



استفاده از روش‌های هوای داغ، فرورسرخ و مایکروویو برای خشک کردن جوانه‌های چرخ شده نخود

کیمیا گوهرپور^۱، فخرالدین صالحی^{۲*}، امیر دارایی گرمه‌خانی^۳

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.

۳- دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده فنی و منابع طبیعی تویسرکان، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخ های مقاله :</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۳۰</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲</p>	<p>فرآیند جوانه‌زنی شامل تغییراتی در ویژگی‌های تغذیه‌ای، بیوشیمیایی و حسی است که باعث بهبود کیفیت و افزایش قابلیت هضم می‌شود. از جوانه‌های چرخ شده و خشک شده نخود برای تهیه محصولات مختلفی مانند فلافل استفاده می‌شود. لذا در این پژوهش استفاده از روش‌های هوای داغ (دمای ۷۰ درجه سلسیوس)، فرورسرخ (توان ۲۵۰ وات) و مایکروویو (توان ۲۲۰ وات) برای خشک کردن جوانه‌های چرخ شده نخود بررسی و مدل‌سازی شد. زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن فرورسرخ از دو خشک‌کن دیگر کمتر بود. متوسط زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن‌های هوای داغ، فرورسرخ و مایکروویو به ترتیب برابر ۶۳/۳، ۲۶/۷ و ۱۵۶/۷ دقیقه بود. در این پژوهش، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های چرخ شده نخود در خشک‌کن‌های هوای داغ، فرورسرخ و مایکروویو به ترتیب برابر $1.56 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$، $8.99 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و $1.79 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و $1.59 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به دست آمد. جهت بررسی سینتیک خشک شدن جوانه‌های چرخ شده نخود، مدل‌های ریاضی ونگ و سینگ، هندسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی بر داده‌های تجربی برازش داده شدند. در نهایت، در مدل‌سازی فرآیند خشک کردن این محصول، مدل ریاضی میدیلی با چهار پارامتر به دلیل حداقل خطا به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد.</p>
<p>کلمات کلیدی:</p> <p>خشک کردن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، فرورسرخ، مایکروویو، مدل‌سازی، نخود.</p> <p>DOI: 10.22034/FSCT.21.148.154.</p> <p>مسئول مکاتبات: * F.Salehi@Basu.ac.ir</p>	

۱- مقدمه

حبوبات بعد از غلات، رتبه دوم را به عنوان منبع غذایی ضروری در سراسر جهان دارند و در کشورهای در حال توسعه، بخش قابل توجهی از پروتئین رژیم غذایی افراد از طریق حبوبات مختلفی مانند نخود، نخود سبز، ماش، سویا، لوبیا و عدس تأمین می‌شود. مقدار پروتئین حبوبات (۲۰-۵۰ درصد) در مقایسه با غلات و سایر محصولات و ریشه‌های نشاسته‌ای نسبتاً بالاتر است [۱، ۲]. نخود (*Cicer arietinum L.*) به طور گسترده در مناطق گرمسیری، نیمه گرمسیری و معتدل رشد می‌کند و سومین محصول مهم (بعد از سویا و لوبیا) از خانواده حبوبات در جهان است [۱، ۳، ۴]. دانه‌های نخود منبع خوبی از پروتئین، کربوهیدرات، فیبر، ویتامین‌ها و مواد معدنی (K, Fe, Ca, Mg, P) و ویتامین‌هایی مانند نیاسین، تیامین، ریبوفلاوین، ویتامین‌های B و بتاکاروتن هستند [۱].

فرآیند جوانه‌زنی شامل تغییراتی در ویژگی‌های تغذیه‌ای، بیوشیمیایی و حسی است که باعث بهبود کیفیت حبوبات می‌شود. از این فرآیند در فرآوری حبوبات برای بهبود کیفیت تغذیه‌ای استفاده می‌شود، زیرا باعث بهبود قابلیت هضم می‌شود. همچنین طی این فرآیند مقدار ترکیبات فنلی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی محصول افزایش می‌یابد [۵-۹]. برای فرآوری و خشک کردن هر محصول نیاز است تا بهترین روش خشک کردن در شرایط بهینه استفاده شود تا کمترین افت کیفیت در محصول مورد نظر ایجاد شده و عملیات در کمترین زمان انجام شود [۱۰، ۱۱]. متداول‌ترین روش خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده از جریان هوای داغ و به روش انتقال حرارت جابه‌جایی است که شامل انتقال جرم و حرارت هم‌زمان در محصول می‌باشد. خشک کردن هوای داغ علی‌رغم مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما و شرایط فرآیند دارای معایبی مانند زمان طولانی فرآیند و افت کیفیت محصول، در مقایسه با سایر روش‌های نوین است [۱۲].

یکی از روش‌های کاهش زمان خشک شدن و بهبود خصوصیات کیفی محصول خشک‌شده، استفاده از پرتو فرسرخ است. استفاده از تابش فرسرخ باعث افزایش سرعت خشک کردن، حفظ کیفیت محصول نهایی و کاهش هزینه‌های فرآیند تولید به دلیل کاهش مصرف انرژی می‌شود [۱۳]. ناچایسین و همکاران (۲۰۱۵) از روش ترکیبی فرسرخ - هوای داغ برای خشک کردن برنج قهوه‌ای جوانه‌زده فوری استفاده کردند. بر اساس نتایج گزارش شده در این پژوهش، استفاده از تابش فرسرخ منجر به افزایش سرعت خشک شدن و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن گردید. با افزایش شدت پرتو دهی نیز مصرف انرژی کاهش یافت [۱۴].

امواج مایکروویو یک منبع گرمایش سریع و مؤثر هستند که مستقیماً بر کل ماده غذایی تأثیر می‌گذارند و در نتیجه واکنش‌های فیزیکی‌شیمیایی و سرعت خشک شدن را تسریع کرده و باعث تولید محصول خشک‌شده با کیفیت بالا می‌شوند [۱۵]. نتایج گزارش‌های مربوط به مطالعات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو سبب آسیب کمتر به ترکیبات تغذیه‌ای موجود در گیاهان می‌شود [۱۶]. بوآلوانگ و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر خشک کردن با مایکروویو بر کیفیت ذرت جوانه‌زده را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که خشک کردن با مایکروویو (توان ۳۰۰ وات) منجر به حفظ ارزش غذایی و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی جوانه‌های خشک‌شده ذرت می‌شود [۱۷].

از جوانه‌های چرخ‌شده نخود به عنوان ترکیب اصلی فلافل استفاده می‌شود [۴، ۱۸]. بررسی و استفاده از روش‌های جدید مانند فرسرخ باعث کاهش زمان خشک شدن محصولات کشاورزی می‌شود. لذا در این پژوهش استفاده از روش‌های هوای داغ، فرسرخ و مایکروویو برای خشک کردن جوانه‌های چرخ‌شده نخود بررسی و مدل‌سازی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه جوانه‌های چرخ‌شده نخود

پارامتر نسبت رطوبت^۲ (MR) می‌تواند داده‌های به‌دست‌آمده از فرآیند خشک‌کردن را یکنواخت و یکدست‌تر نماید. با داشتن رطوبت اولیه محصول و کاهش وزن آن، پارامتر نسبت رطوبت حین خشک شدن محصول از طریق رابطه ۱، محاسبه می‌گردد [۱۹].

(۱)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

در این رابطه، MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t محتوای رطوبت بر مبنای خشک در هر زمان t (گرم آب بر گرم ماده خشک)، M_0 محتوای رطوبت اولیه بر مبنای خشک و M_e محتوای رطوبت تعادلی (گرم آب بر گرم ماده خشک) است. 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 طی خشک شدن را به‌صورت رابطه ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نمی‌باشد [۲۰].

(۲)

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

۲-۶- محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

در سراسر فرآیند خشک‌کردن، انتشار پدیده‌ی غالب انتقال رطوبت از مرکز نمونه به سطح است، بنابراین در این مطالعه فضای انتقال جرم به‌صورت یک صفحه تخت (لایه نازک) در نظر گرفته شد و حذف رطوبت بر اساس قانون دوم فیک، طبق رابطه‌ی ۳ محاسبه شد [۲۱].

(۳)

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

در این رابطه، L نصف ضخامت لایه (برحسب متر)، n تعداد عبارات در نظر گرفته‌شده از معادله، t زمان خشک شدن (s) و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m^2s^{-1}) می‌باشند. به‌صورت

2- Moisture ratio (MR)

برای انجام این پژوهش، نخود بسته بندی شده از شرکت سحر (همدان) تهیه شد. نخودها پس از شستشو در آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خیسانده شدند. در ادامه، آب اضافی آنها کاملاً گرفته شده و جوانه‌زنی نخودها درون ظرفی که روی آن با حوله نازک پوشانده شده بود، طی مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام گردید (هر ۶ ساعت آب نمونه‌ها تعویض می‌شد). برای چرخ کردن نخودهای جوانه‌زده از چرخ گوشت ناسیونال (ژاپن) مدل MK-G20NR استفاده شد.

۲-۲- خشک کردن با هوای داغ

برای خشک کردن جوانه‌های چرخ‌شده نخود، نمونه‌ها به‌صورت لایه‌نازک داخل ظروف آلومینیومی ریخته شد و سپس داخل آن فن‌دار (شیماز، ایران) با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. تغییرات وزن نمونه‌ها طی خشک شدن تا دستیابی به وزن ثابت، هر ۵ دقیقه توسط ترازوی دیجیتال لوترون^۱ (تایوان) با دقت ± 0.01 گرم، ثبت گردید.

۲-۳- خشک کردن با فروسرخ

در این پژوهش جهت خشک کردن جوانه‌های چرخ‌شده نخود از خشک‌کن فروسرخ با توان ۲۵۰ وات استفاده گردید و فاصله نمونه‌ها از سطح لامپ ۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تغییرات وزن نمونه‌ها طی خشک شدن هر پنج دقیقه توسط ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.01 گرم، ثبت گردید.

۲-۴- خشک کردن با مایکروویو

جهت خشک کردن جوانه‌های چرخ‌شده نخود با مایکروویو، از دستگاه مایکروویو خانگی با توان ۲۲۰ وات (۲۰ درصد توان اصلی دستگاه) استفاده گردید. در این خشک‌کن نیز تغییرات وزن نمونه‌ها طی خشک شدن هر پنج دقیقه توسط ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.01 گرم، ثبت گردید.

۲-۵- محاسبه پارامتر نسبت رطوبت

1- Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)

داده‌های تجربی خشک‌کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها نیز از نرم‌افزار متلب و ویرایش R2012a استفاده شد.

۸-۲- آنالیز آماری

آزمون‌های خشک‌کردن در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای رسم نمودارها نیز از برنامه Excel (۲۰۰۷) استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی سینتیک انتقال جرم

در شکل ۱ زمان خشک شدن جوانه‌های چرخ‌شده نخود در سه خشک‌کن هوای داغ، فروسرخ و میکروویو گزارش شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن فروسرخ از دو خشک‌کن دیگر کمتر می‌باشد. با توجه به اینکه توان‌های بالای دستگاه میکروویو باعث سوختن محصول می‌شود، لذا در این پژوهش توان میکروویو برای خشک‌کردن جوانه‌های چرخ‌شده نخود بر روی ۲۲۰ وات تنظیم شد، لذا زمان خشک شدن محصول در این خشک‌کن نسبت به خشک‌کن هوای داغ بیشتر شد.

در شکل ۲ سرعت خروج رطوبت از جوانه‌های چرخ‌شده نخود هنگام خشک شدن در سه خشک‌کن هوای داغ، فروسرخ و میکروویو گزارش شده است. این شکل نشان می‌دهد که سرعت خروج رطوبت از نمونه‌های قرار گرفته در خشک فروسرخ بیشتر از دو خشک‌کن دیگر است. نجیب و همکاران (۲۰۲۲) زمان خشک شدن دو رقم عدس در خشک‌کن ترکیبی میکروویو-فروسرخ را بسته به توان سیستم در محدوده ۵/۵ تا ۱۰۰ دقیقه گزارش دادند که با افزایش توان میکروویو و فروسرخ، زمان خشک‌کردن کاهش یافت [۲۲]. در پژوهشی آقاجانی و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر دما و زمان خشک‌کردن هوای داغ بر میزان افت وزن،

متداول، جمله‌ی اول این سری در نظر گرفته شد و معادله‌ی بالا به صورت رابطه ۴ ساده و ضریب نفوذ مؤثر از طریق این رابطه و محاسبه شیب به دست آمد.

(۴)

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

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

(۵)

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

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

(۶)

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$$

در این رابطه، Slope شیب خط می‌باشد.

۷-۲- مدل‌سازی سینتیکی

با به‌کارگیری مدل‌های ریاضی می‌توان با صرف هزینه و زمان کمتر به درک بهتر از فرآیند خشک‌کردن به‌عنوان تابعی از متغیرهای گوناگون دست یافت. در این مطالعه، به‌منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن جوانه‌های چرخ‌شده نخود، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های تجربی مختلف خشک‌کردن، مدل‌سازی سینتیکی انجام گردید. معادله‌های ونگ و سینگ، هندسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی [۲۱]، برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند. به‌منظور مدل‌کردن

خشک کردن تأثیر بیشتری بر تغییرات این دو پارامتر در مقایسه با دمای خشک کردن دارد [۲۳].

ترکیبات فنلی کل و ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی برگ نعنای را بررسی و با روش سطح پاسخ بهینه‌سازی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش زمان و دمای خشک کردن میزان افت وزن و ترکیبات فنلی کل برگ نعنای افزایش یافته و زمان

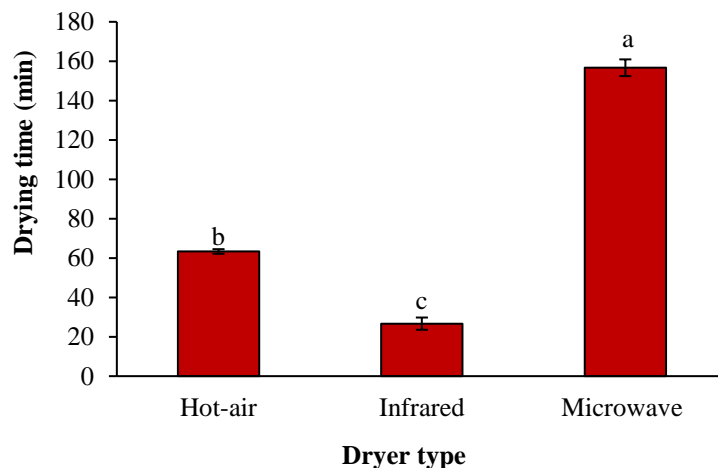


Fig 1- Drying time of ground chickpea sprouts at different dryers. Means with different superscripts differ significantly ($P < 0.05$).

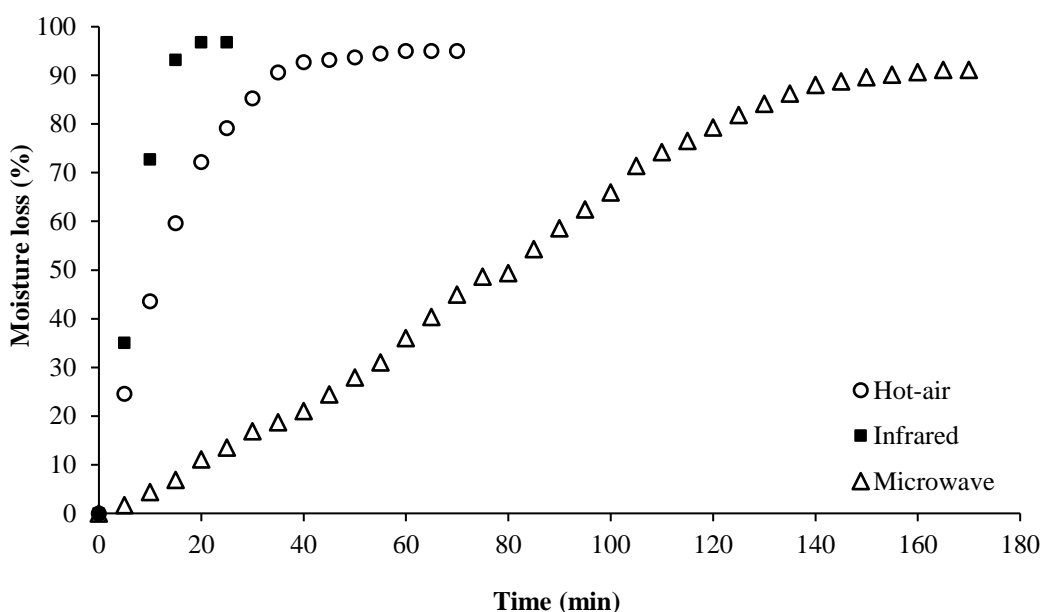


Fig 2- Moisture loss rate of ground chickpea sprouts during drying at different dryers.

۲-۳- نتایج محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

شکل ۳ روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت (LnMR) را نسبت به زمان خشک شدن جوانه‌های چرخ‌شده نخود در سه خشک‌کن هوای داغ، فرسرخ و مایکروویو را نشان می‌دهد. شیب این خطوط جهت محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده گردید.

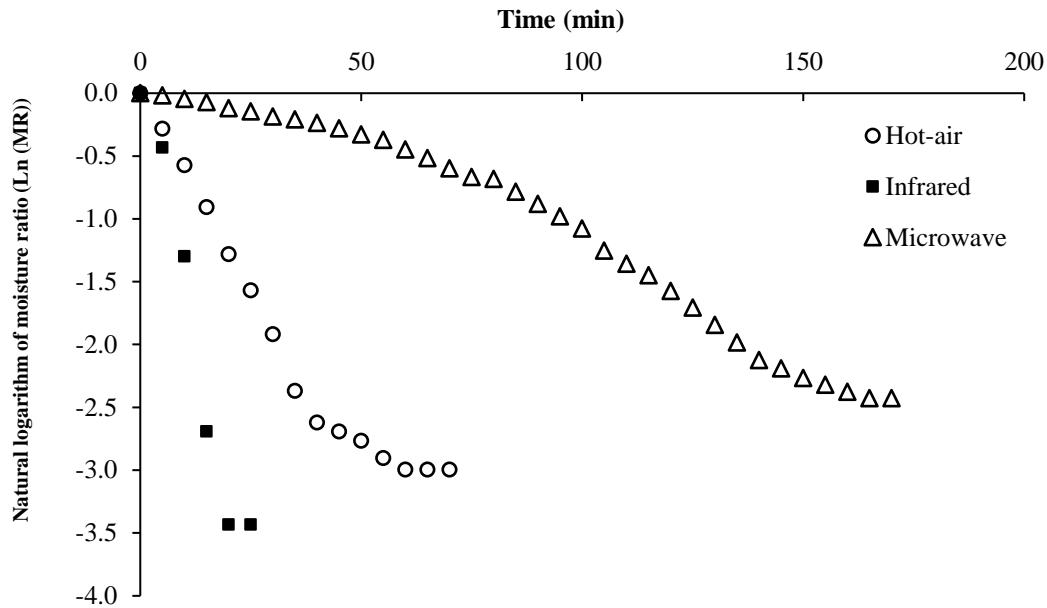


Fig 3- Variations of the natural logarithm of moisture ratio (Ln (MR)) values versus drying time of ground chickpea sprouts at different dryers.

مایکروویو-بستر سیال را مطالعه کردند. این پژوهشگران ضریب نفوذ مؤثر رطوبت دانه‌های عدس با در نظر گرفتن قانون دوم انتشار فیک در یک جهت در یک کره با شرایط مرزی همرفتی و همچنین مقاومت خارجی ناچیز در برابر انتقال جرم را برابر $0.44 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ برای هوای داغ (در 50°C درجه سلسیوس) و برابر $3.06 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ برای روش ترکیبی گزارش کردند [۲۴].

همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جوانه‌های چرخ‌شده نخود در خشک‌کن فرسوخ از دو خشک‌کن دیگر بیشتر می‌باشد. در این پژوهش، مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های چرخ‌شده نخود در خشک‌کن‌های هوای داغ، فرسوخ و مایکروویو به ترتیب برابر $1.7/95 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ، $1/59 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ و $4/99 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ بود. طاهری و همکاران (۲۰۲۰) سینتیک خشک شدن دانه‌های عدس قرمز توسط خشک‌کن ترکیبی

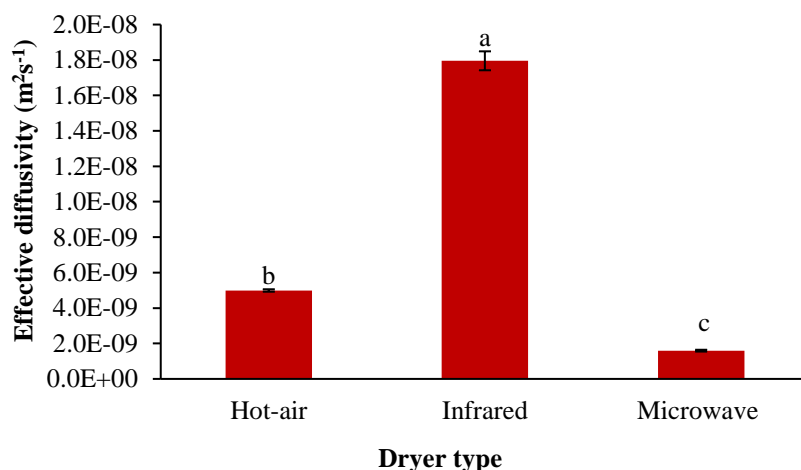


Fig 4- Effective moisture diffusivity values (D_{eff}) of ground chickpea sprouts at different dryers. Means with different superscripts differ significantly ($P < 0.05$).

با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه طی فرآیند خشک‌کردن جوانه‌های چرخ‌شده نخود و

۳-۳- انتخاب بهترین مدل سینتیکی

(min) و a, b, c, d, k, n ، ثابت‌های مدل‌ها می‌باشند. 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 جوانه‌های چرخ‌شده نخود، مدل میدیلی است.

برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت- زمان، به‌وسیله مدل‌های ونگ و سینگ، هندسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۱ مجموع مربعات خطا^۳ (SSE)، ضریب تبیین^۴ (r) و جذر میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE) و همچنین ضرایب این مدل‌ها ارائه شده است. در این جدول، MR، نسبت رطوبت، t زمان

Table 1- The statistical parameters obtained in order to verify the fit of each mathematical model to the observed data during drying of ground chickpea sprouts (hot-air drying data)

Model number	Model name	Model equation	Model constants	SSE	r	RMSE
1	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	a=-0.0402 b=0.0004	0.0483	0.9802	0.0609
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	a=1.0080 k=0.0616	0.0051	0.9979	0.0198
3	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	a=-0.0293 k=0.7070 b=0.0889	0.0049	0.9980	0.0202
4	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	k=0.0586 n=1.0150	0.0051	0.9979	0.0199
5	Newton	$MR = \exp(-kt)$	k=0.0612	0.0052	0.9979	0.0193
6	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	a=0.9965 k=0.446 n=1.1280 b=0.0006	0.0008	0.9997	0.0084
7	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	a=0.9954 k=0.0661 c=-0.0219	0.0033	0.9986	0.0167

جدول ۲ گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب در محدوده ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۰۱۹۹، ۰/۹۹۵۱ تا ۰/۹۹۹۸ و ۰/۰۰۸۴ تا ۰/۰۲۶۶ بود.

با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل میدیلی و تناسب بیشتر این معادله با داده‌های آزمایشگاهی هنگام بررسی سینتیک خشک شدن جوانه‌های چرخ‌شده نخود، میانگین ضرایب این مدل در

Table 2- The constants and coefficients of the Midilli model

Dryer type	a	k	n	b	SSE	r	RMSE
Hot-air	0.9942	0.0355	1.1840	0.0006	0.0018	0.9993	0.0119
Infrared	0.9980	0.0268	1.6750	0.0004	0.0005	0.9997	0.0133
Microwave	0.9932	-0.0004	0.7920	-0.0084	0.0143	0.9972	0.0210

شده است. همان‌طوری که این شکل نشان می‌دهد، انطباق خوبی بین نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل وجود دارد؛ بنابراین، مدل میدیلی پیشنهادی برای پیش‌بینی تغییرات نسبت رطوبت جوانه‌های چرخ‌شده نخود

به‌منظور معتبر سازی مدل میدیلی پیشنهادی، مقادیر تغییرات نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل میدیلی و مقادیر نسبت رطوبت تجربی به دست آمده در شکل ۵ نشان داده

5- Root mean square error (RMSE)

3- Sum of squared error (SSE)

4- Correlation coefficient (r)

ضریب همبستگی و کمترین خطا، مناسب‌ترین مدل برای بررسی فرآیند خشک‌شدن آلبالو در خشک‌کن مایکروویو- خلاصاً است [۲۵].

هنگام خشک شدن در سه خشک‌کن هوای داغ، فرورسرخ و مایکروویو مناسب می‌باشد. قادری و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که مدل میدلی به دلیل دارا بودن بالاترین

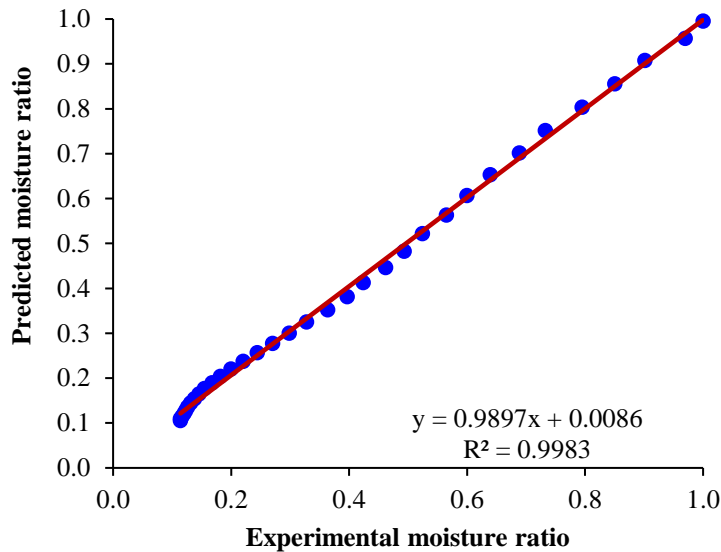


Fig 5- Comparison of fitted data by Midilli model with experimental results (microwave drying data).

نخود در خشک‌کن فرورسرخ، استفاده از این نوع خشک‌کن برای خشک‌کردن این محصول و محصولات مشابه توصیه می‌شود. همچنین، در این پژوهش برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن جوانه‌های چرخ‌شده نخود، از مدل‌های مختلفی استفاده شد و مدل میدلی به دلیل مقدار خطای کمتر، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب گردید.

۵- تشکر و قدردانی

از حمایت مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا از این پژوهش، قدردانی می‌کنیم.

۶- منابع

- [1] Ghoshal, G., Kaushal, K. 2020. Extraction, characterization, physicochemical and rheological properties of two different varieties of chickpea starch, *Legume Science*. 2, e17.
- [2] Elobuike, C. S., Idowu, M. A., Adeola, A. A., Bakare, H. A. 2021. Nutritional and functional attributes of mungbean (*Vigna radiata* [L] Wilczek) flour as affected by sprouting time, *Legume Science*. 3, e100.
- [3] Doddamani, D., Katta, M. A., Khan, A. W., Agarwal, G., Shah, T. M., Varshney, R. K. 2014. CicArMiSatDB: the chickpea microsatellite database, *BMC Bioinformatics*. 15, 212.
- [4] Bidkhor, P., Mohammadpour Karizaki, V. 2022. Diffusion and kinetic modeling of water absorption

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش استفاده از روش‌های هوای داغ، فرورسرخ و مایکروویو برای خشک‌کردن جوانه‌های چرخ‌شده نخود مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن فرورسرخ کوتاه‌تر از دو خشک‌کن دیگر می‌باشد. همچنین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و سرعت خروج رطوبت از نمونه‌ها در این خشک‌کن بیشتر از خشک‌کن‌های هوای داغ و مایکروویو بود. در مجموع، با توجه به زمان کوتاه‌تر خشک شدن جوانه‌های چرخ‌شده

process during soaking and cooking of chickpea, *Legume Science*. 4, e116.

[5] 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.

[6] Oghbaei, M., Prakash, J. 2016. Effect of primary processing of cereals and legumes on its nutritional quality: A comprehensive review, *Cogent Food & Agriculture*. 2, 1136015.

[7] El-Adawy, T. A., Rahma, E. H., El-Bedawey, A. A., El-Beltagy, A. E. 2003. Nutritional potential and functional properties of germinated mung bean, pea and lentil seeds, *Plant Foods for Human Nutrition*. 58, 1-13.

- [8] Sofi, S. A., Rafiq, S., Singh, J., Mir, S. A., Sharma, S., Bakshi, P., McClements, D. J., Mousavi Khaneghah, A., Dar, B. N. 2023. Impact of germination on structural, physicochemical, techno-functional, and digestion properties of desi chickpea (*Cicer arietinum* L.) flour, *Food Chemistry*. 405, 135011.
- [9] Kim, S. M., Aung, T., Kim, M. J. 2022. Optimization of germination conditions to enhance the antioxidant activity in chickpea (*Cicer arietinum* L.) using response surface methodology, *Korean Journal of Food Preservation*. 29, 632-644.
- [10] 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 (Iran)*. 13, 81-91.
- [11] Khodadadi, M., Masoumi, A., Sadeghi, M., Moheb, A. 2023. Optimization of drying specification and protein losses of poultry litter during drying process using response surface methodology, *Thermal Science and Engineering Progress*. 43, 101958.
- [12] Mujumdar, A. S. 2014. Handbook of industrial drying, CRC press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London,
- [13] 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.
- [14] Nachaisin, M., Jamradloedluk, J., Niamnuy, C. 2016. Application of combined far-infrared radiation and air convection for drying of instant germinated brown rice, *Journal of Food Process Engineering*. 39, 306-318.
- [15] Wray, D., Ramaswamy, H. S. 2015. Novel concepts in microwave drying of foods, *Drying Technology*. 33, 769-783.
- [16] Akbarian Meymand, M. J., Faraji Kafshgari, S., Mahmodi, E., Vatankhah, M. 2015. The effect of using microwave pretreatment in drying roots nutmeg on antimicrobial properties against pathogenic bacteria and spoilage molds, *Iranian Journal of Medical Microbiology*. 9, 47-55.
- [17] Bualuang, O., Onwude, D. I., Pracha, K. 2017. Microwave drying of germinated corn and its effect on phytochemical properties, *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 97, 2999-3004.
- [18] Ismail, M., Kucukoner, E. 2017. Falafel: A meal with full nutrition, *Food and Nutrition Sciences*. 8, 1022-1027.
- [19] Salehi, F., Inanloodoghous, M., Ghazvineh, S. 2023. Influence of microwave pretreatment on the total phenolics, antioxidant activity, moisture diffusivity, and rehydration rate of dried sweet cherry, *Food Science & Nutrition*. 11, 7870-7876.
- [20] Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of Food Engineering*. 79, 243-248.
- [21] 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.
- [22] Najib, T., Heydari, M. M., Meda, V. 2022. Combination of germination and innovative microwave-assisted infrared drying of lentils: effect of physicochemical properties of different varieties on water uptake, germination, and drying kinetics, *Applied Food Research*. 2, 100040.
- [23] Aghajani, N., Daraei Garmakhany, A., Sari, A. A., Nourozi, M. a. 2023. Hot oven drying of mint leaves: modeling weight loss, phenolic compounds and antioxidant properties variation by using response surface method, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 19, 127-140.
- [24] Taheri, S., Brodie, G., Gupta, D. 2020. Microwave fluidised bed drying of red lentil seeds: Drying kinetics and reduction of botrytis grey mold pathogen, *Food and Bioproducts Processing*. 119, 390-401.
- [25] Ghaderi, A., Abbasi, S., Motevali, A., Minaei, S. 2011. Selection of a mathematical model for drying kinetics of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) in a microwave-vacuum dryer, *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*. 6, 55-64.



Scientific Research

Application of hot-air, infrared, and microwave methods for drying ground of chickpea sprouts

Kimia Goharpour¹; Fakhreddin Salehi^{2*}; Amir Daraei Garmakhany³

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.

³ Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Toyserkan Faculty of Engineering and Natural Resources, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2023/11/21

Accepted: 2024/1/22

Keywords:

Chickpea,
Drying,
Effective moisture diffusivity coefficient,
Infrared,
Microwave,
Modeling.

DOI: 10.22034/FSCT.21.148.154.

*Corresponding Author E-Mail:
F.Salehi@Basu.ac.ir

The sprouting process includes changes in nutritional, biochemical, and sensory characteristics that improve chickpea quality and increase its digestibility. Various products such as Falafel are made from ground and dried chickpea sprouts. Therefore, in this research, the use of hot air (70°C), infrared (250 W), and microwave (220 W) methods for drying ground chickpea sprouts was investigated and modeled. The drying time of the samples in the infrared dryer was shorter than the other two dryers. The average drying time of the samples in the hot air, infrared and microwave dryers was 63.3, 26.7, and 156.7 min, respectively. In this research, the effective moisture diffusivity coefficient of ground chickpea sprouts in hot air, infrared and microwave dryers was determined to be $4.99 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $17.95 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, and $1.59 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectively. To study the drying kinetics of ground chickpea sprouts, Wang and Singh, Henderson and Pabis, Approximation of diffusion, Page, Newton, Midilli, and Logarithmic mathematical models were fitted to the experimental data. Finally, when modeling the drying process of this product, Midilli's mathematical model with four parameters was chosen as the best model due to its minimal error.