



اثر پیش تیمار فراصوت در توان‌ها و دماهای مختلف بر فرآیند خشک شدن زغال‌اخته

معین اینانلودوقوز^۱، فخرالدین صالحی^{۲*}، مصطفی کرمی^۳، اشرف گوهری اردبیلی^۴

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

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

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

۴- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

کلمات کلیدی:

اولتراسوند،

پیش تیمار،

خشک کن فروسرخ،

زغال‌اخته،

مدل پیچ.

DOI: 10.22034/FSCT.20.134.109

DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.134.9.3

* مسئول مکاتبات:

F.Salehi@Basu.ac.ir

در این پژوهش اثر تیماردهی با فراصوت (اولتراسوند) در توان‌ها و دماهای مختلف بر فرآیند خشک شدن زغال‌اخته توسط خشک کن فروسرخ بررسی و مدل سازی شد. تأثیر توان اعمال شده توسط دستگاه فراصوت در سه سطح ۰، ۷۵ و ۱۵۰ وات و اثر دمای تیماردهی با فراصوت در سه سطح ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس بر سرعت انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در طی فرآیند خشک شدن زغال‌اخته بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان دادند که پیش تیمار فراصوت قبل از خشک کردن زغال‌اخته‌ها با خشک کن فروسرخ، با ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در سطح محصول به دلیل پدیده کاپیتاسیون، سبب سهولت خروج رطوبت از محصول و در نتیجه کاهش زمان خشک کردن می‌گردد. با افزایش توان فراصوت از ۰ به ۱۵۰ وات، میانگین زمان خشک شدن زغال‌اخته از ۷۳/۲ دقیقه به ۵۱/۴ دقیقه کاهش یافت. با افزایش دمای تیماردهی از ۲۰ به ۶۰ درجه سلسیوس نیز میانگین زمان خشک شدن زغال‌اخته از ۶۹/۷ دقیقه به ۵۵/۷ دقیقه کاهش یافت. اثر توان و زمان تیماردهی با فراصوت بر تغییرات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت زغال‌اخته بررسی و نتایج نشان داد که با افزایش توان و دمای دستگاه فراصوت، مقادیر این ضریب افزایش می‌یابد. با افزایش توان فراصوت از ۰ به ۱۵۰ وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از $6/63 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $10/11 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت. میانگین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت زغال‌اخته تیمار شده در دماهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر $7/26 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ، $8/10 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و $9/45 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بود. جهت بررسی سینتیک خشک شدن زغال‌اخته، مدل‌های ریاضی بر داده‌های تجربی برازش داده شدند. در مدل سازی فرآیند خشک کردن زغال‌اخته، مدل ریاضی پیچ با دو پارامتر k و n به دلیل حداقل خطا به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

۱- مقدمه

میوه زغال‌اخته با نام علمی (*Cornus mas* L) میوه‌ای است که درخت آن به‌طور طبیعی در مناطق معتدل نیمکره شرقی، پرو و مناطق وسیعی از اروپا، آسیا و به‌خصوص ایران رشد می‌کند. در ایران، استان قزوین قطب تولید این محصول بوده و همچنین در استان‌های شمال غربی کشور نیز این میوه برداشت می‌شود. این میوه دارای مقادیر کمی گلوکز و ساکارز و سرشار از آهن، کلسیم، اسید فولیک، ویتامین‌های C، B₁، B₂ و E، فلاونوئیدها، اسید اکسالیک و آنتوسیانین. این میوه غنی از مواد آنتی‌اکسیدانی بوده و قابلیت بالایی برای مبارزه با بیماری سرطان دارد و دارای خواص ضد باکتریایی، ضد آلرژی، کاهنده کلسترول خون و ضد دیابت می‌باشد [۱، ۲].

امروزه با توجه به اثبات ویژگی‌های تغذیه‌ای و مفید بودن میوه‌ها بر سلامتی انسان و همچنین پیشگیری از بیماری‌های مختلف، توجه و تمرکز به مصرف میوه و محصولات سالم تهیه شده از آنها افزایش یافته است. یکی از مهمترین روش‌های فرآوری سبزی‌ها و میوه‌ها، خشک‌کردن آنها است که باعث تسهیل حمل‌ونقل، افزایش قابلیت نگهداری و کاهش فعالیت‌های میکروبی می‌گردد [۳]. در مطالعه‌ای اوزگن (۲۰۱۵) فرآیند خشک شدن میوه زغال‌اخته در یک خشک‌هوای داغ را بررسی کرد. دمای هوای خشک‌کن و سرعت آن در این پژوهش به ترتیب در محدوده‌های ۳۵ تا ۵۵ درجه سلسیوس و ۱ تا ۱/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. کمترین زمان خشک شدن این میوه (۴۰ ساعت) زمانی به دست آمد که دمای هوا ۵۵ درجه سلسیوس و سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه بوده است [۴]. در پژوهش دیگری کایا و آیدین (۲۰۱۰) سینتیک خشک شدن میوه زغال‌اخته در یک خشک‌شدن هوای داغ را بررسی کردند. آزمایش‌ها در یک خشک‌کن همرفتی در مقیاس آزمایشگاهی تحت شرایط مختلف خشک‌کردن شامل دماهای ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ متر بر ثانیه و مقادیر رطوبت نسبی برابر ۲۵، ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درصد، انجام شد [۵].

فرکانس موج صوتی، همان تعداد انقباض‌ها و انبساط‌ها (تعداد

ارتعاشات) در یک ثانیه است. محدوده فرکانسی ۲۰ الی ۲۰۰۰۰ هرتز را صوت، فرکانس‌های پایین‌تر از آن را مادون صوت و بالاتر از آن را فراصوت یا اولتراسوند (خارج از محدوده شنوایی انسان) می‌نامند. عبور موج صوتی از سیالات موجب ارتعاش مولکول‌های آنها، ایجاد انقباض و انبساط در آنها و شکل‌گیری نقاط پرفشار (در فاز انقباض) و کم‌فشار (در فاز انبساط) شده و می‌تواند باعث بروز کاویتاسیون در سیالات شود. در صنایع غذایی امواج فراصوت کاربردهای مختلفی دارند. به‌عنوان مثال می‌توان از این روش به‌عنوان یک پیش‌تیمار قبل از فرآیند خشک‌کردن استفاده نمود [۶-۸]. قربانی و اسمعیلی (۲۰۲۲) از پیش‌تیمار فراصوت برای خشک‌کردن زغال‌اخته با استفاده از هوای داغ استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که پیش‌تیمار فراصوت از نظر آماری تأثیر معنی‌داری بر ضخامت نهایی دارد و با پراکنده کردن ترکیبات مومی سطح پوست زغال‌اخته و ایجاد کانال‌های میکروسکوپی، سبب سهولت انتقال جرم و کاهش زمان خشک‌کردن می‌گردد [۱]. کروهنگه و همکاران (۲۰۲۱)، تأثیر امواج فراصوت بر سینتیک فرآیند آب‌زدایی اسمزی و خشک‌کردن کیوی را بررسی کردند. براساس نتایج این مطالعه، استفاده از امواج فراصوت باعث کاهش زمان خشک‌کردن کیوی شد [۷].

یکی از روش‌های نوین خشک‌کردن مواد غذایی استفاده از خشک‌کن فروسرخ و لامپ فروسرخ به‌عنوان منبع حرارتی است. پرتو فروسرخ بخشی از طیف الکترومغناطیسی بوده و به سه گروه فروسرخ نزدیک، فروسرخ متوسط و فروسرخ دور تقسیم می‌شود. پرتو دهی فروسرخ در مقایسه با سایر روش‌های متداول حرارت دهی دارای مزایای متعددی بوده و کیفیت محصول خشک‌شده با آن بالاتر است. در این روش زمان فرآیند کوتاه‌تر بوده و نیاز به مصرف انرژی کمتری دارد [۳]. هوانگ و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که سینتیک انتقال رطوبت با استفاده از تابش فروسرخ بهبود یافته و زمان خشک‌کردن و مصرف انرژی به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد [۹]. در پژوهش دیگری دینگ و همکاران (۲۰۱۵) بهبود زمان ماندگاری شلتوک و برنج قهوه‌ای با استفاده از

با فرکانس کاری ۴۰ کیلوهرتز و توان التراسونیک ۷۵ و ۱۵۰ وات استفاده شد. برای اعمال تیمارهای دمایی نیز دمای دستگاه فراصوت بر روی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس تنظیم شد. بعد از رسیدن دمای حمام به دماهای مورد نظر، زغال‌اخته‌ها داخل دستگاه قرار گرفتند و هم‌زمان تیمارهای فراصوت و دما به مدت ۵ دقیقه بر آنها اعمال شد.

۲-۳- فرآیند خشک کردن با فروسرخ

کاربرد روش فروسرخ در زمینه فرآیندهای حرارتی محصولات کشاورزی در سال‌های اخیر موضوع پژوهش بسیاری از محققان بوده است و همچنان نتایج و کاربردهای جدیدتری از کاربرد این فناوری در این عرصه ارائه می‌شود. در این پژوهش جهت خشک کردن زغال‌اخته‌های تیمار شده از خشک‌کن فروسرخ با توان ۲۵۰ وات استفاده گردید و فاصله نمونه‌ها از سطح لامپ ۱۰ سانتی‌متر بود. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی^۲ با دقت ± 0.01 گرم که در زیر خشک‌کن قرار گرفته بود، ثبت گردید. کاهش محتوای رطوبت زغال‌اخته‌ها، بر مبنای خشک در برابر زمان خشک کردن رسم و تأثیر تیمارهای مختلف خشک کردن بر آن مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۴- محاسبه پارامتر نسبت رطوبت

پارامتر نسبت رطوبت^۳ (MR) می‌تواند داده‌های به دست آمده از فرآیند خشک کردن 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 [۱۲].

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

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

گرمایش اشعه فروسرخ را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که خشک کردن فروسرخ اثر نامطلوبی بر کیفیت برنج خشک شده ندارد. همچنین استفاده از خشک‌کن فروسرخ باعث کاهش هزینه فرآوری و افزایش زمان ماندگاری محصول نهایی می‌شود [۱۰]. حسنی و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی خشک شدن سماق با روش‌های مختلف از جمله آفتابی و سایه، فروسرخ و ماکروویو تأیید کردند که در مقایسه با روش‌های سنتی، خشک‌کن فروسرخ در زمان کمتری عملیات خشک کردن را انجام می‌دهد [۱۱].

بررسی و استفاده از روش‌های جدید مانند فروسرخ و فراصوت باعث بهبود خصوصیات ظاهری و افزایش کیفیت محصولات خشک شده می‌شود. می‌توان با استفاده از ماهیت مکانیکی امواج فراصوت (ایجاد کاویتاسیون)، زمان خشک کردن محصولات کشاورزی را کاهش داد. علاوه بر این، انتظار می‌رود زمان خشک کردن میوه زغال‌اخته با استفاده از اشعه فروسرخ کوتاه‌تر شده و باعث به حداقل رسیدن آسیب‌ها حین فرآیند خشک کردن شود. لذا در این پژوهش اثر توان و دمای تیماردهی با فراصوت بر فرآیند خشک کردن زغال‌اخته توسط خشک‌کن فروسرخ بررسی و مدل سازی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده سازی زغال‌اخته‌ها

برای انجام این پژوهش، زغال‌اخته‌های تازه و رسیده با متوسط قطر ۱ سانتی‌متر از شهرستان الموت استان قزوین تهیه و تا زمان شروع آزمایش‌ها در فریزر با دمای ۱۸- درجه سلسیوس نگهداری شدند. برای اعمال هر تیمار، ابتدا نمونه‌ها در دمای محیط انجماد زدایی شدند و سپس سه عدد زغال‌اخته انتخاب و درون دستگاه فراصوت به مدت زمان ۵ دقیقه جهت تیماردهی قرار گرفتند.

۲-۲- تیماردهی با فراصوت

برای اعمال تیمار فراصوت بر زغال‌اخته‌ها، از دستگاه حمام فراصوت ساخت شرکت بکر^۱ (ایران) مدل vCLEAN1-L6

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

3. Moisture ratio (MR)

1. Ultrasonic laboratory bath , vCLEAN1-L6, Backer, Iran.

مقادیر M_t, M_0 بسیار کوچک می‌باشد؛ بنابراین می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نمی‌باشد [۱۳].

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

۲-۵- محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

در سراسر فرآیند خشک کردن، انتشار پدیده‌ی غالب انتقال رطوبت از مرکز نمونه به سطح است، بنابراین در این مطالعه فضای انتقال جرم به صورت یک صفحه تخت (تیغه) در نظر گرفته شد و حذف رطوبت بر اساس قانون دوم فیک، طبق رابطه‌ی ۳ محاسبه شد [۱۴].

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

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

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

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

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

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

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

در این رابطه، Slope شیب خط می‌باشد.

۲-۶- مدل سازی سینتیکی

اصل مدل سازی ریاضی فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی و غذایی منطبق کردن معادله‌های ریاضی بر فرآیند خشک کردن است که می‌تواند به اندازه کافی خصوصیات سیستم را بیان کند. همچنین با به کارگیری مدل‌های ریاضی می‌توان با صرف هزینه و زمان کمتر به درک بهتر از فرآیند خشک کردن به عنوان تابعی از متغیرهای گوناگون دست یافت.

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

۲-۷- آنالیز آماری

این پژوهش در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آزمون‌های خشک کردن در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد. برای رسم نمودارها نیز از برنامه Excel (۲۰۰۷) استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی سینتیک انتقال جرم

نتایج حاصل از تجزیه واریانس توان و دمای فراصوت بر زمان خشک شدن زغال‌اخته در جدول ۱ به نمایش درآمده است. همان گونه که در این جدول مشاهده می‌شود اثر متغیرهای مستقل توان فراصوت و دمای حمام فراصوت در سطح ۵ درصد معنی دار شده است ($P < 0.05$) اما اثرات متقابل آن‌ها در سطح ۵٪ معنی دار نشده است ($P > 0.05$).

Table 1 Results of analysis of variance for drying time parameters of cornelian cherry.

Sources of changes	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	P
Power	2	2141.6	1070.8	0.002
Temperature	2	908.7	454.4	0.042
Power × Temperature	4	60.6	15.1	0.971
Error	18	2150.0	119.4	
Total	26	5261.0		

در پژوهشی صالحی و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر توان و زمان اعمال فراصوت بر کارایی فرآیند آبزدایی اسمزی برش‌های موز را بررسی کردند. بر اساس نتایج این پژوهش، اعمال تیمار فراصوت موجب افزایش مقدار رطوبت خارج‌شده از برش‌های موز شد و در نتیجه کاهش زمان فرآیند آبزدایی را به همراه داشت [۱۵].

۳-۲- نتایج محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

شکل ۲ روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت (LnMR) را نسبت به زمان در نمونه‌های تیمار شده با توان‌های مختلف فراصوت را نشان می‌دهد. شیب این خطوط جهت محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده گردید. شکل ۳ نیز اثر تغییر دمای حمام فراصوت بر روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت نسبت به زمان را نشان می‌دهد.

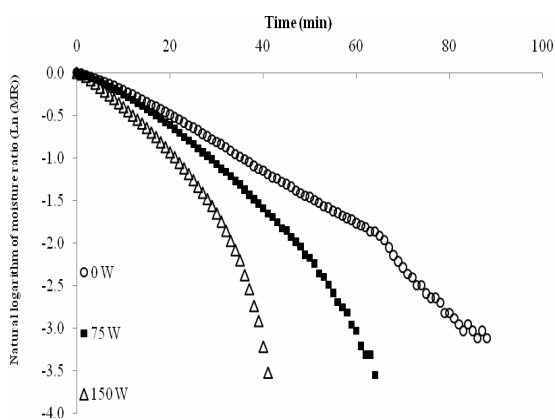


Fig 2 Variations of the natural logarithm of moisture ratio (Ln (MR)) values versus drying time of cornelian cherry at different sonication power (temperature=40°C).

در شکل ۱ اثر توان فراصوت و دمای حمام فراصوت بر زمان خشک شدن زغال‌اخته گزارش شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش توان فراصوت و دمای حمام فراصوت، زمان خشک شدن نمونه‌ها، کاهش یافته است. بیش‌ترین زمان خشک شدن مربوط به نمونه شاهد (۸۱ دقیقه) و کمترین زمان خشک شدن نیز مربوط به نمونه تیمار شده با توان ۱۵۰ وات و دمای ۶۰ درجه سلسیوس بود که میانگین مدت‌زمان خشک شدن برای این تیمار ۴۴ دقیقه به دست آمد. اوزگن (۲۰۱۵) زمان خشک شدن میوه زغال‌اخته در یک خشک هوای داغ را در محدوده ۴۰ ساعت (دمای هوای ۵۵ درجه سلسیوس و سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه) تا ۶۷ ساعت (دمای هوای ۳۵ درجه سلسیوس و سرعت ۱/۰ متر بر ثانیه) گزارش کرده است [۴].

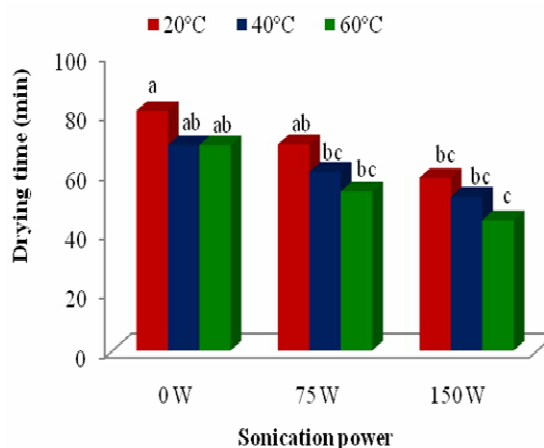


Fig 1 Average of cornelian cherry drying time at different ultrasound pretreatment conditions. Means with different superscripts differ significantly ($P < 0.05$).

پیش تیمار فراصوت قبل از خشک کردن زغال‌اخته‌ها با خشک‌کن فروسرخ باعث پراکنده کردن ترکیبات مومی از سطح پوست نمونه‌ها شده و همچنین با ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در سطح محصول، سبب سهولت خروج رطوبت از محصول و در نتیجه کاهش زمان خشک کردن می‌گردد. با افزایش توان فراصوت از ۰ به ۷۵ وات و از ۷۵ به ۱۵۰ وات، مشاهده گردید که میانگین ضریب نفوذ رطوبت زغال‌اخته به ترتیب از $6.73 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $8.07 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و از $8.07 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $1.011 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت. با افزایش دمای حمام فراصوت نیز اثر فراصوت تشدید شد و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت زغال‌اخته افزایش یافت. با افزایش دمای حمام فراصوت از ۲۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از $7.26 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $9.45 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت.

۳-۳- انتخاب بهترین مدل سینتیکی

با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه در طی فرآیند خشک کردن زغال‌اخته (با استفاده از رابطه شماره ۲) و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به وسیله مدل‌های ونگ و سینگ، هندسون و پابیس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). در این جدول مجموع مربعات خطا^۱ (SSE)، ضریب تبیین (r) و جذر میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) و همچنین ضرایب این مدل‌ها ارائه شده است. دلیل استفاده از جذر میانگین مربعات خطا، یکسان بودن بُعد و مقیاس آن با پارامتر مورد نظر بود. در جدول ۲، MR، نسبت رطوبت، t زمان (min) و a، b، c، d، k، n و 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 زغال‌اخته، مدل پیچ است. کایا و آیدین (۲۰۱۰) سینتیک خشک شدن میوه زغال‌اخته در یک خشک شدن هوای

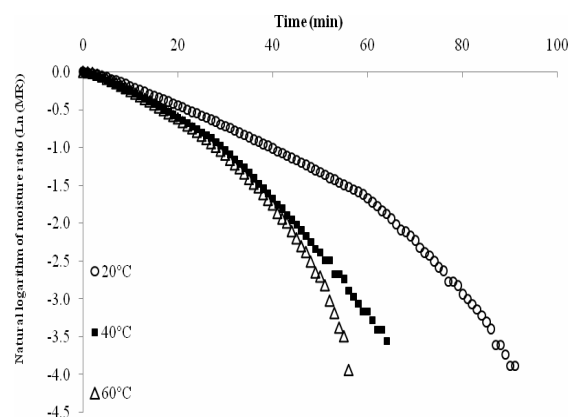


Fig 3 Variations of the natural logarithm of moisture ratio (Ln (MR)) values versus drying time of cornelian cherry at different temperature (sonication power=75W).

استفاده از فراصوت در تیماردهی بافت‌های گیاهی می‌تواند منجر به بهبود سینتیک انتقال جرم شود. بررسی نتایج مقالات منتشر شده در زمینه استفاده ترکیبی از روش‌های مختلف خشک کردن و امواج فراصوت حاکی از این است که استفاده از امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار قبل از فرآیند خشک کردن باعث افزایش سرعت فرآیند خشک کردن می‌شود [۶، ۱۵-۱۸]. همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود با افزایش توان فراصوت و دمای تیماردهی، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است.

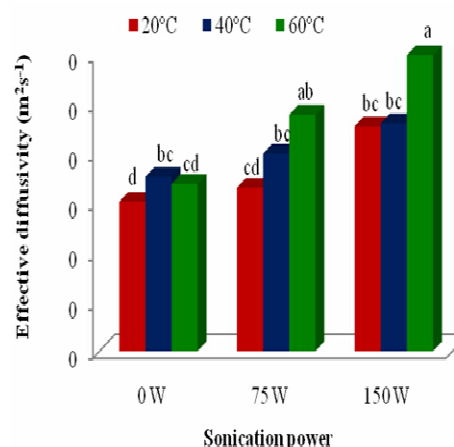


Fig 4 Effective moisture diffusivity values (D_{eff}) of cornelian cherry at different ultrasound pretreatment conditions. Means with different superscripts differ significantly ($P < 0.05$).

1. Sum of squares due to error (SSE)

2. Root mean square error (RMSE)

داغ را بررسی کردند. این پژوهشگران برای ارزیابی ثابت‌های معادلات خشک‌کردن از روش تحلیل رگرسیون غیرخطی استفاده کردند. نتایج برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های موجود نشان داد که مدل‌های هندرسون و پابیس، لوئیس و نمایی دوجمله‌ای، تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی مربوط به رطوبت زغال‌اخته‌ها دارند [۵].

Table 2 The statistical parameters obtained in order to verify the fit of each mathematical model to the observed data during the cornelian cherry drying (sonication power=150W and temperature=20°C)

Model number	Model name	Model equation	Model constants	SSE	r	RMSE
1	Wang and Singh	$MR=1+at+bt^2$	a=-0.023 b=0.0001	0.018	0.998	0.016
2	Henderson and Pabis	$MR=a \exp(-kt)$	a=1.143 k=0.036	0.138	0.990	0.043
3	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	a=-15.84 k=0.064 b=0.947	0.021	0.998	0.017
4	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	k=0.007 n=1.414	0.012	0.999	0.012
5	Newton	$MR = \exp(-kt)$	k=0.032	0.279	0.980	0.060
6	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	a=0.119 k=-2.141 n=-0.036 b=-0.011	0.225	0.984	0.055
7	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	a=1.302 k=0.023 c=-0.233	0.015	0.998	0.014

با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل پیچ و تناسب بیشتر این معادله با داده‌های آزمایشگاهی، در طی بررسی سینتیک خشک شدن زغال‌اخته، نتایج این مدل در جدول ۳ گزارش شده است. لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک‌کردن زغال‌اخته تیمار شده با فراصوت توسط خشک‌کن فروسرخ توصیه می‌شود.

Table 3- The constants and coefficients of the accepted model (Page)

Sonication power (W)	Temperature (°C)	k	n	SSE	r	RMSE
0	20	0.0094	1.3937	0.0114	0.999	0.0115
0	40	0.0120	1.2710	0.0158	0.999	0.0125
0	60	0.0105	1.3130	0.0073	0.999	0.0093
75	20	0.0070	1.3927	0.0110	0.999	0.0110
75	40	0.0137	1.3103	0.0227	0.998	0.0174
75	60	0.0077	1.4533	0.0165	0.999	0.0160
150	20	0.0064	1.4827	0.0190	0.999	0.0164
150	40	0.0095	1.4190	0.0110	0.999	0.0138
10	60	0.0142	1.3653	0.0148	0.998	0.0172

به‌منظور معتبر سازی مدل پیچ پیشنهادی، مقادیر تغییرات نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل پیچ و مقادیر نسبت رطوبت تجربی به دست آمده با توان فراصوت ۱۵۰ وات و دمای ۲۰ درجه سلسیوس در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطوری که از این شکل بر می‌آید، انطباق خوبی بین نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل وجود دارد؛ بنابراین، مدل پیچ پیشنهادی برای پیش‌بینی تغییرات نسبت رطوبت نمونه‌های زغال‌اخته تیمار شده با فراصوت مناسب می‌باشد.

- Science and Technology (Iran)*. 19, 15-26.
- [2] Ercisli, S., Yilmaz, S. O., Gadze, J., Dzubur, A., Hadziabulic, S., Aliman, Y. 2011. Some fruit characteristics of cornelian cherries (*Cornus mas* L.), *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 39, 255-259.
- [3] 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.
- [4] Ozgen, F. 2015. Experimental investigation of drying characteristics of cornelian cherry fruits (*Cornus mas* L.), *Heat and Mass Transfer*. 51, 343-352.
- [5] Kaya, A., Aydin, O. 2010. Drying kinetics and sorption isotherms of cornelian cherry fruits, *Desalination and Water Treatment*. 22, 30-39.
- [6] Salehi, F. 2020. Physico-chemical properties of fruit and vegetable juices as affected by ultrasound: A review, *International Journal of Food Properties*. 23, 1748-1765.
- [7] Kroehnke, J., Szadzińska, J., Radziejewska-Kubzdela, E., Biegańska-Marecik, R., Musielak, G., Mierzwa, D. 2021. Osmotic dehydration and convective drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) – The influence of ultrasound on process kinetics and product quality, *Ultrasonics Sonochemistry*. 71, 105377.
- [8] Salehi, F. 2023. Recent advances in the ultrasound-assisted osmotic dehydration of agricultural products: A review, *Food Bioscience*. 51, 102307.
- [9] Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L., Sundén, B. 2021. Application of infrared radiation in the drying of food products, *Trends in Food Science & Technology*. 110, 765-777.
- [10] Ding, C., Khir, R., Pan, Z., Zhao, L., Tu, K., El-Mashad, H., McHugh, T. H. 2015. Improvement in shelf life of rough and brown rice using infrared radiation heating, *Food and Bioprocess Technology*. 8, 1149-1159.
- [11] Hasani, A., Khosh Taghaza, M. H., Ebadi, M. 2020. Effect of infrared drying on qualitative characteristics of sumac fruit (*Rhus coriaria* L.), *Journal of Horticultural Science*. 34, 493-504.
- [12] Esmaili Adabi, M., Mosavi Seyedi, S. R., Kalantari, D., Ghavami Adl, B. 2015.

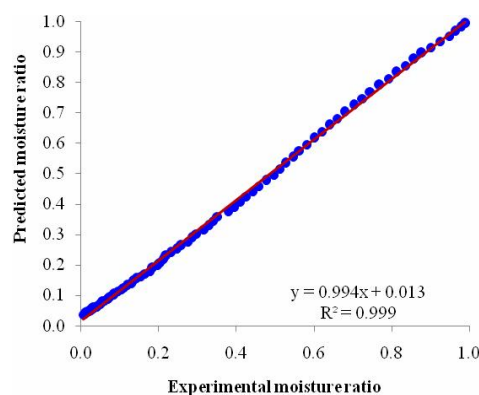


Fig 5 Comparison of fitted data by Page model with experimental results (sonication power=150W and temperature=20°C).

۴- نتیجه گیری

استفاده از روش‌های سنتی برای خشک کردن میوه‌ها باعث آسیب به محصول و کاهش ویژگی‌های مفید و سلامتی بخش آنها می‌شود. در این پژوهش اثر پیش تیمار فراصوت در دماهای مختلف بر سینتیک خشک کردن زغال‌اخته در یک خشک‌کن آزمایشگاهی فروسرخ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که پیش تیمار فراصوت قبل از خشک کردن زغال‌اخته‌ها با خشک‌کن فروسرخ، با ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در سطح محصول به دلیل پدیده کاویتاسیون، سبب سهولت خروج رطوبت از محصول و در نتیجه کاهش زمان خشک کردن می‌گردد. بیش‌ترین زمان خشک شدن (۸۱ دقیقه) مربوط به نمونه شاهد بود که در تحت تأثیر تیمار فراصوت قرار نگرفته بود و کمترین زمان خشک شدن (۴۴ دقیقه) نیز مربوط به نمونه تیمار شده با فراصوت با توان ۱۵۰ وات و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس بود. با افزایش فراصوت، به دلیل افزایش شدت پدیده کاویتاسیون و افزایش سرعت انتقال جرم، میانگین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از $6.73 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $1.0/11 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت. برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن زغال‌اخته، از مدل‌های مختلفی استفاده و مدل پیچ به دلیل کمترین مقدار خطا، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب گردید.

۵- منابع

- [1] Ghorbani, R., Esmaili, M. 2022. Investigation of the effect of ultrasound pretreatment on shrinkage of cornelian cherry during hot air drying, *Journal of Food*

- [16] Azarpazhooh, E., Sharayeei, P., Gheybi, F. 2019. Evaluation of the effects of osmosis pretreatment assisted by ultrasound on the impregnation of phenolic compounds into aloe vera gel and dry product quality, *Food Engineering Research*. 18, 143-154.
- [17] 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.
- [18] Fernandes, F. A., Gallão, M. I., Rodrigues, S. 2008. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration, *LWT-Food Science and Technology*. 41, 604-610.
- 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.
- [13] Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of Food Engineering*. 79, 243-248.
- [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.



The effect of ultrasound pretreatment at different powers and temperatures on the drying process of cornelian cherry

Inanloodoghous, M.¹; Salehi, F.^{2*}; Karami, M.³; Gohari Ardabili, A.⁴

1. MSc Student, Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
4. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ABSTRACT

In this research, the effect of ultrasound treatment at different powers and temperatures on the drying process of cornelian cherry by infrared dryer was investigated and modeled. The effect of the applied power by the ultrasonic device at three levels of 0, 75 and 150 W and the effect of the ultrasonic treatment temperature at three levels of 20, 40 and 60 °C on the mass transfer rate and the effective moisture diffusivity coefficient during the drying process of cornelian cherry were investigated. The results of this research showed that ultrasonic pretreatment before drying cornelian cherry by the infrared dryer, by creating microscopic channels on the product surface due to the cavitation phenomenon, makes it easier for moisture to exit from the product and thus reduces the drying time. By increasing the ultrasonic power from 0 to 150 W, the average drying time of cornelian cherry decreased from 73.2 minutes to 51.4 minutes. By increasing the treatment temperature from 20 to 60 °C, the average drying time of cornelian cherry decreased from 69.7 minutes to 55.7 minutes. The effect of power and time of ultrasound treatment on the effective moisture diffusivity coefficient changes of cornelian cherry was investigated and the results showed that with the increase in the power and temperature of the ultrasonic device, the values of this coefficient increase. By increasing the sonication power from 0 to 150 W, it was observed that the effective moisture diffusivity coefficient increased from $6.63 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ to $10.11 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. The average effective moisture diffusivity coefficient of cornelian cherry treated at temperatures of 20, 40 and 60 °C were $7.26 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $8.10 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, and $9.45 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectively. In order to investigate the drying kinetics of cornelian cherry, mathematical models were fitted to the experimental data. In modeling of cornelian cherry drying process, the Page's mathematical model with two parameters (k and n) was chosen as the best model due to the minimum error.

ARTICLE INFO

Article History:

Received 2022/ 11/ 23
Accepted 2023/ 02/ 20

Keywords:

Cornelian cherry,
Infrared dryer,
Page model,
Pretreatment, Ultrasound.

DOI: 10.22034/FSCT.20.134.109
DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.134.9.3

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