لگاریتمی و درجه دوم (جدول ۱)، برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن جوانه‌های کینوا توسط فروسرخ و انتخاب بهترین مدل سینتیک، انتخاب و بررسی شدند [۱۶]. بهترین مدل می‌بایست دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین (r) و حداقل مجموع مربعات خطا^۵ (SSE) و جذر میانگین مربعات خطا^۶ (RMSE) باشد. به منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثلثت‌های مدل‌ها نیز از نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

Table 1- Mathematical models used to model the drying kinetics of quinoa sprouts

Model	Equation
Wang and Singh	$MR=1+at+bt^2$
Henderson and Pabis	$MR=a \exp(-kt)$
Approximation of diffusion	$MR=a \exp(-kt)+(1-a) \exp(-kbt)$
Page	$MR=\exp(-kt^n)$
Newton	$MR=\exp(-kt)$
Midilli	$MR=a \exp(-kt^n)+bt$
Logarithmic	$MR=a \exp(-kt)+c$
Quadratic	$MR=a+bx+cx^2$

آزمون‌های خشک کردن جوانه‌های کینوا در سه تکرار انجام شد. برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون

۲-۶- آنالیز آماری

4- Spherical coordinate

5- Sum of squares due to error (SSE)

6- Root mean square error (RMSE)

1- Moisture ratio (MR)

2- Effective moisture diffusivity coefficient (Deff)

3- Fick's second law of diffusion

چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد. نتایج به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- سینتیک خشک شدن جوانه‌های کینوا

اشعه فروسرخ سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم روی محصول می‌شود که نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود، سریع‌تر است و راندمان بالاتری دارد. بیشتر اشعه فروسرخ توسط مولکول‌های سطحی جذب می‌شود. این پدیده سبب گرم شدن سریع محصول شده و سبب کاهش تنش‌های حرارتی در محصول و در نتیجه حفظ کیفیت آن می‌شود. این موضوع می‌تواند زمان خشک کردن را کاهش دهد، هزینه انرژی را پایین آورده و همچنین به شکل مساوی دما را در محصول پراکنده نماید که منجر به تولید محصول دارای کیفیت بالاتری می‌شود [۱۷]. شکل ۴ اثر توان لامپ

فروسرخ بر سرعت افت رطوبت جوانه‌های کینوا هنگام خشک شدن در خشک‌کن فروسرخ را نشان می‌دهد. با افزایش توان فروسرخ از ۲۵۰ وات به ۳۷۵ وات، رطوبت با سرعت بیشتری از جوانه‌های کینوا خارج و محصول در زمان کوتاه‌تری خشک شد. البته، استفاده از توان ۳۷۵ باعث کاهش زمان خشک شدن محصول شد، اما جوانه‌ها قبل خشک شدن کامل، سریع می‌سوختند و سیاه می‌شدند. لذا استفاده از توان ۳۷۵ وات برای پرتودهی و خشک کردن جوانه‌های حساسی مانند کینوا توصیه نمی‌شود. از طرفی، سرعت خشک شدن محصول با توان ۲۵۰ وات مناسب بود و محصول هم دچار سوختگی نمی‌شد. لذا استفاده از توان ۲۵۰ وات برای خشک کردن جوانه‌های کینوا توصیه می‌شود. متوسط زمان خشک شدن جوانه‌های کینوا هنگام خشک کردن با لامپ فروسرخ با توان ۲۵۰ وات در فواصل ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۱۰/۷، ۱۷/۳ و ۱۸/۰ دقیقه بود.

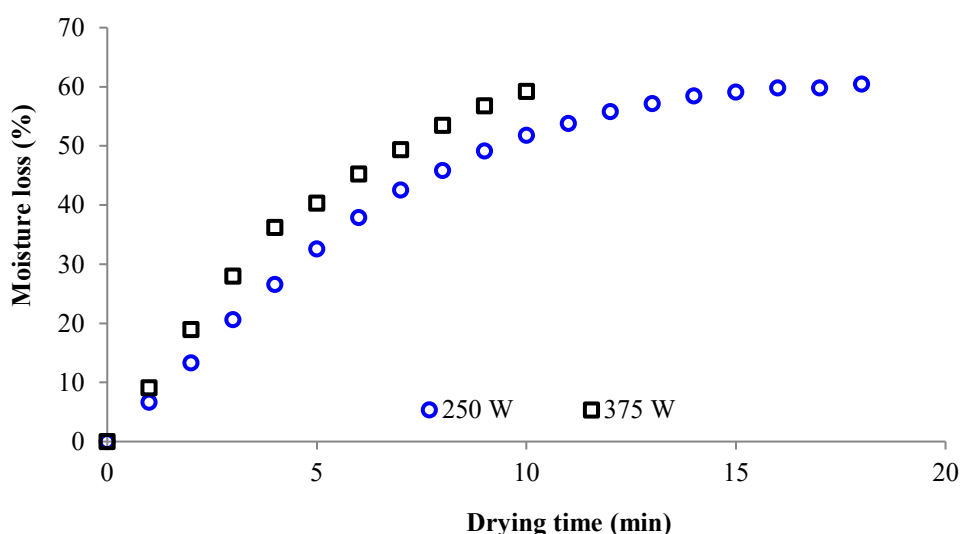


Figure 4- Effect of infrared radiation power on moisture loss rate of sprouted quinoa seeds during drying in the infrared dryer (10 cm distance)

می‌دهد. با کاهش فاصله لامپ فروسرخ از ۱۰ سانتی‌متر به ۵ سانتی‌متر، رطوبت با سرعت بیشتری از جوانه‌های کینوا خارج و محصول در زمان کمتری خشک شدند. در فاصله ۵ سانتی‌متری منبع پرتودهی از سطح جوانه‌های کینوا، پرتو فروسرخ به مقدار بیشتری توسط جوانه‌ها جذب شد و زمان خشک کردن کاهش یافت. این نتایج همراستا با نتایج آمینی

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. شکل ۵ اثر فاصله لامپ فروسرخ بر سرعت افت رطوبت جوانه‌های کینوا هنگام خشک شدن در خشک‌کن فروسرخ را نشان

دارد و با کاهش فاصله لامپ، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد.

و همکاران (۲۰۲۰) برای خشک کردن صمغ دانه ریحان با خشک‌کن فروسرخ است [۱۸]. این پژوهشگران گزارش کردند که تغییر فاصله لامپ حرارت دهی فروسرخ از سطح نمونه‌های مرطوب بر زمان خشک شدن آنها اثر معنی‌داری

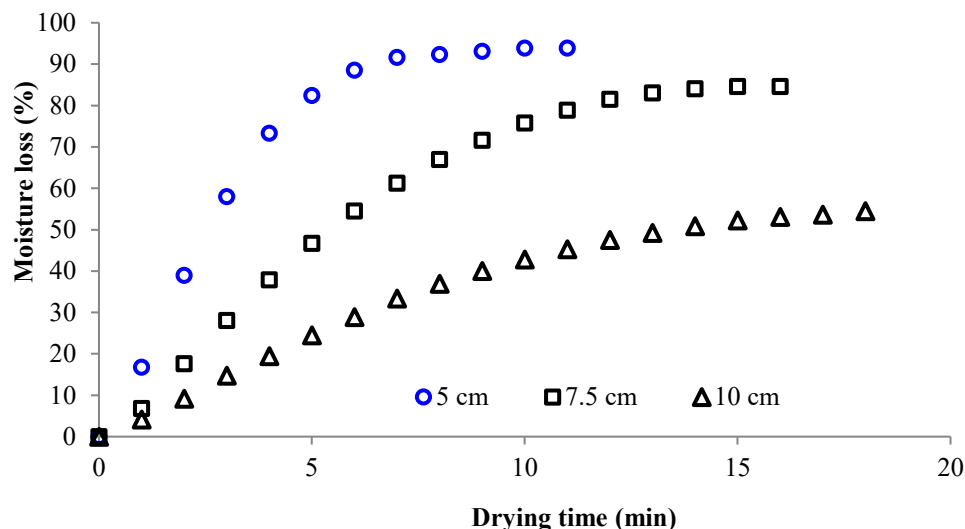


Figure 5- Effect of radiation lamp (250 W) distance from sprouted quinoa seeds on the moisture loss rate during infrared drying

جولنه‌های تازه کینوا می‌گردد. با پیش تیمار جولنه‌های کینوا توسط مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه مشاهده شد که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به صورت معنی‌داری از $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $5/73 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت ($p < 0/05$) [۵].

هم‌راستا با نتایج این پژوهش، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت گندم جولنه‌زده هنگام خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس برابر $1/65 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ گزارش شده است [۱۵]. در مقوله پژوهشی دیگری، متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جولنه‌های عدس قرار گرفته در خشک‌کن هوای داغ و فروسرخ به ترتیب برابر $3/76 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و $1/6 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ گزارش شده است [۱۹]. در پژوهشی امینی و همکاران در سال ۲۰۲۲ گزارش کردند که با افزایش توان پرتو دهی در یک خشک‌کن فروسرخ، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش و در نتیجه زمان خشک کردن محصول کاهش می‌یابد. همچنین، بر اساس نتایج این پژوهش، با کاهش فاصله نمونه‌ها از سطح لامپ پرتو دهی نیز ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد [۲۰].

۲-۳- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

شکل ۶ اثر فاصله لامپ فروسرخ از سطح جولنه‌های کینوا بر تغییر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت هنگام خشک شدن در خشک‌کن فروسرخ را نشان می‌دهد. متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه شده برای جولنه‌های کینوا هنگام خشک شدن با لامپ فروسرخ با توان ۲۵۰ وات در فواصل ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر $7/60 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ، $2/55 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و $0/83 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بود. از نظر آماری اختلاف معناداری بین مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جولنه‌ها هنگام خشک شدن در فاصله ۵ سانتی‌متر با ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر وجود داشت ($p < 0/05$) و با کاهش فاصله بین لامپ و نمونه‌ها، این ضریب افزایش یافت. وجدانی وحید و صالحی (۲۰۲۴) در پژوهشی اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر سرعت افت رطوبت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبگیری مجدد جولنه‌های کینوا هنگام خشک شدن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که پیش تیمار مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه باعث افزایش سرعت خروج رطوبت، افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و کاهش زمان خشک کردن

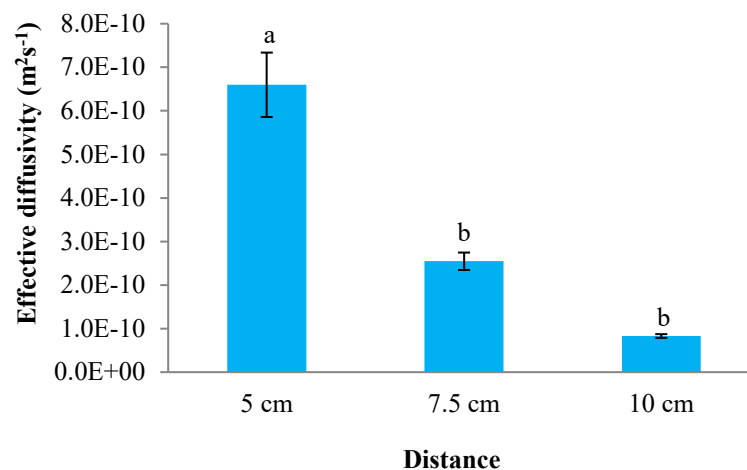


Figure 6- Effect of radiation lamp distance from sprouted quinoa seeds on the effective moisture diffusivity coefficient of quinoa sprouts

Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$).

۳-۳- انتخاب بهترین مدل سینتیکی

با استفاده از مدل‌های سینتیکی، می‌توان با صرف هزینه و زمان کمتر به درک بهتر از فرآیند خشک‌کردن به‌عنوان تابعی از متغیرهای گوناگون دست یافت. با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی نمونه‌های مورد مطالعه در طی فرآیند خشک‌کردن جوله‌های کینوا و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به‌وسیله مدل‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پابیس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی، لگاریتمی و درجه دوم، نتایج برای هر مدل مورد بررسی شد. نتایج به دست آمده از این ۸ مدل در جدول ۲ گزارش شده است. در این جدول ضرایب مدل‌ها و خطای محاسبه شده برای هر یک از مدل‌ها نیز گزارش شده است. نتایج نشان داد که مدل‌های پیچ و میدیلی برازش خیلی خوبی با داده‌ها دارند؛ اما با توجه به اینکه مدل پیچ دو ضریب ثابت و مدل میدیلی چهار ضریب ثابت دارند، مدل پیچ به‌عنوان مدل بهتر برای بررسی سینتیک خشک‌کردن جوله‌های کینوا انتخاب شد. در جدول ۳

مجموع مربعات خطا (SSE)، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و همچنین ضرایب ثابت مدل پیچ ارائه شده است. در پژوهشی سینتیک خشک شدن گندم جوانه‌زده در دو خشک‌کن هوای داغ و فروسرخ با توان ۲۵۰ وات بررسی شده است. نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که مدل پیچ را برای بررسی تغییرات نسبت رطوبت جوانه‌های گندم هنگام خشک شدن، مناسب است [۱۵]. نصرتی و همکاران (۲۰۱۸) خشک‌کردن شلتوک در یک خشک‌کن آزمایشگاهی هوای گرم-فروسرخ بستر ارتعاشی را مدل‌سازی کردند. در این مطالعه با بررسی مدل‌های ارائه شده و ارتباط بین جملات و ضرایب آنها دو مدل پیچ و ورما به‌منظور پیش‌بینی فرآیند خشک شدن شلتوک ارائه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که ضرایب ثابت هر دو مدل یک روند قلیل پیش‌بینی را تحت شرایط مختلف آزمایش نشان می‌دهند [۲۱].

Table 2- Statistical parameters to verify the agreement of each mathematical model with the moisture ratio (MR) data during quinoa sprouts drying

Model name	Model constants	Sum of squares due to error	r	Root mean square error
Wang and Singh	a=-0.2221 b=0.0122	0.0057	0.9957	0.0239
Henderson and Pabis	a=1.074 k=0.3338	0.0289	0.9785	0.0538

Approximation of diffusion	a= 6.541 k=0.1674 b=0.8929	0.0159	0.9882	0.0421
Page	k=0.1704 n=1.456	0.0003	0.9997	0.0060
Newton	k=0.3138	0.0369	0.9726	0.0579
Midilli	a=0.9948 k=0.1669 n=1.467 b=-7.28e-6	0.0003	0.9997	0.0064
Logarithmic	a=1.145 k=0.268 c=-0.0938	0.0153	0.9886	0.0413
Quadratic	a=1.016 b=-0.2276 c=0.0126	0.0053	0.9961	0.0242

Table 3- The constants and coefficients of the Page model during quinoa sprouts drying

Power	Distance	k	n	Sum of squares due to error	r	Root mean square error
250 W	5 cm	0.2102	1.3127	0.0032	0.9986	0.0156
	7.5 cm	0.0963	1.1733	0.0077	0.9976	0.0200
	10 cm	0.0755	0.8772	0.0082	0.9934	0.0214
375 W	5 cm	0.2305	0.7820	0.0050	0.9938	0.0266
	7.5 cm	0.1710	0.7680	0.0049	0.9935	0.0212
	10 cm	0.0956	0.9758	0.0020	0.9973	0.0149

مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل پیچ وجود دارد؛ بنابراین، این مدل برای پیش‌بینی تغییرات نسبت رطوبت جوانه‌های کینوا هنگام خشک شدن توسط پرتو فرسرخ مناسب می‌باشد.

برای بررسی توانایی مدل پیچ، مقادیر نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط این مدل و مقادیر نسبت رطوبت تجربی به دست آمده بعد از اعمال توان‌های فرسرخ مختلف و در فواصل ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر، در شکل ۷ کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. همان‌طوری که در این شکل

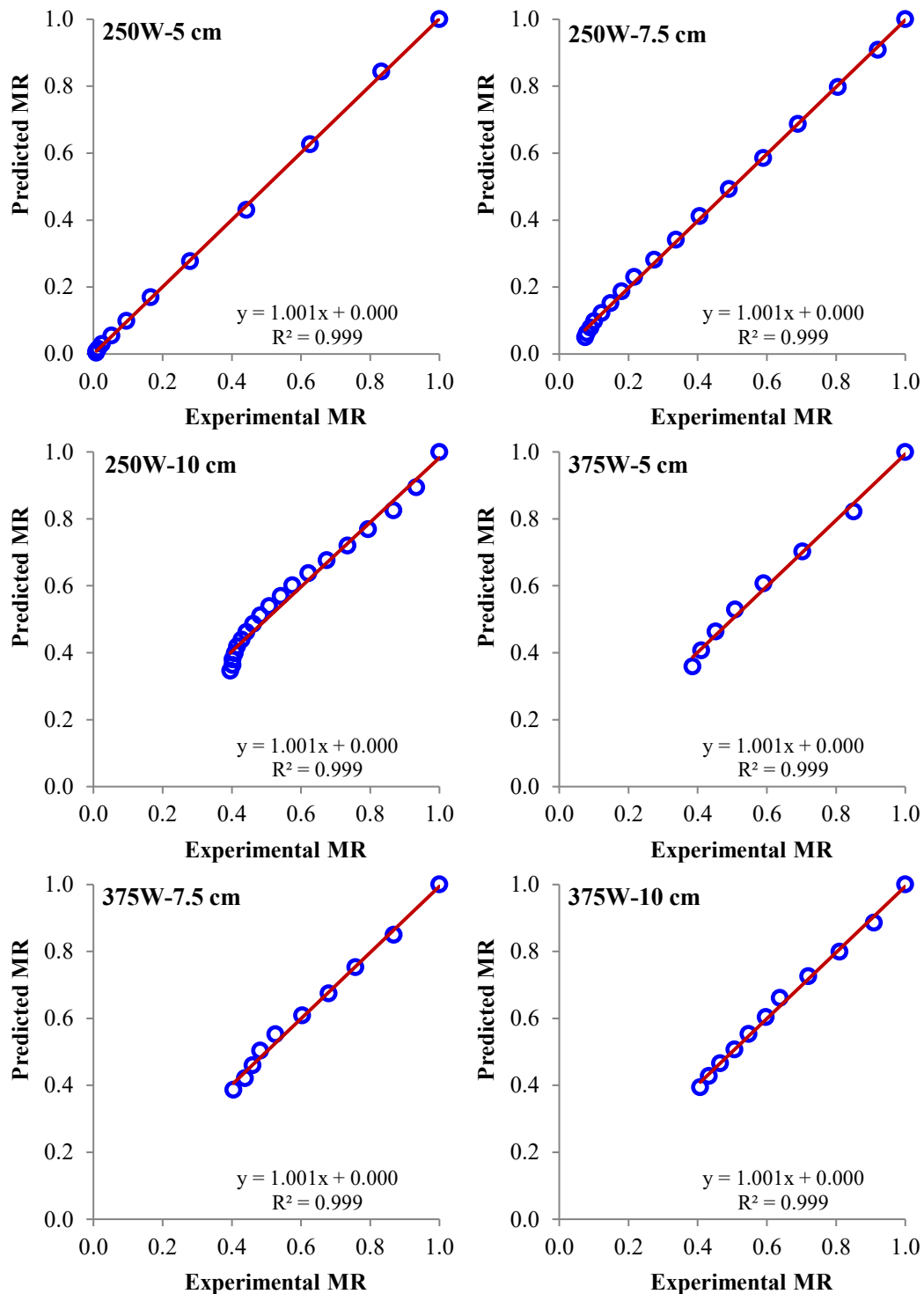


Figure 7- Comparison of fitted data by Page model with experimental results of moisture ratio (MR).

خشک کردن جوانه‌های کینوا از خشک کن فروسرخ با دو توان پرتو دهی ۲۵۰ وات و ۳۷۵ وات در فواصل مختلف از سطح جوانه‌ها، استفاده شد. با افزایش توان لامپ فروسرخ از ۲۵۰ وات به ۳۷۵ وات، رطوبت با سرعت بیشتری از جوانه‌های کینوا خارج و محصول در زمان کمتری خشک

۴- نتیجه گیری

فرآیند خشک کردن با کاهش رطوبت از ماده غذایی محافظت کرده و همچنین با کاهش فعالیت میکروبی از فساد در طول مدت نگهداری جلوگیری می‌کند. در این پژوهش جهت

می‌شود.

۵- تشکر و قدردانی

هزینه‌های انجام این پژوهش از محل پژوهانه به شماره ۱۰۰۴۴۹۸، تأمین شده از سوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا، پرداخت شده است. لذا نویسندگان از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا به خاطر حمایت مالی و معنوی از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶-منابع

[1] Arguello-Hernández, P., Samaniego, I., Leguizamo, A., Bernalte-García, M. J., Ayuso-Yuste, M. C. 2024. Nutritional and functional properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) chimborazo ecotype: insights into chemical composition, *Agriculture*. 14, 396.

[2] Casalvara, R. F. A., Ferreira, B. M. R., Gonçalves, J. E., Yamaguchi, N. U., Bracht, A., Bracht, L., Comar, J. F., de Sá-Nakanishi, A. B., de Souza, C. G. M., Castoldi, R., Corrêa, R. C. G., Peralta, R. M. 2024. Biotechnological, nutritional, and therapeutic applications of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and its by-products: a review of the past five-year findings, *Nutrients*. 16, 840.

[3] Lan, Y., Wang, X., Wang, L., Zhang, W., Song, Y., Zhao, S., Yang, X., Liu, X. 2024. Change of physiochemical characteristics, nutritional quality, and volatile compounds of *Chenopodium quinoa* Willd. during germination, *Food Chemistry*. 445, 138693.

[4] Kaur, S., Kaur, N. 2017. Development and sensory evaluation of gluten free bakery products using quinoa (*Chenopodium Quinoa*) flour, *Journal of Applied and Natural Science*. 9, 2449-2455.

[5] Vejdaniyahid, S., Salehi, F. 2024. Application of the adaptive neuro-fuzzy inference system to estimate mass transfer during convective drying of microwave-treated quinoa sprouts, *Innovative Food Technologies*. 11, 356-372.

شد. استفاده از توان ۳۷۵ وات برای پرتودهی و خشک کردن جوانه‌های حساسی مانند کینوا به دلیل سوختگی سریع محصول قبل از خشک شدن کامل، توصیه نمی‌شود. با کاهش فاصله لامپ فروسرخ از ۱۰ سانتی‌متر به ۵ سانتی‌متر، رطوبت با سرعت بیشتری از جوانه‌های کینوا خارج و محصول در زمان کمتری خشک شدند. با کاهش فاصله بین لامپ فروسرخ و جوانه‌های کینوا، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافت. بهترین مدل با بالاترین برازش، در مورد فرآیند خشک کردن جوانه‌های کینوا، مدل پیچ بود و استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن جوانه‌های کینوا توسط پرتو فروسرخ، توصیه می‌شود. در مجموع استفاده از لامپ فروسرخ با توان ۲۵۰ وات در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح جوانه‌های کینوا، برای خشک کردن این محصول، توصیه

[6] Chavan, S. M., Khadatkhar, A., Hasan, M., Ahmad, D., Kumar, V., Jain, N. K. 2025. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Paving the way towards nutraceuticals and value-added products for sustainable development and nutritional security, *Applied Food Research*. 5, 100673.

[7] Donkor, O. N., Stojanovska, L., Ginn, P., Ashton, J., Vasiljevic, T. 2012. Germinated grains – Sources of bioactive compounds, *Food Chemistry*. 135, 950-959.

[8] Ti, H., Zhang, R., Zhang, M., Li, Q., Wei, Z., Zhang, Y., Tang, X., Deng, Y., Liu, L., Ma, Y. 2014. Dynamic changes in the free and bound phenolic compounds and antioxidant activity of brown rice at different germination stages, *Food Chemistry*. 161, 337-344.

[9] Karimi, A. S., Saremnezhad, S. 2020. The effect of germination process on some functional properties of Iranian lentil cultivars, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 17, 167-176.

[10] Khodadadi, M., Masoumi, A. 2025. Recent drying technologies used for drying poultry litter (principles, advantages and disadvantages): A comprehensive review, *Poultry Science*. 104, 104677.

[11] Khodadadi, M., Masoumi, A., Sadeghi, M. 2024. Drying, a practical technology for reduction of poultry litter (environmental) pollution: methods and their effects on important parameters, *Poultry Science*. 103, 104277.

[12] Semwal, J., Meera, M. 2021. Infrared radiation: impact on physicochemical and

functional characteristics of grain starch, *Starch - Stärke*. 73, 2000112.

[13] Jibril, A. N., Zuo, Y., Wang, S., Kibiya, A. Y., Attanda, M. L., Henry, I. I., Huang, J., Chen, K. 2024. Influence of drying chamber, energy consumption, and quality characterization of corn with graphene far infrared dryer, *Drying Technology*. 42, 1875-1890.

[14] Salehi, F., Goharpour, K., Razavi Kamran, H. 2023. Effects of ultrasound and microwave pretreatments of carrot slices before drying on the color indexes and drying rate, *Ultrasonics Sonochemistry*. 101, 106671.

[15] Amin Ekhlas, S., Pajohi-Alamoti, M. R., Salehi, F. 2023. Effect of ultrasonic waves and drying method on the moisture loss kinetics and rehydration of sprouted wheat, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 20, 159-168.

[16] 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, 519-527.

[17] Salehi, F. 2020. Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying

various agricultural products: A review, *International Journal of Fruit Science*. 20, 586-602.

[18] 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 (Iran)*. 17, 23-31.

[19] Salehi, F., Razavi Kamran, H., Goharpour, K. 2024. Influence of ultrasonic pretreatment on the drying rate of lentil sprouts in hot-air and infrared dryers, *Food Research Journal*. 34, 31-43.

[20] Amini, G., Salehi, F., Rasouli, M. 2022. Color changes and drying kinetics modeling of basil seed mucilage during infrared drying process, *Information Processing in Agriculture*. 9, 397-405.

[21] Nosrati, M., Zare, D., Nasiri, M., Jafari, A., Eghtesad, M. 2018. Modeling and optimization of rough rice drying under hot air-infrared radiation in a laboratory scale vibratory bed dryer, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 49, 423-435.



Journal of Food Science and Technology (Iran)

Homepage: www.fsct.modares.ir

Scientific Research

Investigation of moisture diffusivity rate and drying kinetics of quinoa sprouts in an infrared dryer

Sepideh Vejdaniwahid¹, Fakhreddin Salehi^{2*}

¹ MSc Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

^{2*} Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2025/2/4

Accepted: 2025/3/11

Keywords:

Drying time,
Effective moisture diffusivity coefficient,
Page model,
Radiation power.

DOI: 10.22034/FSCT.22.165.289.

*Corresponding Author E-

F.Salehi@basu.ac.ir

ABSTRACT

By using modern drying technologies such as infrared and selecting the right conditions for this technology, dried quinoa sprouts can be produced with desirable quality and high nutritional value, and it is possible to use this dried product and its powder to fortify various food products such as breads, pastries, protein bars, cakes, pancakes, etc. In this study, the effect of infrared lamp irradiation power and sample distance from the heat source on the drying kinetics of quinoa sprouts was investigated and modeled. By increasing the infrared lamp power from 250 W to 375 W, moisture was removed from the quinoa sprouts faster and the product dried in a shorter time. However, when using 375 W, the sprouts quickly burned before completely drying. By reducing the infrared lamp distance from 10 cm to 5 cm, moisture was removed from the quinoa sprouts more quickly and the product dried in shorter time. The average drying times of quinoa sprouts when dried with the infrared lamp with power of 250 W at distances of 5, 7.5 and 10 cm were 10.7, 17.3 and 18.0 min, respectively. The calculated effective moisture diffusivity coefficient for quinoa sprouts dried under a 250 W infrared lamp at distances of 5, 7.5, and 10 cm were $6.60 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, $2.55 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, and $0.83 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, respectively. To investigate the drying kinetics of quinoa sprouts, various mathematical models were fitted to the experimental data, and the Page model, which had the best fit and the least error, was selected as the best model. In general, using the infrared heat source with a power of 250 W at a distance of 5 cm from surface of the quinoa sprouts is recommended for drying this product, as it has a short drying time and does not burn.