



اثر امواج فراصوت و روش خشک کردن بر سینتیک افت رطوبت و آبگیری مجدد گندم جوانه زده

سمیرا امین اخلاص^۱، محمدرضا پژوهی الموتی^{۲*}، فخرالدین صالحی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه بهداشت و کنترل کیفی مواد غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲- دانشیار، گروه بهداشت و کنترل کیفی مواد غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

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

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

کلمات کلیدی:

جوانه گندم،

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت،

فروسرخ،

مدل پیچ،

هوای داغ.

DOI: 10.22034/FSCT.19.135.159
DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.135.13.9

* مسئول مکاتبات:

Mr.pajohi@basu.ac.ir

در این پژوهش اثر زمان فراصوت و نوع خشک کن (هوای داغ و فروسرخ) بر زمان خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبگیری مجدد جوانه های گندم بررسی و سینتیک خشک شدن مدل سازی شد. برای اعمال پیش تیمار فراصوت، جوانه ها به مدت ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه داخل دستگاه حمام فراصوت قرار گرفتند و بعد از خروج از دستگاه و حذف رطوبت اضافی، نمونه ها به صورت لایه نازک داخل خشک کن های هوای داغ (با دمای ۷۰ درجه سلسیوس) و فروسرخ (توان ۲۵۰ وات) قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار فراصوت تا ۵ دقیقه، سبب افزایش سرعت خروج رطوبت از جوانه ها، افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه باعث کاهش زمان خشک کردن می گردد. با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۵ دقیقه، میانگین زمان خشک شدن جوانه ها در خشک کن های هوای داغ و فروسرخ به ترتیب از ۱۲۶/۷ دقیقه به ۱۲۰/۰ دقیقه و ۲۵/۷ دقیقه به ۲۱/۳ دقیقه کاهش یافت. متوسط زمان خشک شدن نمونه ها در خشک کن هوای داغ ۱۵۰/۸ دقیقه و در خشک کن فروسرخ ۲۸/۰ دقیقه بود. همچنین متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه شده برای نمونه های قرار گرفته در خشک کن هوای داغ برابر $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و برای خشک کن فروسرخ برابر $8 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بود. زمان اعمال امواج فراصوت و روش خشک کردن تأثیر معنی داری بر آبگیری مجدد نمونه ها داشتند و مقدار این پارامتر برای نمونه های خشک شده در خشک کن هوای داغ بیشتر بود. جهت بررسی سینتیک خشک شدن جوانه های گندم، مدل های ریاضی بر داده های آزمایشگاهی برازش و در مجموع مدل پیچ با دو پارامتر (k و n) بر اساس بالاترین صحت به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. به طور کلی، بهترین شرایط برای خشک کردن جوانه های گندم، ۵ دقیقه پیش تیمار با فراصوت و سپس استفاده از خشک کن فروسرخ بود.

۱- مقدمه

امروزه، استفاده از غلات جوانه زده در رژیم غذایی افراد به دلیل انتشار نتایج تحقیقات علمی در زمینه ارزش های غذایی و محتویات فیتوشیمیایی آنها افزایش یافته است [۱]. غلات جوانه زده به طور چشمگیری طی مدت جوانه زنی حاوی منابع غذایی ارزشمندی می شوند. این ترکیبات مغذی شامل ویتامین ها و ترکیبات ثانویه می باشد که عوامل ضد تغذیه ای این محصولات را کاهش می دهند [۲]. علاوه بر این، جوانه زدن بر فرآیندهای تکنولوژیکی و کیفیت فرآورده های حاصل از آن اثر فراوان و مفیدی دارد. هنگام جوانه زدن درصد مواد محلول و قندهای احیاء کننده و همچنین حجم دانه افزایش می یابد. گندم جوانه زده دارای فعالیت آنزیمی بالایی است و آنزیم های متعددی از جمله آلفا آمیلاز، بتا آمیلاز و مالتاز در طول جوانه زدن فعال می شود و باعث تجزیه نشاسته و تولید قندهای احیاء کننده می گردند. پودر گندم جوانه زده دارای ارزش غذایی بالایی بوده و شامل قندهای محلول، اسیدهای آمینه ضروری، اسیدهای چرب (عمدتاً اسید لینولئیک و اسید لینولئیک)، املاح و ویتامین ها (B_1 (تیامین)، B_2 (ریبوفلاوین)، B_5 (اسید پانتوتنیک)، B_6 (پیریدوکسین)، B_7 (بیوتین) و E) می باشد [۳، ۴].

از جوانه گندم خشک شده و پودر آن می توان برای غنی سازی محصولات مختلف غذایی از جمله انواع نودل، ماکارونی، نان، کیک، غلات صبحانه، فرآورده های گوشتی و کباب استفاده کرد [۵، ۶]. بررسی و انتخاب روش مناسب برای خشک کردن محصولات جوانه زده ضروری می باشد. برای مثال جریبی و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر روش خشک کردن (انجمادی، هوای داغ و ماکروویو-خلا) بر خصوصیات جوانه گندم دوروم را بررسی و استفاده از روش ماکروویو-خلا را برای خشک کردن جوانه گندم توصیه کردند [۷]. در پژوهش دیگری شینگار و همکاران (۲۰۱۳) از خشک کن بستر سیال برای خشک کردن گندم جوانه زده استفاده کردند. جوانه زنی باعث افزایش معنی داری در محتوای پروتئین شد. شرایط خشک کردن بر رنگ و شاخص های رنگی جوانه تأثیرگذار بود و در طول خشک شدن، روشنایی محصول افزایش یافت، در حالی که زردی و قرمزی کاهش یافت. گندم جوانه زده خشک شده، بازسازی عالی را از خود نشان داد و کیفیت خود را حفظ کرد. در این پژوهش داده های آزمایشگاهی با استفاده از معادله انتشار فیک

مدل سازی و ضرایب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه و گزارش شدند [۵].

یکی از روش های خشک کردن محصولات کشاورزی، استفاده از تابش فروسرخ است که باعث افزایش سرعت خشک کردن، حفظ کیفیت محصول نهایی و کاهش هزینه های فرآیند تولید به دلیل کاهش مصرف انرژی می شود. استفاده از این روش به عنوان یک فناوری جدید در بخش های مختلفی از صنایع غذایی مانند خشک کردن میوه ها و سبزی ها توسعه یافته است [۸]. در همین راستا، حسنی و همکاران (۲۰۲۰) خشک شدن سماق با روش های مختلف از جمله آفتابی و سایه، فروسرخ و ماکروویو را بررسی کردند و دریافتند که مقادیر اسیدهای آلی و ویتامین C در محصول خشک شده به روش فروسرخ نسبت به روش ماکروویو مقادیر بالاتری داشته و در مقایسه با روش های سنتی، خشک کن فروسرخ در زمان کمتری عملیات خشک کردن را انجام می دهد. علاوه بر این، با استفاده از روش فروسرخ خصوصیات شیمیایی میوه سماق حفظ شده و تغییرات رنگ کمتر می باشد [۹]. فراصوت از امواج صوتی با فرکانس بالاتر از حد شنوایی انسان تشکیل شده است. با تنظیم فرکانس فراصوت، این روش را می توان در بسیاری از صنایع از جمله صنایع فرآوری مواد غذایی استفاده کرد. استفاده از امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار، یک روش غیرحرارتی مناسب برای افزایش کارایی فرآیند خشک کردن است و طی اعمال این فرآیند، ویژگی های کیفی محصول آسیب کمتری می بیند [۱۰]. استفاده از روش های جدید مانند فراصوت و فروسرخ باعث کاهش زمان خشک شدن و افزایش کیفیت محصولات خشک شده می شود. مطالعه منابع منتشر شده نشان می دهد که تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی اثر زمان اعمال فراصوت بر سینتیک خشک شدن جوانه گندم با تابش فروسرخ و هوای داغ انجام نشده است. لذا در این پژوهش اثر امواج فراصوت و روش های خشک کردن شامل هوای داغ و فروسرخ بر سینتیک افت رطوبت، زمان خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبیگری مجدد جوانه گندم بررسی و مدل سازی شد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- تهیه جوانه گندم

کاهش محتوای رطوبت جوانه‌ها، بر مبنای خشک در برابر زمان خشک کردن رسم و تأثیر تیمارهای مختلف خشک کردن بر آن مورد بررسی قرار گرفت. پارامتر نسبت رطوبت^۳ (MR) از طریق معادله ۱، محاسبه گردید [۱۱].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (۱)$$

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)، 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_t ، M_0 بسیار کوچک می‌باشد؛ بنابراین می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت معادله ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیر رطوبت تعادلی نمی‌باشد [۱۲].

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (۲)$$

۲-۶- محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

در این تحقیق، مدل نظری استفاده شده برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جوانه‌های گندم بر اساس قانون دوم نفوذ فیک^۴ و با استفاده از مختصات کروی^۵ بود. برای حل معادله فیک، ابتدا فرض می‌شود که (۱) خروج رطوبت تنها به روش نفوذ بوده، (۲) چروکیدگی حجمی قابل چشم‌پوشی است، (۳) دما در طی فرآیند ثابت است و (۴) ضرایب نفوذ در طی فرآیند ثابت باقی می‌ماند؛ سپس از معادله ۳ استفاده می‌شود [۱۳].

(۳)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 n^2 D_{eff}}{r^2} t \right]$$

برای دوره‌های خشک شدن طولانی، معادله ۳ را می‌توان تنها با استفاده از اولین عبارت در مجموعه ساده کرد، بدون اینکه بر دقت پیش‌بینی تأثیر زیادی بگذارد. با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین معادله ۳، معادله ۴ به دست می‌آید:

برای تهیه جوانه، ابتدا بذر گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم پیشگام از شهر همدان تهیه و با دقت تمیز و ضایعات آنها جدا گردید. سپس دانه‌ها شسته شد و در آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خیسانده شدند. در ادامه، آب اضافی آنها کاملاً گرفته شده و جوانه‌زنی بذرهای درون ظرفی که روی آن با حوله نازک پوشانده شده بود، طی مدت ۴۸ ساعت و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام گردید (هر ۶ ساعت آب نمونه‌ها تعویض می‌شد).

۲-۲- اعمال تیمار فراصوت

بعد از تکمیل فرآیند جوانه‌زنی دانه‌های گندم، فرآیند فراصوت داخل حمام فراصوت (مدل vCLEAN1-L2، ساخت شرکت بکر ایران) اعمال گردید. برای اعمال پیش تیمار فراصوت، جوانه‌ها به مدت ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه داخل دستگاه حمام فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و توان ۱۰۰ وات، قرار گرفتند.

۲-۳- فرآیند خشک کردن با هوای داغ

جوانه‌های تیمار شده با فراصوت، به صورت لایه نازک داخل آون فن‌دار (فن‌آزما گستر، ایران) با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن تا دستیابی به وزن ثابت، توسط ترازوی دیجیتالی (ای اندی^۱، ژاپن) با دقت ۰/۰۱ ± گرم، ثبت گردید.

۲-۴- فرآیند خشک کردن با فروسرخ

در ابتدای این فرایند همچون فرایند هوای داغ، جوانه‌های تیمار شده با فراصوت جهت خشک شدن با فروسرخ (با توان ۲۵۰ وات) به صورت لایه‌نازکی داخل دستگاه قرار داده شدند. برای پرتودهی از لامپ فروسرخ ۲۵۰ وات ساخت شرکت نور (ایران) استفاده گردید. فاصله نمونه‌ها از سطح لامپ ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن توسط ترازوی دیجیتالی^۲ با دقت ۰/۰۱ ± گرم که در زیر خشک‌کن قرار گرفته بود تا زمان رسیدن به ثبات وزن، ثبت گردید.

۲-۵- محاسبه پارامتر نسبت رطوبت

3. Moisture ratio (MR)

4. Effective moisture diffusivity coefficient (D_{eff})

5. Fick's second law of diffusion

6. Spherical coordinate

1. AND, EK-410i, Japan

2. Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)

(۴)

شدند. نمونه‌ها بعد از گذشت ۳۰ دقیقه از آب خارج شده و توزین شدند. نسبت باز جذب آب توسط معادله ۶ محاسبه و گزارش شد.

$$RR = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (6)$$

در این معادله M وزن نمونه بعد از باز جذب آب و M_0 وزن نمونه خشک می‌باشد.

۲-۹- آنالیز آماری

این پژوهش در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آزمون‌های خشک کردن در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی زمان خشک شدن

نتایج حاصل از تجزیه واریانس زمان اعمال فراصوت نوع خشک‌کن (هوای داغ و فروسرخ) بر زمان خشک شدن جوانه‌های گندم در جدول ۱ گزارش شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود اثر متغیرهای مستقل زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است ($p < 0.05$). همچنین اثرات متقابل آن‌ها نیز در سطح ۵٪ معنی‌دار شده است ($p < 0.05$).

$$\ln MR = \ln \left(\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \right) = \ln \left(\frac{6}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \right)$$

در نهایت ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های تجربی ($\ln MR$) در مقابل زمان خشک کردن و با استفاده از معادله ۵ محاسبه گردید.

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (5)$$

در این معادله‌ها، r متوسط شعاع گندم جوانه زده (m)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ($m^2 s^{-1}$)، n اعداد صحیح مثبت، t زمان خشک شدن (s) و Slope شیب خط می‌باشد.

۲-۷- مدل سازی سینتیکی

در این مطالعه، به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن جوانه‌ها، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های تجربی مختلف خشک کردن، مدل سازی سینتیکی انجام گردید. معادله‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پایس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی، برای مدل سازی فرآیند خشک کردن جوانه‌ها و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند [۱۴]. به منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها نیز از نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

۲-۸- آبیگری مجدد جوانه‌های خشک شده

برای محاسبه پارامتر آبیگری مجدد، جوانه‌های خشک شده توزین و درون آب با دمای ۵۰ درجه سلسیوس غوطه‌ور

Table 1 Results of analysis of variance for drying time parameter of wheat sprouts.

Sources of changes	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	P
Dryer	1	90528	90528	0.000
Time	3	6254	2085	0.000
Dryer × Time	3	3280	1093	0.000
Error	16	160	10	
Total	23	100222		

۱۰ و ۱۵ دقیقه، به دلیل آسیب دیدن حفرات سطحی و لوله‌های مویینه موجود در جوانه‌ها، رطوبت به سختی از نمونه‌ها خارج شده و زمان خشک کردن طولانی‌تر شده است. با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۵ دقیقه، میانگین زمان خشک شدن جوانه‌ها در خشک‌کن‌های هوای داغ و

در شکل ۱ اثر زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن (هوای داغ و فروسرخ) بر زمان خشک شدن جوانه‌های گندم گزارش شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش زمان اعمال فراصوت تا ۵ دقیقه، زمان خشک شدن نمونه‌ها، کاهش یافته است؛ اما با افزایش زمان تیماردهی با فراصوت به

بررسی کردند. در بین سطوح مختلف تیمار، فراصوت در دامنه ۴۰ درصد به مدت ۵ دقیقه نتایج قابل توجهی را نشان داد. پس از جوانه زنی، جوانه های سورگوم تیمار شده با فراصوت پروفایل برتری از فیتوکمیکال ها را نشان دادند که می توانند به عنوان ماده خام با ارزش برای تولید غذاهای عملگرا با پروتئین بالا و هزینه کم استفاده شوند [۱۶].

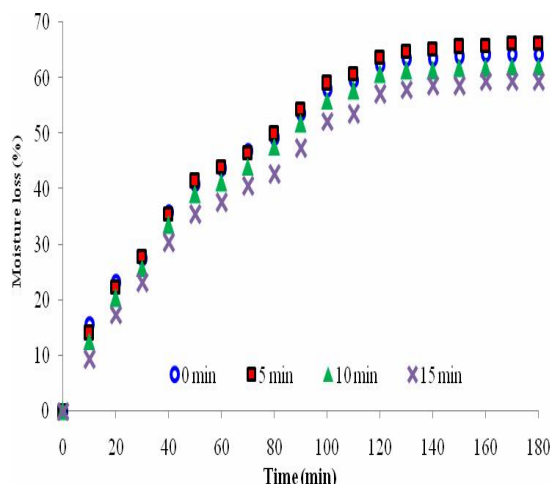


Fig2 Moisture loss of wheat sprouts during drying in the hot-air dryer

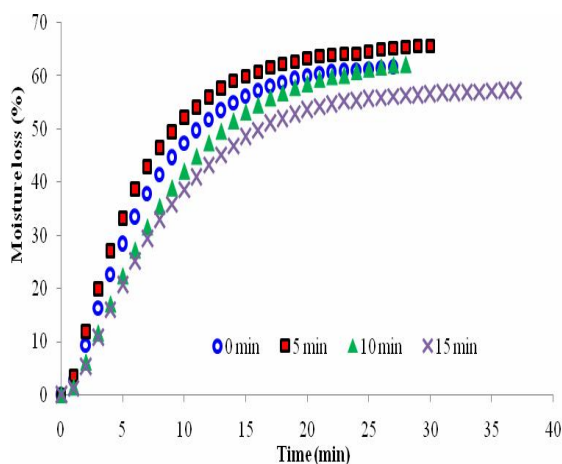


Fig 3 Moisture loss of wheat sprouts during drying in the infrared dryer

فروسرخ به ترتیب از ۱۲۶/۷ دقیقه به ۱۲۰/۰ دقیقه و ۲۵/۷ دقیقه به ۲۱/۳ دقیقه کاهش یافت. متوسط زمان خشک شدن نمونه ها در خشک کن هوای داغ ۱۵۰/۸ دقیقه و در خشک کن فروسرخ ۲۸/۰ دقیقه بود. در پژوهشی صالحی و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر توان و زمان اعمال فراصوت بر کارایی فرآیند آبزدایی اسمزی برش های موز را بررسی کردند. بر اساس نتایج این پژوهش، اعمال تیمار فراصوت موجب افزایش مقدار رطوبت خارج شده از برش های موز شد و در نتیجه کاهش زمان فرآیند آبزدایی را به همراه داشت [۱۵].

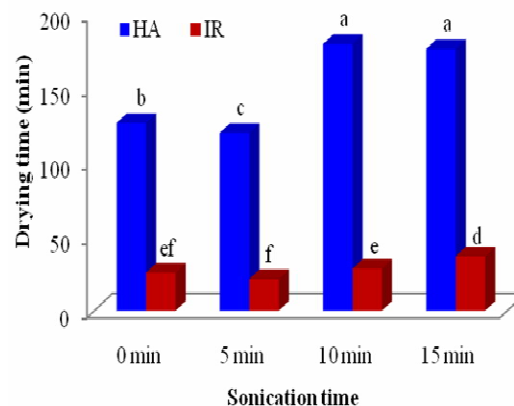


Fig 1 Effect of different ultrasound pretreatment on the drying time of wheat sprouts (HA=Hot-air dryer; IR=Infrared dryer).

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

شکل های ۲ و ۳ به ترتیب افت رطوبت جوانه های گندم تیمار شده با فراصوت طی خشک شدن در خشک کن های هوای داغ و فروسرخ را نشان می دهند. با توجه به این دو شکل، تیماردهی جوانه های گندم به مدت ۵ دقیقه توسط امواج فراصوت باعث تسریع در خروج رطوبت می شود؛ اما با افزایش زمان تیماردهی نتیجه برعکس شده و سرعت خروج رطوبت از نمونه ها کاهش یافته است. حسن و همکاران (۲۰۲۰) خصوصیات فیتوشیمیایی جوانه های سورگوم فرآوری شده با امواج فراصوت برای استفاده در غذاهای عملگرا را

۳-۲- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود با افزایش زمان اعمال فراصوت تا ۵ دقیقه، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است. با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۵ دقیقه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های گندم قرار گرفته در خشک‌کن فرسرخ از $9/5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $10/5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت ($p > 0/05$). متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه شده برای نمونه‌های قرار گرفته در خشک‌کن هوای داغ برابر $1/65 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و برای خشک‌کن فرسرخ برابر $8/59 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بود. از نظر آماری اختلاف معناداری بین مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت نمونه‌های خشک‌شده در خشک‌کن هوای داغ مشاهده نشد ($p > 0/05$). رفیعی و همکاران (۲۰۰۸) خشک‌کردن گندم در یک خشک‌کن هوای داغ با دماهای هوای ورودی برابر ۳۵، ۴۵، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس را بررسی کردند. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای گندم در این پژوهش در محدوده $0/23 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (برای ۳۵ درجه سلسیوس) تا $1/14 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (برای ۷۰ درجه سلسیوس) گزارش شده است [۱۳].

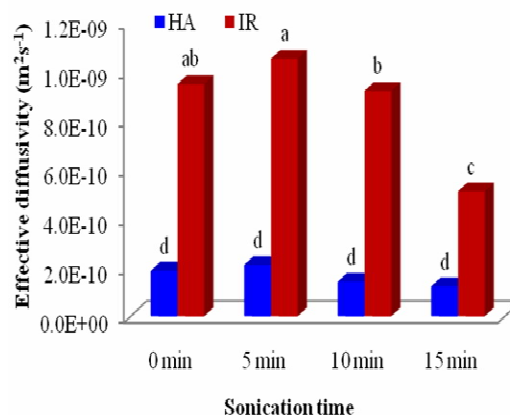


Fig 4 Effect of different ultrasound pretreatment on the effective moisture diffusivity coefficient of wheat sprouts (HA=Hot-air dryer; IR=Infrared dryer). Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$)

۳-۳- انتخاب بهترین مدل سینتیکی

با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه در طی فرآیند خشک‌کردن جوانه‌ها (با استفاده از معادله شماره ۲) و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به وسیله مدل‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی قرار گرفت. بهترین مدل می‌بایست دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین (R^2) و حداقل مقادیر خطا باشد. نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، در مورد فرآیند خشک‌کردن جوانه‌ها، مدل پیچ است. در جدول ۲ مجموع مربعات خطا^۱ (SSE)، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) و همچنین ضرایب ثابت مدل پیچ (k و n) ارائه شده است. لذا استفاده از مدل پیچ برای بررسی فرآیند خشک‌کردن جوانه‌های گندم تیمار شده با فراصوت توصیه می‌شود. هم راستا با نتایج این پژوهش، رفیعی و همکاران (۲۰۰۸) نیز استفاده از مدل پیچ برای بررسی سینتیک خشک‌کردن گندم در یک خشک‌کن هوای داغ را توصیه کرده‌اند [۱۳].

برای بررسی توانایی مدل پیچ پیشنهادی، مقادیر تغییرات نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل پیچ و مقادیر نسبت رطوبت تجربی به دست آمده (زمان پیش تیمار فراصوت برابر ۵ دقیقه و در خشک‌کن فرسرخ) در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل وجود دارد؛ بنابراین، مدل پیچ پیشنهادی برای پیش‌بینی تغییرات نسبت رطوبت نمونه‌های جوانه گندم تیمار شده با فراصوت مناسب می‌باشد.

1. Sum of squares due to error (SSE)

2. Root mean square error (RMSE)

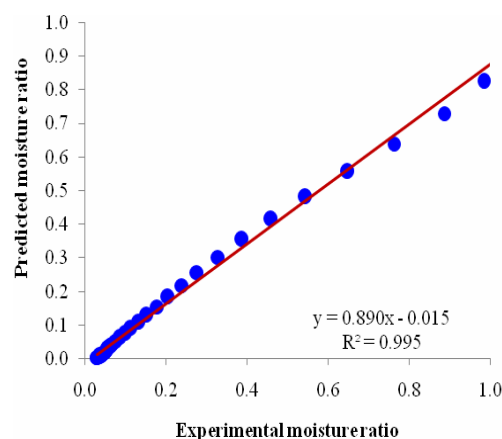
Table 2 The constants and coefficients of the approved model (Page)

Dryer type	Sonication time (min)	k	n	SSE	r	RMSE
Hot-air dryer	0	0.018	1.015	0.016	0.995	0.030
	5	0.016	1.049	0.016	0.995	0.030
	10	0.017	0.997	0.010	0.996	0.024
	15	0.016	0.985	0.008	0.997	0.022
Infrared dryer	0	0.106	1.088	0.011	0.997	0.019
	5	0.098	1.150	0.017	0.997	0.024
	10	0.058	1.232	0.011	0.998	0.020
	15	0.111	0.901	0.050	0.990	0.037

فروسرخ) بر آبیگری مجدد جوانه‌های گندم گزارش شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش زمان اعمال فراصوت تا ۵ دقیقه، آبیگری مجدد نمونه‌ها، افزایش یافته است؛ اما با افزایش زمان تیماردهی با فراصوت به ۱۰ و ۱۵ دقیقه، به دلیل آسیب دیدن حفرات سطحی و لوله‌های مویینه موجود در جوانه‌ها، آب به‌سختی وارد نمونه‌های خشک‌شده گردیده و آبیگری مجدد این نمونه‌ها کمتر شده است.

۳-۴- آبیگری مجدد

نتایج حاصل از تجزیه واریانس زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن (هوای داغ و فروسرخ) بر آبیگری مجدد جوانه‌های گندم خشک‌شده در جدول ۳ گزارش شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که اثر متغیرهای مستقل زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن در سطح ۵ درصد بر تغییر آبیگری مجدد معنی‌دار شده است ($p < 0.05$)؛ اما اثرات متقابل آن‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار نشده است ($p > 0.05$).

**Fig 5** Comparison of fitted data by Pagemodel with experimental results of moisture ratio (sonication time=5 min and at infrared dryer).

در سال‌های اخیر، استفاده از امواج فراصوت برای افزایش ارزش غذایی محصولات غذایی فرآوری شده، از طریق حفظ یا تعدیل اجزای آن‌ها، مورد توجه قرار گرفته است. در شکل ۶ اثر زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن (هوای داغ و

Table 3 Results of analysis of variance for rehydration of dried wheat sprouts in hot-air and infrared dryers.

Sources of changes	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	P
Dryer	1	2373.46	2373.46	0.000
Time	3	2816.49	938.83	0.001
Dryer × Time	3	102.51	34.17	0.773
Error	16	1460.17	91.26	
Total	23	6752.63		

۲۰۷/۵۷ درصد و ۱۸۷/۶۹ درصد بود. از نظر پارامتر آبیگری مجدد بین نمونه‌های تیمار شده با فراصوت به مدت ۵ دقیقه و خشک شده در خشک‌کن‌های هوای داغ و فروسرخ، اختلاف معناداری مشاهده نشد ($p > 0.05$).

با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۵ دقیقه، میانگین آبیگری مجدد جوانه‌ها در خشک‌کن‌های هوای داغ و فروسرخ به ترتیب از ۲۱۴/۴۶ به ۲۱۸/۲۱ درصد و ۱۹۵/۵۷ به ۲۰۴/۶۴ درصد افزایش یافت. متوسط آبیگری جوانه‌های گندم مجدد خشک‌شده در خشک‌کن‌های هوای داغ و فروسرخ به ترتیب

اخلاص است. نویسندگان از حمایت مالی و معنوی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- منابع

- [1] Benincasa, P., Falcinelli, B., Lutts, S., Stagnari, F., Galieni, A. 2019. Sprouted grains: A comprehensive review, *Nutrients*. 11, 421.
- [2] Talebi Najaf Abadi, S., Sharifi, A., Absalan, A. A. 2020. Effect of germination process on nutritional value changes and some mung bean physicochemical properties, *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*. 8, 211-224.
- [3] Liu, T., Hou, G. G., Cardin, M., Marquart, L., Dubat, A. 2017. Quality attributes of whole-wheat flour tortillas with sprouted whole-wheat flour substitution, *LWT*. 77, 1-7.
- [4] Afify, A. E.-M., Abbas, M. S., Abd El-Lattefi, B. M., Ali, A. M. 2016. Chemical, rheological and physical properties of germinated wheat and naked barley, *International Journal of ChemTech Research*. 9, 521-531.
- [5] Shingare, S. P., Thorat, B. N. 2013. Fluidized bed drying of sprouted wheat (*Triticum aestivum*), *International Journal of Food Engineering*. 10, 29-37.
- [6] Jokar, A., NoruziPaghand, A., Madani, S., Shaamirian, M., Zare, M. 2019. Using germinated wheat flour instead of flour and starch in sausage production, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 15, 61-72.
- [7] Jribi, S., Gliguem, H., Szalóki-Dorkó, L., Naar, Z., Kheriji, O., Debbabi, H. 2022. Impact of drying method on bioactive compounds, functional and thermal properties of durum wheat (*Triticum durum*) sprouts, *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI-Food Technology*. 46, 79-92.
- [8] 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.
- [9] Hasani, A., Khosh Taghaza, M. H., Ebadi, M. 2020. Effect of infrared drying on qualitative characteristics of sumac fruit

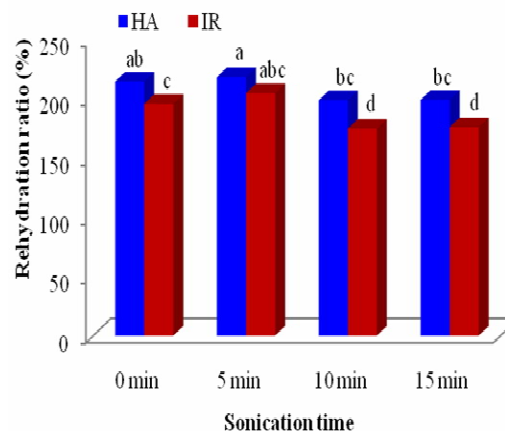


Fig 6 Effect of different ultrasound pretreatment on the rehydration of dried wheat sprouts (HA=Hot-air dryer; IR=Infrared dryer). Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$)

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر پیش تیمار فراصوت بر سینتیک خشک کردن جوانه‌های گندم در خشک‌کن‌های هوای داغ و فروسرخ مورد مطالعه قرار گرفت. متوسط زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن هوای داغ ۱۵۰/۸ دقیقه و در خشک‌کن فروسرخ ۲۸/۰ دقیقه بود. با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۵ دقیقه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های گندم قرار گرفته در خشک‌کن‌های هوای داغ و فروسرخ افزایش یافت. با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۵ دقیقه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های قرار گرفته در خشک‌کن فروسرخ از $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $10 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت. با افزایش زمان اعمال فراصوت به ۱۰ و ۱۵ دقیقه، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت کاهش یافت و در نتیجه زمان خشک کردن طولانی‌تر شد. زمان اعمال امواج فراصوت و روش خشک کردن تأثیر معنی‌داری بر آبگیری مجدد نمونه‌ها داشتند. آبگیری مجدد جوانه‌های گندم خشک‌شده در خشک‌کن هوای داغ بیشتر از خشک‌کن فروسرخ بود.

۵- سپاسگزاری

مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد بهداشت و کنترل کیفی مواد غذایی سرکار خانم سمیرا امین

- wheat (Tajan) during air drying, *International Journal of Food Properties*. 11, 223-232.
- [14] 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.
- [15] Salehi, F., Cheraghi, R., Rasouli, M. 2022. Influence of sonication power and time on the osmotic dehydration process efficiency of banana slices, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 19, 197-206.
- [16] Hassan, S., Imran, M., Ahmad, M. H., Khan, M. I., Xu, C., Khan, M. K., Muhammad, N. 2020. Phytochemical characterization of ultrasound-processed sorghum sprouts for the use in functional foods, *International Journal of Food Properties*. 23, 853-863.
- (*Rhus coriaria* L.), *Journal of Horticultural Science*. 34, 493-504.
- [10] Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., Youssef, M. M. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review, *Food Research International*. 48, 410-427.
- [11] Esmaili Adabi, M., Mosavi Seyed, S. R., Kalantari, D., Ghavami Adl, B. 2015. Mathematical modelling, kinetics and energy consumption for drying aloe vera gel in hot air dryer with exhaust air recycle, *Journal of food science and technology(Iran)*. 13, 73-83.
- [12] Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of Food Engineering*. 79, 243-248.
- [13] Rafiee, S., Keyhani, A., Jafari, A. 2008. Modeling effective moisture diffusivity of



Effect of ultrasonic waves and drying method on the moisture loss kinetics and rehydration of sprouted wheat

Amin Ekhlas, S. ¹; Pajohi-Alamoti, M. R. ^{2*}; Salehi, F. ³

1. MSc Student, Department of Food Hygiene and Quality Control, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Associate Professor, Department of Food Hygiene and Quality Control, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

3. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ABSTRACT

In this research, the effect of ultrasound time and dryer type (hot-air and infrared) on the drying time, effective moisture diffusivity coefficient and rehydration of wheat sprouts were investigated and drying kinetics were modeled. To apply ultrasound pre-treatment, the sprouts were placed inside the ultrasonic bath machine for 0, 5, 10, and 15 minutes, and after leaving the machine and removing extra moisture, the samples in thin layers were placed in the hot-air (with a temperature of 70°C) and infrared (power of 250 W) dryers. The results showed that sonication up to 5 minutes, causes an increase in moisture removal rate from the sprouts, an increase in the effective moisture diffusivity coefficient, and as a result, reduces the drying time. By increasing sonication time from zero to 5 min, the average drying time of sprouts in the hot-air and infrared dryers decreased from 126.7 min to 120.0 min, and from 25.7 min to 21.3 min, respectively. The average drying time of the samples in the hot-air dryer was 150.8 min and in the infrared dryer was 28.0 min. Also, the average effective moisture diffusivity coefficient calculated for the samples placed in the hot-air dryer was equal to $1.65 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and for the infrared dryer it was equal to $8.59 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. The time of ultrasound and drying treatment had significant effects on the rehydration of samples, and the value of this parameter was higher for samples dried in the hot-air dryer. In order to investigate the drying kinetics of wheat sprouts, mathematical models were fitted to the experimental data, and the Page model with two parameters (k and n) was chosen as the best model based on the highest accuracy. Generally, 5 minutes pre-treatment by ultrasound and then using an infrared dryer is the best condition for drying wheat sprouts.

ARTICLE INFO

Article History:

Received 2023/ 03/ 06

Accepted 2023/ 05/ 01

Keywords:

Effective moisture diffusivity coefficient,
Hot-air,
Infrared,
Page model,
Wheat sprout.

DOI: 10.22034/FSCT.19.135.159

DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.135.13.9

*Corresponding Author E-Mail:
Mr.pajohi@basu.ac.ir