

مدل سازی فرایند خشک شدن برگ چای به کمک فراصوت قدرت

رضا یگانه^{۱*}، راضیه باباگل تبار^۲، عادل حسین پور^۳

۱. استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

۲. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۴/۸)

چکیده

چای از مهم ترین گیاهان دارویی به شمار می رود که تأثیر فراوانی در درمان بیماری های قلبی-عروقی و سرطان دارد. فرایند خشک شدن برگ چای با جریان هوای گرم صورت می گیرد که مصرف انرژی زیادی دارد. هدف از این تحقیق بررسی روند خشک شدن برگ چای به کمک پیش تیمار فراصوت با توان بالا است. برای این منظور از برگ چای رقم هیبرید چینی استفاده شد. آزمایش های پیش فرایند خشک شدن در حمامی فراصوت با توان ۷۰ وات و بسامد ۲۸ کیلوهرتز در ۴ سطح زمان موج دهی ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه انجام شد. نرخ تغییر محتوای رطوبتی نمونه ها با پنج مدل لایه نازک خشک شدن برآزش شد. براساس مقادارهای ضریب تبیین، میانگین مربعات انحراف، و ریشه میانگین مربعات خطا، مدل پیچ به عنوان بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک شدن برگ چای به کمک فراصوت شناخته شد. از مدل پیشنهاد شده در این تحقیق می توان در مدل سازی خشک کن های ترکیبی-فراصوتی استفاده کرد.

کلیدواژگان: برگ چای، خشک شدن لایه نازک، فراصوت، مدل پیچ.

مقدمه

گیاه چای با نام علمی کاملیا ساینسیس (*Camellia Sinensis*) از خانواده تناسیس (*Theaceae*) است. برگ چای در زمان برداشت رطوبت زیادی دارد و به فاصله اندکی پس از برداشت فاسد می شود. در صنعت چای سازی، برای محافظت از برگ چای در برابر پوسیدگی و تبدیل آن به چای خشک، پس از طی مراحل برگ ها را با جریان هوای گرم خشک می کنند (Botheju *et al.*, 2011). کاهش حجم و وزن مواد، حمل و نقل آسان، و قابلیت نگهداری در دمای محیط از مزایای خشک کردن به روش جریان هوای گرم است (Doymaz, 2007)، اما دمای زیاد، افزایش چروکیدگی، کاهش کیفیت محصول نهایی، و مصرف زیاد انرژی از معایب آن به شمار می رود (Erbay, 2009; Alibas, 2007). در سال های اخیر، استفاده از سیستم های خشک کن ترکیبی مانند جریان هوای گرم-مایکروویو (Alibas, 2007)، مایکروویو-فروسرخ (Nadee *et al.*, 2011) و مایکروویو-خلأ (Jeni *et al.*, 2010)، به دلیل افزایش نرخ تبخیر، کاهش زمان، و دمای خشک شدن مورد توجه قرار گرفت. علاوه بر این استفاده از پیش تیمارهای متعدد پیش از فرایند خشک شدن به منظور ایجاد تغییر در ساختار مواد و در نتیجه افزایش سرعت خروج

رطوبت در طول فرایند خشک شدن، از روش هایی است که توجه محققان را به خود جلب کرده است. در این میان امواج فراصوت با توان بالا به دلیل تولید محصول نهایی با کیفیت بالاتر و افزایش نرخ خشک شدن در دمای کم تر مقبولیت بالایی دارد (Mason, 1998). بررسی روند خشک شدن برخی از میوه ها و سبزی ها از قبیل موز (Fernandes & Rodrigues, 2007)، قارچ دکمه ای، گل کلم، و کلم بروکلی (Jambrak *et al.*, 2007)، آناناس (Fernandes *et al.*, 2008) و سیب (Babagoltabar & Yeganeh, 2013) به کمک پیش تیمار فراصوت، در مطالعات گوناگونی گزارش شده است. در این مطالعات تأثیر پارامترهای گوناگون مانند بسامد، توان، زمان موج دهی، و درجه حرارت مطالعه شده و نتایج نشان داده است تأثیر پارامتر زمان موج دهی بر مواد گوناگون، متفاوت بوده است. تاکنون مطالعه ای در زمینه تأثیر فراصوت با توان بالا بر روند خشک شدن گیاهان برگی شکل از قبیل نعنای، جعفری، و چای گزارش نشده است. بنابراین هدف کلی این تحقیق بررسی و مدل کردن روند خشک شدن برگ تازه چای به کمک پیش تیمار فراصوت است. اهداف اصلی این تحقیق شامل بررسی اثر زمان موج دهی بر زمان و نرخ خشک شدن برگ تازه چای و تعیین بهترین مدل لایه نازک برای توصیف فرایند خشک شدن برگ چای به کمک پیش تیمار فراصوت است.

مواد و روش‌ها

برگ چای

برگ چای رقم هیبرید چینی از مزرعه تحقیقات چای واقع در مرکز تحقیقات چای لاهیجان برداشت شد. عملیات برداشت به صورت دستی و براساس استاندارد بین‌المللی (یک غنچه و دو برگ لطیف) انجام گرفت (ISO, 2011). پس از پایان عملیات برداشت، برگ‌ها بلافاصله (در کم‌تر از ۱۵ دقیقه) به آزمایشگاه منتقل شدند.

اندازه‌گیری درصد رطوبت اولیه

درصد رطوبت اولیه برگ‌ها براساس استاندارد بین‌المللی AOAC و به روش وزن کردن محاسبه شد (AOAC, 1984). براساس این استاندارد ۱۵ گرم برگ چای درون آون با دمای ۱۰۴ درجه سلسیوس قرار داده شد. فرایند خشک‌شدن تا ثابت شدن وزن برگ‌ها ادامه یافت. وزن نهایی برگ‌ها به کمک ترازوی رقمی (Sartorius، مدل GM312، دقت ۰/۰۱ گرم) اندازه‌گیری شد. با دانستن وزن اولیه و نهایی برگ‌ها، درصد رطوبت اولیه بر پایه خشک محاسبه شد (Oztekin & Martinov, 2007).

مقدار رطوبت اولیه برگ چای بر پایه خشک برابر با ۲/۹ گرم آب/گرم ماده خشک به دست آمد.

تیمار فراصوت

از یک حمام فراصوت (Parasonic، مدل 2600S؛ حجم: ۲/۶ لیتر؛ ابعاد داخلی: ۱۰×۱۳/۵×۲۴ سانتی‌مترمکعب) با توان ۷۰ وات و بسامد ۲۸ کیلوهرتز برای پیش‌فرایند استفاده شد. از میان نمونه‌های برداشت‌شده، ۳۰ گرم برگ سالم و بدون آفت که از نظر لطافت و نرمی در یک سطح بودند، جدا و به کمک ترازوی رقمی (Sartorius، مدل GM312، دقت: ۰/۰۱ ± گرم) وزن شد. برگ‌های انتخاب‌شده به ضخامت ۱ سانتی‌متر در کف محفظه حمام فراصوت قرار گرفتند. برای جلوگیری از شناورشدن برگ‌ها، یک شبکه‌ای فلزی به ضخامت ۱ میلی‌متر روی برگ‌ها قرار داده شد. سپس بقیه حجم مخزن به آرامی با آب مقطر پر شد. با راه‌اندازی حمام، برگ‌ها در چهار سطح زمانی ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه بدون اعمال حرارت در محیط آزمایشگاه (دمای ۲۱/۵ درجه سلسیوس) موج‌دهی شدند. پس از خارج‌ساختن برگ‌ها از محفظه حمام، رطوبت سطحی به کمک کاغذ جاذب گرفته شد. هر یک از تیمارها در سه تکرار انجام شد. هم‌چنین برای بررسی اثر فراصوت، از یک نمونه شاهد بدون عبور امواج فراصوت استفاده شد.

خشک‌کردن

برگ‌ها پس از اعمال امواج فراصوت، به آون (Venticell، مدل 111) با دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس منتقل شدند. فرایند خشک‌شدن تا رسیدن برگ‌ها به رطوبت تعادلی ادامه یافت. برای بررسی روند خشک‌شدن، هر ۱۰ دقیقه یک‌بار، نمونه‌ها از آون خارج شدند و درون دسیکاتور (Simax) قرار گرفتند. پس از خشک‌شدن، وزن برگ‌ها به کمک ترازوی رقمی (دقت: ۰/۰۱ گرم) اندازه‌گیری شد و دوباره به آون منتقل شدند.

به منظور مقایسه دقیق‌تر تیمارها با یکدیگر و هم‌چنین رسم نمودارهای خشک‌شدن، مقادیر درصد رطوبت به محتوای رطوبتی تبدیل شدند. مقادیر محتوای رطوبتی و نرخ خشک‌شدن برگ چای به ترتیب از روابط ۱ و ۲ محاسبه شدند (Doymaz, 2012).

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

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که: MR محتوای رطوبتی، M_t رطوبت در لحظه t (گرم آب/گرم ماده خشک)، M_e رطوبت تعادلی (گرم آب/گرم ماده خشک)، M_0 رطوبت اولیه (گرم آب/گرم ماده خشک)، $M_{t+\Delta t}$ رطوبت در لحظه $t+\Delta t$ (گرم آب/گرم ماده خشک)، Δt فاصله زمانی (دقیقه)، و DR نرخ خشک‌شدن (گرم آب/گرم ماده خشک در دقیقه) هستند.

مدل‌سازی فرایند خشک‌شدن

مقادیر محتوای رطوبتی با پنج مدل لایه‌نازک بررسی شد تا مدل مناسب برای توصیف رفتار خشک‌شدن برگ چای به کمک پیش‌فرایند فراصوت، تعیین شود. جدول ۱ پنج مدل لایه‌نازک پرکاربرد در فرایند خشک‌شدن را نشان می‌دهد. ملاک تعیین مدل مناسب پارامترهای ضریب تبیین، میانگین مربعات انحراف، و ریشه میانگین مربعات خطا بودند که به کمک روابط ۳ تا ۵ محاسبه شدند (Akpınar, 2006).

(رابطه ۳)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{pre,i}) \cdot \sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{exp,i})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{pre,i})^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{exp,i})^2 \right]}}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

جدول ۱. مدل های لایه نازک خشک شدن محصولات کشاورزی

ردیف	نام مدل	مدل	منبع
۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	Wang & Singh, 1978
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	Henderson & Pabis, 1969
۳	هندرسون-پابیس	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	Yagcioglu et al., 1999
۴	لگاریتمی	$MR = a \cdot \exp(-kt) + C$	Madamba et al., 1996
۵	ونگ-سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	Henderson & Pabis, 1969

بحث و نتایج

تأثیر فراصوت بر زمان خشک شدن

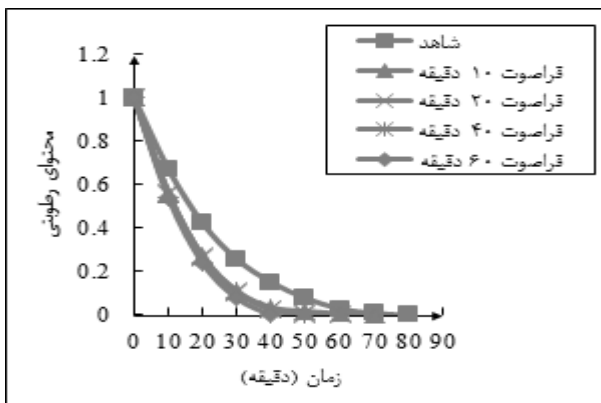
شکل ۱ نمودار تغییرات محتوای رطوبتی برگ چای را نسبت به زمان خشک شدن نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، مقدار محتوای رطوبتی نمونه شاهد در طول فرایند خشک شدن از نمونه هایی که در پیش فرایند فراصوت قرار گرفته اند، بیش تر است. برای بررسی تأثیر فراصوت بر زمان خشک شدن برگ ها از تحلیل واریانس استفاده شد. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که فراصوت بر زمان خشک شدن برگ ها از مقدار اولیه به رطوبت ۳ درصد بر پایه تر - رطوبت مطلوب برای نگهداری برگ چای در شرایط انبار (Naheed et al., 2007) - در سطح احتمال ۵ درصد اثر معنی دار داشت. به عبارت دیگر با عبور امواج فراصوت از برگ چای، زمان لازم برای خشک شدن کاهش یافت. شکل ۲ تغییرات درصد رطوبت برگ چای را در طول فرایند خشک شدن نشان می دهد. براساس شکل ۲، زمان لازم برای خشک شدن نمونه شاهد، تیمار ۱۰، ۲۰، ۴۰، و ۶۰ دقیقه به ترتیب برابر با ۷۵/۲۷، ۶۶/۰۴، ۵۴/۳۱، ۴۸/۳۸، و ۳۹/۵۸ دقیقه بود. به بیان دیگر، فراصوت زمان خشک شدن برگ ها را از ۱۲/۲۶ تا ۴۷/۴۱ درصد کاهش داد.

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که افزایش زمان موجهی بر زمان خشک شدن در سطح احتمال ۵ درصد اثر معنی دار داشت. با افزایش زمان موجهی از ۱۰ دقیقه به ۶۰ دقیقه، زمان لازم برای رسیدن به رطوبت ۳ درصد (بر پایه تر) از ۶۶/۰۴ دقیقه به ۳۹/۵۸ دقیقه کاهش یافت (شکل ۳).

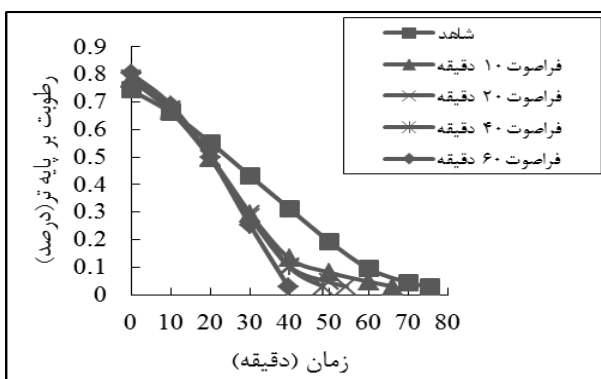
تأثیر فراصوت بر نرخ خشک شدن

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که فراصوت بر نرخ خشک شدن در سطح ۵ درصد اثر معنی دار داشت. به گونه ای که، سرعت ازدست دادن رطوبت در نمونه های پیش فرایند بیش از نمونه شاهد بود. بیشینه نرخ در لحظات اولیه فرایند خشک شدن و در تیمار ۶۰ دقیقه مشاهده شد (شکل ۴). جدول ۲ نتایج آزمون

دانکن برای مقایسه میانگین نرخ خشک شدن برگ چای را تا رسیدن به رطوبت ۳ درصد (بر پایه تر)، در نمونه های بررسی شده نشان می دهد. کمینه نرخ در نمونه شاهد با مقدار ۰/۰۳۸۱ (گرم آب/گرم ماده خشک در دقیقه) مشاهده شد. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که زمان موجهی بر نرخ خشک شدن برگ چای در سطح احتمال ۵ درصد اثر معنی دار داشت. به گونه ای که با افزایش زمان موجهی، سرعت ازدست دادن رطوبت نیز افزایش یافت. کمینه و بیشینه نرخ خشک شدن نمونه های تیمار شده، به ترتیب در تیمار ۱۰ دقیقه و ۶۰ دقیقه با مقادیر ۰/۰۵۳۶ و ۰/۱۰۲۶ (گرم آب/گرم ماده خشک در دقیقه) مشاهده شد.

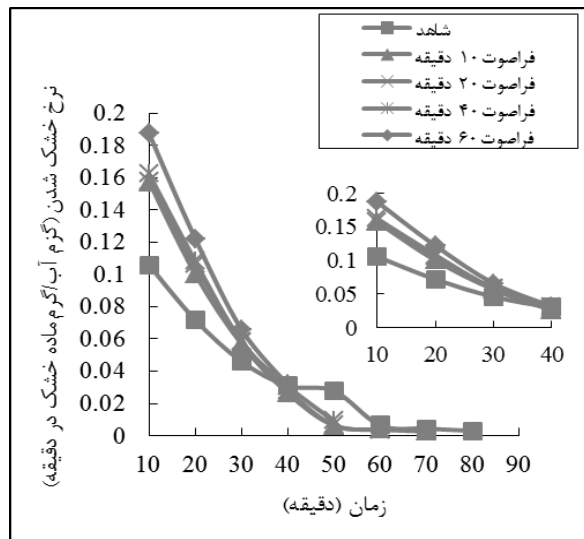


شکل ۱. تغییرات محتوای رطوبتی برگ چای نسبت به زمان

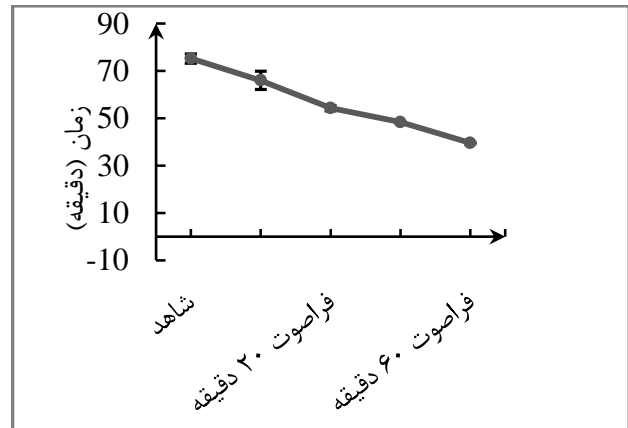


شکل ۲. تغییرات درصد رطوبت برگ چای نسبت به زمان

شد، بنابراین با گذشت زمان مشخصی از فرایند خشک شدن، مقدار رطوبت خارج شده از نمونه تیمار بیش از نمونه شاهد بود.



شکل ۴. تغییرات نرخ خشک شدن برگ چای نسبت به زمان



شکل ۳. زمان لازم برای رسیدن برگ‌ها به رطوبت ۳ درصد (پایه تر) در نمونه‌های شاهد و آزمایش

با توجه به نتایج مشابه (Jambrak et al. 2007)، به نظر می‌رسد امواج فراصوت هنگام عبور از بافت برگ چای به دلیل شکل‌دهی پدیده حفره‌زایی، کانال‌های بسیار ریزی را در دیواره سلولی ایجاد کرده‌اند، در نتیجه با کاهش مقاومت داخلی در برابر انتشار رطوبت و کاهش تعداد لایه‌های مرزی، شرایط مناسبی برای خروج سریع‌تر رطوبت در طول فرایند خشک شدن فراهم

جدول ۲. نتایج آزمون دانکن برای مقایسه اثر فراصوت بر میانگین نرخ خشک شدن برگ چای

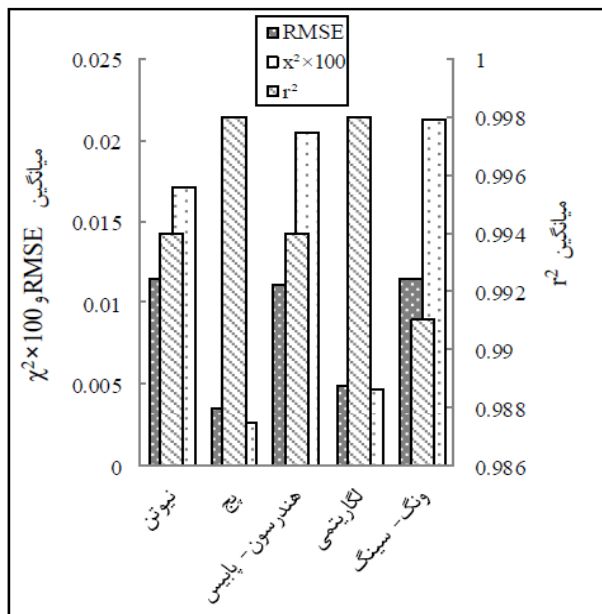
میانگین نرخ خشک شدن (گرم آب/گرم ماده خشک در دقیقه)	نوع گروه
۰/۰۳۸۱ ^a	شاهد
۰/۰۵۳۶ ^b	فراصوت ۱۰ دقیقه
۰/۰۶۶۱ ^c	فراصوت ۲۰ دقیقه
۰/۰۷۶ ^d	فراصوت ۴۰ دقیقه
۰/۱۰۲۶ ^e	فراصوت ۶۰ دقیقه

بیش‌ترین مقدار F^2 و کم‌ترین مقادیر χ^2 و RMSE باشد، به‌عنوان مدل مناسب انتخاب می‌شود. شکل ۵ نمودار ستونی میانگین پارامترهای بیان شده را برای هر یک از مدل‌ها نشان می‌دهد. براساس شکل ۵، مدل پیچ با میانگین مقادیر ضریب تبیین ۰/۹۹۸، میانگین مربعات انحراف $2/6 \times 10^{-5}$ ، و ریشه میانگین مربعات خطای $3/41 \times 10^{-3}$ در تیمار ۱۰ دقیقه بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک شدن برگ چای با پیش تیمار فراصوت است. براساس محاسبات انجام گرفته مدل نهایی فرایند خشک شدن برگ چای با اعمال پیش فرایند فراصوت به صورت رابطه ۶ تعیین شد.

$$R^2 = 0.998, MR = \exp(-3/13 \times 10^{-2} t^{1/25}) \quad (6)$$

تعیین مدل خشک شدن

مقادیر محتوای رطوبتی به دست آمده از آزمایش‌ها، با پنج مدل لایه‌نازک نیوتن، پیچ، هندرسون-پابیس، لگاریتمی، و ونگ-سینگ به کمک آنالیز رگرسیون غیرخطی در نرم افزار SPSS 21 بررسی شد. پارامترهای ثابت مدل‌ها به روش تعیین مقادیر اولیه در رگرسیون غیرخطی محاسبه شدند (جدول ۳). مقادیر ضریب تبیین، میانگین مربعات انحراف، و ریشه میانگین مربعات خطا میان داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها (داده‌های تجربی) و داده‌های حاصل از مدل‌ها (داده‌های پیش‌بینی شده) مربوط به هر یک از نمونه‌های شاهد و تیمار در جدول ۴ آمده است. از میان پنج مدل بیان شده، مدلی که دارای



شکل ۵. نمودار ستونی میانگین مقادیر r^2 , $\chi^2 \times 100$ و RMSE در پنج مدل لایه نازک

جدول ۳. پارامترهای ثابت مدل های لایه نازک خشک شدن برگ چای

گروه	مدل	k	n	a	b	c	
شاهد	نیون	۰/۰۶۶۴۴	-	-	-	-	
		۰/۰۶۶۸۸	-	-	-	-	
		۰/۰۶۷۱۴	-	-	-	-	
		۰/۰۷۱۷۸	-	-	-	-	
		۰/۰۴۵۷۷	-	-	-	-	
پنج	نیون	۰/۰۳۶۰۷	۱/۲۰۵	-	-	-	
		۰/۰۳۱۳۴	۱/۲۵۶	-	-	-	
		۰/۰۳۱۳۵	۱/۲۵۸	-	-	-	
		۰/۰۲۹۶۶	۱/۳۰۷	-	-	-	
هندرسون-پاپیون	نیون	۰/۰۲۵۹۷	۱/۱۷۰	-	-	-	
		۰/۰۶۷۲۴	-	۱/۰۱۴	-	-	
		۰/۰۶۷۸۳	-	۱/۰۱۷	-	-	
		۰/۰۶۸۰۸	-	۱/۰۱۷	-	-	
لگاریتمی	نیون	۰/۰۷۲۷۴	-	۱/۰۱۶	-	-	
		۰/۰۴۶۶۴	-	۱/۰۲۱	-	-	
		۰/۰۶۲۱۱	-	۱/۰۳۷	-	-۰/۰۲۸	
		۰/۰۵۹۴۶	-	۱/۰۵۹	-	-۰/۰۵۰۲	
ونگ-سینگر	نیون	۰/۰۵۵۷۴	-	۱/۰۸۹	-	-۰/۰۸۳	
		۰/۰۵۳۷۳	-	۱/۰۴۵	-	-۰/۱۴۲	
		۰/۰۴۰۲۵	-	۱/۰۶۴	-	-۰/۰۵۶۳	
		-	-	-	۰/۰۰۰۳۹	-	-
شاهد	نیون	-	-	-	۰/۰۰۰۴۶	-	
		-	-	-	۰/۰۰۰۵۳	-	-
		-	-	-	۰/۰۰۰۶۵	-	-
		-	-	-	۰/۰۰۰۲۳	-	-

جدول ۴. پارامترهای آماری مدل‌های لایه‌نازک خشک‌شدن برگ چای

گروه	χ^2	R ²	پارامترهای آماری	RMSE
شاهد		۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۷۱۶	۰/۰۰۷۹۱۶
	۱۰ دقیقه	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۱۴۱	۰/۰۱۰۹۹۵
		۰/۹۹۴	۰/۰۰۰۲۰۴	۰/۰۱۳۰۳۴
		۰/۹۹۲	۰/۰۰۰۳۶۹	۰/۰۱۷۱۸۷
		۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۷۴۸	۰/۰۰۸۱۵۸
شاهد		۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۰۴۳	۰/۰۰۱۸۰۷
	۱۰ دقیقه	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۸۰	۰/۰۰۲۴۰۲
		۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۲۱۹	۰/۰۰۳۸۲۶
		۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۵۹۶	۰/۰۰۵۹۸۳
		۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۱۲۱	۰/۰۰۳۰۶۹
شاهد		۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۷۶۷
	۱۰ دقیقه	۰/۹۹۴	۰/۰۰۰۱۵۹	۰/۰۱۰۶۶
		۰/۹۹۴	۰/۰۰۰۲۴۱	۰/۰۱۲۶۸
		۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۴۷۲	۰/۰۱۶۸۲
		۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۷۷۱
شاهد		۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۰۵۱	۰/۰۰۵۶۷
	۱۰ دقیقه	۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۰۶۶۷
		۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۰۵۳	۰/۰۰۵۱۹
		۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۴۶	۰/۰۰۴۰۳
		۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۲۹۷
شاهد		۰/۹۷۷	۰/۰۰۰۵۱۶	۰/۰۱۹۶
	۱۰ دقیقه	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۲۴۸	۰/۰۱۳۳
		۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۱۰۶	۰/۰۰۸۴
		۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۴۳	۰/۰۰۵۰
		۰/۹۹۲	۰/۰۰۰۱۵۴	۰/۰۱۰۹

میان مدل پیچ در پیش‌فرایند فراصوت ۱۰ دقیقه با میانگین مقادیر ضریب تبیین ۰/۹۹۸، میانگین مربعات انحراف^۵ $10 \times 2/6$ ، و ریشه میانگین مربعات خطای $10^{-3} \times 3/41$ به‌عنوان مناسب‌ترین مدل شناخته شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان استنباط کرد که استفاده از فراصوت در صنعت چای‌سازی عامل مهمی در جهت کاهش هزینه، افزایش تولید، و کاهش مصرف انرژی محسوب می‌شود. از مدل پیشنهادشده در این تحقیق می‌توان در طراحی خشک‌کن‌ها و یا سیستم‌های کنترل خشک‌کن ترکیبی-فراصوتی استفاده کرد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق بررسی روند خشک‌شدن برگ چای به‌کمک پیش‌تیمار فراصوت مطالعه شد. عبور امواج فراصوت از برگ چای سبب افزایش سرعت خروج رطوبت در طول فرایند خشک‌شدن و در نتیجه کاهش زمان لازم برای رسیدن به رطوبت لازم برای انبارداری شد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که با وجود درصد زیاد رطوبت اولیه، فقط در مرحله نرخ کاهش فرایند خشک‌شدن برگ چای رخ داد. برای توصیف رفتار خشک‌شدن برگ‌ها از پنج مدل لایه‌نازک استفاده شد که در این

REFERENCES

- Akpinar, E. K. (2006). Mathematical modeling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *Journal of Food Engineering*, 77, 864-870.
- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT-Food Science and Technology*, 40, 1445-1451.
- AOAC (1984) Official methods of analysis (15th ed.). Washington, D.C.USAP: Association of Official Analytical Chemist.
- Babagoltabar, R. & Yeganeh, R. (2013). The Effect of High Power Ultrasound on the Drying Rate of Apple. In: *Proceedings of the 21th National Congress of Food Science and Technology*, 29-31 Oct., Shiraz University, Shiraz, Iran.
- Botheju, W. S., Amarathunge, K. S. P. & Abeyasinghe, I.S.B. (2011). Simulation of Trough Withering of Tea using One Dimensional Heat and Mass Transfer Finite Difference Model. *Tropical Agricultural Research*, 22 (3), 282-295.

- Doymaz, İ. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78, 1291–1297.
- Doymaz, İ. (2012). Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.). *Energy Conversion and Management*, 56, 199–205.
- Erbay, Z. & Icier, F. (2009). Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 91, 533–541.
- Fernandes, F. A. N., Jr, F. E. L. & Rodrigues, S. (2008). Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15, 1049–1054.
- Fernandes, F. A. N. & Rodrigues, S. (2007). Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, 82, 261–267.
- Henderson, S. M. & Pabis, S. (1969). Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 6(3), 169–174.
- ISO (2011). Black tea- definition and basic requirement. International Organization for Standardization, NO.3720.
- Jambrak, A. R., Mason, T. J., Paniwnyk, L. & Lelas, V. (2007). Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *Journal of Food Engineering*, 81, 88–97.
- Jeni, K., Yapa, M. & Rattanadecho, P. (2010). Design and analysis of the commercialized drier processing using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system (case study: tea leaves. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49, 389–395.
- Madamba, P. S., Driscollb, R. H. & Buckleb, K. A. (1996). The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. *Journal of Food Engineering*, 29, 75–97.
- Mason, T. J. (1998) Power ultrasound in food processing - the way forward. In W. Povey, T. J. Mason (Ed.), *Ultrasound in Food Processing* (pp. 104–124). Glasgow, United Kingdom: Blackie Academic and Professional.
- Nadee, A., Tirawanichakul, Y. & Tirawanichakul, S. (2011). Microwave and Combined Hot Air/ Infrared Radiation of Pandanus leaf: Drying Kinetic and Specific energy consumption. In: proceedings of TIChE International Conference, 10–11 Nov, Hatyai, Songkhla, Thailand.
- Naheed, Z., Razzaq Barech, A., Sajid, M., Alam Khan, N., Hussain, R. (2007). EFFECT OF ROLLING, FERMENTATION AND DRYING ON THE QUALITY OF BLACK TEA. *SARHAD Journal of Agriculture*, 23, 577–580.
- Wang, C. Y. & Singh, R. P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of ASAE*, p. 78–6505, St. Joseph-MI.
- Yagcioglu, A., Degirmancioglu, A. & Cagatay, F. (1999). Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. In *Proceeding of the 7th International Congress of Agricultural Mechanization Energy*, 26–27 May, Faculty of Agriculture, Çukurova University, Adana, Turkey, pp. 565–569.
- Öztekin, S. & Martinov, M. (2007). *Medicinal and Aromatic Crops: Harvesting, Drying, and Processing* (1th ed.). USA: CRC Press.