Archive of SID

مهندسی بیوسیستم ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۴ (ص ۳۶۹-۳۶۳)

مدل‌سازی فرایند خشک‌شدن برگ چای به‌کمک فراصوت قدرت

رضا یگانه[1*]، راضیه باباگل‌تبار[2]، عادل حسین‌پور[3]

۱، ۳. استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ایلام

۲. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی

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

چکیده

چای از مهم‌ترین گیاهان دارویی به‌شمار می‌رود که تأثیر فراوانی در درمان بیماری‌های قلبی-عروقی و سرطان دارد. فرایند خشک‌شدن برگ چای با جریان هوای گرم صورت می‌گیرد که مصرف انرژی زیادی دارد. هدف از این تحقیق بررسی روند خشک‌شدن برگ چای به‌کمک پیش‌تیمار فراصوت با توان بالا است. برای این منظور از برگ چای رقم هیبرید چینی استفاده شد. آزمایش‌های پیش‌فرایند خشک‌شدن در حمامی فراصوت با توان ۷۰ وات و بسامد ۲۸ کیلوهرتز در ۴ سطح زمان موج‌دهی ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه انجام شد. نرخ تغییر محتوای رطوبتی نمونه‌ها با پنج مدل لایه‌نازک خشک‌شدن برازش شد. براساس مقدارهای ضریب تبیین، میانگین مربعات انحراف، و ریشهٔ میانگین مربعات خطا، مدل پیج به‌عنوان بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک‌شدن برگ چای به‌کمک فراصوت شناخته شد. از مدل پیشنهادشده در این تحقیق می‌توان در مدل‌سازی خشک‌کن‌های ترکیبی-فراصوتی استفاده کرد.

کلیدواژگان: برگ چای، خشک‌شدن لایه‌نازک، فراصوت، مدل پیج.

مقدمه

گیاه چای با نام علمی کاملیا ساینسیس (Camellia Sinensis) از خانوادهٔ تئاسیس (Theaceae) است. برگ چای در زمان برداشت رطوبت زیادی دارد و به‌فاصلهٔ اندکی پس از برداشت فاسد می‌شود. در صنعت چای‌سازی، برای محافظت از برگ چای دربرابر پوسیدگی و تبدیل آن به چای خشک، پس از طی مراحلی برگ‌ها را با جریان هوای گرم خشک می‌کنند (Botheju *et al.*, 2011). کاهش حجم و وزن مواد، حمل‌ونقل آسان، و قابلیت نگهداری در دمای محیط از مزایای خشک‌کردن به روش جریان هوای گرم است (Doymaz, 2007)، اما دمای زیاد، افزایش چروکیدگی، کاهش کیفیت محصول نهایی، و مصرف زیاد انرژی از معایب آن به‌شمار می‌رود (Erbay, 2009; Alibas, 2007). در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های خشک‌کن ترکیبی مانند جریان هوای گرم-مایکروویو (Alibas, 2007)، مایکروویو-فروسرخ (Nadee *et al.*, 2011) و مایکروویو-خلأ (Jeni *et al.*, 2010)، به‌دلیل افزایش نرخ تبخیر، کاهش زمان، و دمای خشک‌شدن مورد توجه قرار گرفت. علاوه بر این استفاده از پیش‌تیمارهای متعدد پیش از فرایند خشک‌شدن به‌منظور ایجاد تغییر در ساختار مواد و درنتیجه افزایش سرعت خروج رطوبت در طول فرایند خشک‌شدن، از روش‌هایی است که توجه محققان را به‌خود جلب کرده است. در این میان امواج فراصوت با توان بالا به‌دلیل تولید محصول نهایی با کیفیت بالاتر و افزایش نرخ خشک‌شدن در دمای کم‌تر مقبولیت بالایی دارد (Mason, 1998). بررسی روند خشک‌شدن برخی از میوه‌ها و سبزی‌ها ازقبیل موز (Fernandes & Rodrigues, 2007)، قارچ دکمه‌ای، گل‌کلم، و کلم بروکلی (Jambrak *et al.*, 2007)، آناناس (Fernandes *et al.*, 2008) و سیب (Babagoltabar & Yeganeh, 2013) به‌کمک پیش‌تیمار فراصوت، در مطالعات گوناگونی گزارش شده است. در این مطالعات تأثیر پارامترهای گوناگون مانند بسامد، توان، زمان موج‌دهی، و درجهٔ حرارت مطالعه شده و نتایج نشان داده است تأثیر پارامتر زمان موج‌دهی بر مواد گوناگون، متفاوت بوده است. تاکنون مطالعه‌ای در زمینهٔ تأثیر فراصوت با توان بالا بر روند خشک‌شدن گیاهان برگی‌شکل ازقبیل نعناع، جعفری، و چای گزارش نشده است. بنابراین هدف کلی این تحقیق بررسی و مدل‌کردن روند خشک‌شدن برگ تازهٔ چای به‌کمک پیش‌تیمار فراصوت است. اهداف اصلی این تحقیق شامل بررسی اثر زمان موج‌دهی بر زمان و نرخ خشک‌شدن برگ تازهٔ چای و تعیین بهترین مدل لایه‌نازک برای توصیف فرایند خشک‌شدن برگ چای به‌کمک پیش‌تیمار فراصوت است.

* نویسندهٔ مسئول: r.yeganeh@ilam.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مواد و روش‌ها

برگ چای

برگ چای رقم هیبرید چینی از مزرعهٔ تحقیقات چای واقع در مرکز تحقیقات چای لاهیجان برداشت شد. عملیات برداشت به‌صورت 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 اولیهٔ برگ‌ها براساس استاندارد بین‌المللی AOAC و به روش وزن‌کردن محاسبه شد (AOAC, 1984). براساس این استاندارد ۱۵ گرم برگ چای درون آون با دمای ۱۰۴ درجهٔ سلسیوس قرار داده شد. فرایند خشک‌شدن تا ثابت‌شدن وزن برگ‌ها ادامه یافت. وزن نهایی برگ‌ها به‌کمک ترازوی رقمی (Sartorius، مدل GM312، دقت ۰/۰۱ گرم) اندازه‌گیری شد. با دانستن وزن اولیه و نهایی برگ‌ها، درصد رطوبت اولیه بر پایهٔ خشک محاسبه شد (Oztekin & Martinov, 2007).

مقدار رطوبت اولیهٔ برگ چای بر پایهٔ خشک برابر با ۲/۹ گرم آب/گرم مادهٔ خشک به‌دست آمد.

تیمار فراصوت

از یک حمام فراصوت (Parsonic، مدل 2600S؛ حجم: ۲/۶ لیتر؛ ابعاد داخلی: ۲۴×۱۳/۵×۱۰ 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 به‌کمک ترازوی رقمی (Sartorius، مدل GM312، دقت: ۰/۰۱ ± گرم) وزن شد. برگ‌های انتخاب‌شده به‌ضخامت ۱ سانتی‌متر در کف محفظهٔ حمام فراصوت قرار گرفتند. برای جلوگیری از شناورشدن برگ‌ها، یک شبکه‌ای فلزی به‌ضخامت ۱ میلی‌متر روی برگ‌ها قرار داده شد. سپس بقیهٔ حجم مخزن به‌آرامی با آب‌مقطر 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 درجهٔ سلسیوس) موج‌دهی شدند. پس از خارج‌ساختن برگ‌ها از محفظهٔ حمام، رطوبت سطحی به‌کمک کاغذ جاذب گرفته شد. هر یک از تیمارها در سه تکرار انجام شد. هم‌چنین برای بررسی اثر فراصوت، از یک نمونهٔ شاهد بدون عبور امواج فراصوت استفاده شد.

خشک‌کردن

برگ‌ها پس از اعمال امواج فراصوت، به آون (Venticell، مدل 111) با دمای ۱۱۰ درجهٔ 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 خنک‌شدن، وزن برگ‌ها به‌کمک ترازوی رقمی (دقت: ۰/۰۱ گرم) اندازه‌گیری شد و دوباره به آون منتقل شدند.

به‌منظور مقایسهٔ 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 به‌ترتیب از روابط ۱ و ۲ محاسبه شدند (Doymaz, 2012).

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

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

که: MR محتوای رطوبتی، M_t رطوبت در لحظهٔ t (گرم آب/گرم مادهٔ خشک)، M_e رطوبت تعادلی (گرم آب/گرم مادهٔ خشک)، M_0 رطوبت اولیه (گرم آب/گرم مادهٔ خشک)، $M_{t+\Delta t}$ رطوبت در لحظهٔ $t+\Delta t$ (گرم آب/گرم مادهٔ خشک)، Δt فاصلهٔ زمانی (دقیقه)، و DR نرخ خشک‌شدن (گرم آب/گرم مادهٔ 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 به‌کمک 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 ریشهٔ میانگین مربعات خطا بودند که به‌کمک روابط ۳ تا ۵ محاسبه شدند (Akpinar, 2006).

(رابطهٔ ۳)

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

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

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

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. مدل‌های لایه‌نازک خشک‌شدن محصولات کشاورزی

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

بحث و نتایج

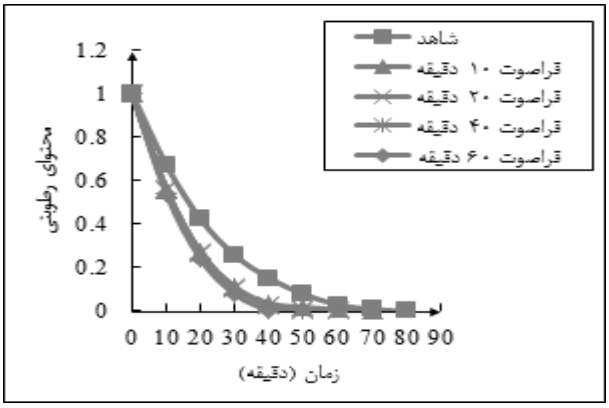
تأثیر فراصوت بر زمان خشک‌شدن

شکل ۱ نمودار تغییرات محتوای رطوبتی برگ چای را نسبت به زمان خشک‌شدن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار محتوای رطوبتی نمونهٔ شاهد در طول فرایند خشک‌شدن از نمونه‌هایی که در پیش‌فرایند فراصوت قرار گرفته‌اند، بیش‌تر است. برای بررسی تأثیر فراصوت بر زمان خشک‌شدن برگ‌ها از تحلیل واریانس استفاده شد. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که فراصوت بر زمان خشک‌شدن برگ‌ها از مقدار اولیه به رطوبت ۳ درصد بر پایهٔ تر -رطوبت مطلوب برای نگهداری برگ چای در شرایط انبار (Naheed *et al*., 2007)- در سطح احتمال ۵ درصد اثر معنی‌دار داشت. به‌عبارت دیگر با عبور امواج فراصوت از برگ چای، زمان لازم برای خشک‌شدن کاهش یافت. شکل ۲ تغییرات درصد رطوبت برگ چای را در طول فرایند خشک‌شدن نشان می‌دهد. براساس شکل ۲، زمان لازم برای خشک‌شدن نمونهٔ شاهد، تیمار ۱۰، ۲۰، ۴۰، و ۶۰ دقیقه به‌ترتیب برابر با ۷۵/۲۷، ۶۶/۰۴، ۵۴/۳۱، ۴۸/۳۸، و ۳۹/۵۸ دقیقه بود. به بیان دیگر، فراصوت زمان خشک‌شدن برگ‌ها را از ۱۲/۲۶ تا ۴۷/۴۱ درصد کاهش داد.

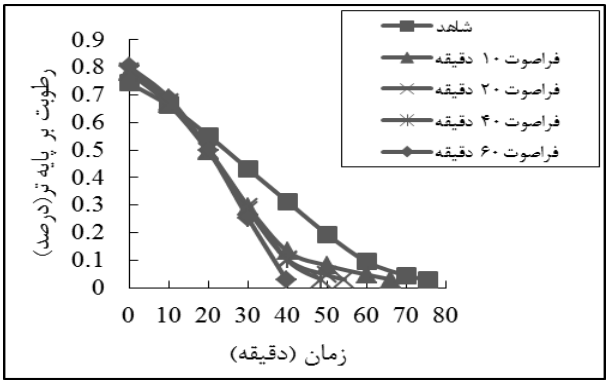
نتایج تحلیل واریانس نشان داد که افزایش زمان موجدهی بر زمان خشک‌شدن در سطح احتمال ۵ درصد اثر معنی‌دار داشت. با افزایش زمان موجدهی از ۱۰ دقیقه به ۶۰ دقیقه، زمان لازم برای رسیدن به رطوبت ۳ درصد (بر پایهٔ تر) از ۶۶/۰۴ دقیقه به ۳۹/۵۸ دقیقه کاهش یافت (شکل ۳).

تأثیر فراصوت بر نرخ خشک‌شدن

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که فراصوت بر نرخ خشک‌شدن در سطح ۵ درصد اثر معنی‌دار داشت. به‌گونه‌ای که، سرعت ازدست‌دادن رطوبت در نمونه‌های پیش‌فرایند بیش از نمونهٔ شاهد بود. بیشینهٔ نرخ در لحظات اولیهٔ فرایند خشک‌شدن و در تیمار ۶۰ دقیقه مشاهده شد (شکل ۴). جدول ۲ نتایج آزمون دانکن برای مقایسهٔ میانگین نرخ خشک‌شدن برگ چای را تا رسیدن به رطوبت ۳ درصد (بر پایهٔ تر)، در نمونه‌های بررسی‌شده نشان می‌دهد. کمینهٔ نرخ در نمونهٔ شاهد با مقدار ۰/۰۳۸۱ (گرم آب/گرم مادهٔ خشک در دقیقه) مشاهده شد. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که زمان موجدهی بر نرخ خشک‌شدن برگ چای در سطح احتمال ۵ درصد اثر معنی‌دار داشت. به‌گونه‌ای که با افزایش زمان موجدهی، سرعت ازدست‌دادن رطوبت نیز افزایش یافت. کمینه و بیشینهٔ نرخ خشک‌شدن نمونه‌های تیمارشده، به‌ترتیب در تیمار ۱۰ دقیقه و ۶۰ دقیقه با مقادیر ۰/۰۵۳۶ و ۰/۱۰۲۶ (گرم آب/گرم مادهٔ خشک در دقیقه) مشاهده شد.



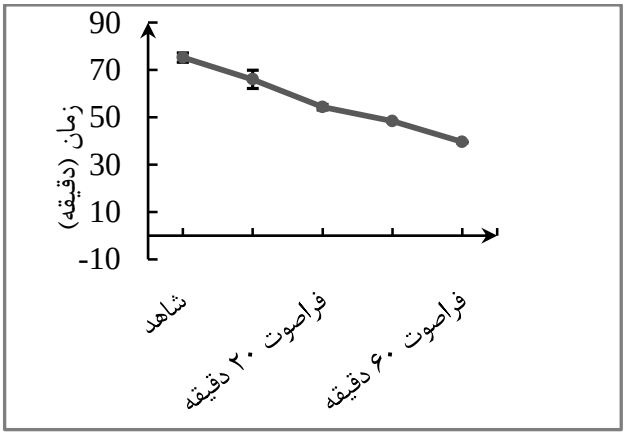
شکل ۱. تغییرات محتوای رطوبتی برگ چای نسبت به زمان



شکل ۲. تغییرات درصد رطوبت برگ چای نسبت به زمان

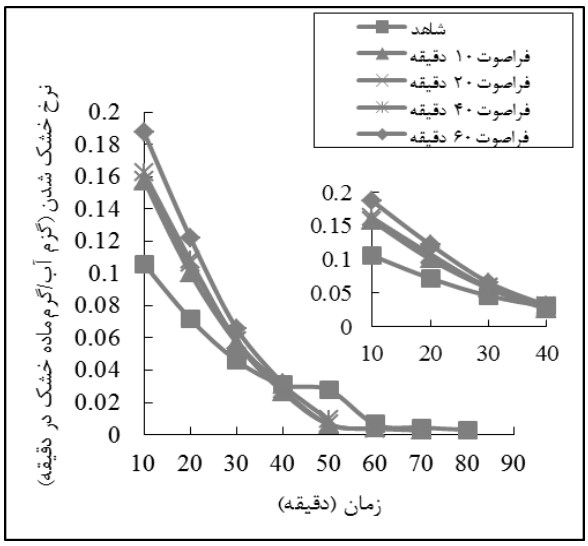
www.SID.ir

Archive of SID



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

با توجه به نتایج مشابه (Jambrak *et al*. 2007)، به‌نظر می‌رسد امواج فراصوت هنگام عبور از بافت برگ چای به‌دلیل شکل‌دهی پدیدهٔ حفره‌زایی، کانال‌های بسیار ریزی را در دیوارهٔ سلولی ایجاد کرده‌اند، درنتیجه با کاهش مقاومت داخلی در برابر انتشار رطوبت و کاهش تعداد لایه‌های مرزی، شرایط مناسبی برای خروج سریع‌تر رطوبت در طول فرایند خشک‌شدن فراهم شد، بنابراین با گذشت زمان مشخصی از فرایند خشک‌شدن، مقدار رطوبت خارج‌شده از نمونهٔ تیمار بیش از نمونهٔ شاهد بود.



شکل ۴. تغییرات نرخ خشک‌شدن برگ چای نسبت به زمان

جدول ۲. نتایج آزمون دانکن برای مقایسهٔ اثر فراصوت بر میانگین نرخ خشک‌شدن برگ چای

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

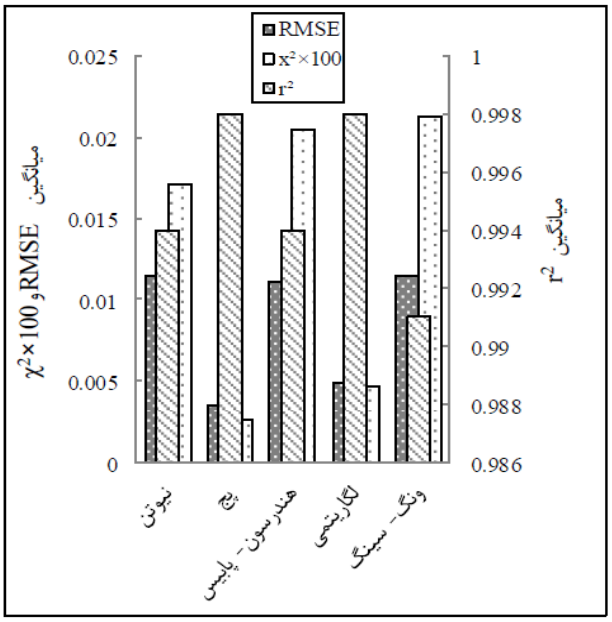
تعیین مدل خشک‌شدن

مقادیر محتوای رطوبتی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، با پنج مدل لایه‌نازک نیوتن، پیج، هندرسون-پابیس، لگاریتمی، و ونگ-سینگ به‌کمک آنالیز رگرسیون غیرخطی در نرم‌افزار SPSS 21 بررسی شد. پارامترهای ثابت مدل‌ها به‌روش تعیین مقدارهای اولیه در رگرسیون غیرخطی محاسبه شدند (جدول ۳). مقادیر ضریب تبیین، میانگین مربعات انحراف، و ریشهٔ میانگین مربعات خطا میان داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها (داده‌های تجربی) و داده‌های حاصل از مدل‌ها (داده‌های پیش‌بینی‌شده) مربوط به هر یک از نمونه‌های شاهد و تیمار در جدول ۴ آمده است. از میان پنج مدل بیان‌شده، مدلی که دارای بیش‌ترین مقدار r^2 و کم‌ترین مقادیر χ^2 و RMSE باشد، به‌عنوان مدل مناسب انتخاب می‌شود. شکل ۵ نمودار ستونی میانگین پارامترهای بیان‌شده را برای هر یک از مدل‌ها نشان می‌دهد. براساس شکل ۵، مدل پیج با میانگین مقادیر ضریب تبیین ۰/۹۹۸، میانگین مربعات انحراف $۲/۶\times۱۰^{-۵}$، و ریشهٔ میانگین مربعات خطای $۳/۴۱\times۱۰^{-۳}$ در تیمار ۱۰ دقیقه بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک‌شدن برگ چای با پیش‌تیمار فراصوت است. براساس محاسبات انجام‌گرفته مدل نهایی فرایند خشک‌شدن برگ چای با اعمال پیش‌فرایند فراصوت به‌صورت رابطهٔ ۶ تعیین شد.

$$R^۲ = ۰/۹۹, MR = \exp(-۳/۱۳\times۱۰^{-۲}t^{۱/۲۵}) \quad \text{(رابطهٔ ۶)}$$

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵. نمودار ستونی میانگین مقادیر r^2، $\chi^2\times100$ و RMSE در پنج مدل لایه‌نازک

جدول ۳. پارامترهای ثابت مدل‌های لایه‌نازک خشک‌شدن برگ چای

گروه	مدل	پارامترهای مدل				
		k	n	a	b	c
شاهد	نیوتن	۰/۰۶۶۴۴	–	–	–	–
فراصوت ۱۰ دقیقه		۰/۰۶۶۸۸	–	–	–	–
فراصوت ۲۰ دقیقه		۰/۰۶۷۱۴	–	–	–	–
فراصوت ۴۰ دقیقه		۰/۰۷۱۷۸	–	–	–	–
فراصوت ۶۰ دقیقه		۰/۰۴۵۷۷	–	–	–	–
شاهد	پیج	۰/۰۳۶۰۷	۱/۲۰۵	–	–	–
فراصوت ۱۰ دقیقه		۰/۰۳۱۳۴	۱/۲۵۶	–	–	–
فراصوت ۲۰ دقیقه		۰/۰۳۱۳۵	۱/۲۵۸	–	–	–
فراصوت ۴۰ دقیقه		۰/۰۲۹۶۶	۱/۳۰۷	–	–	–
فراصوت ۶۰ دقیقه		۰/۰۲۵۹۷	۱/۱۷۰	–	–	–
شاهد	هندرسون-پابیس	۰/۰۶۷۲۴	–	۱/۰۱۴	–	–
فراصوت ۱۰ دقیقه		۰/۰۶۷۸۳	–	۱/۰۱۷	–	–
فراصوت ۲۰ دقیقه		۰/۰۶۸۰۸	–	۱/۰۱۷	–	–
فراصوت ۴۰ دقیقه		۰/۰۷۲۷۴	–	۱/۰۱۶	–	–
فراصوت ۶۰ دقیقه		۰/۰۴۶۶۴	–	۱/۰۲۱	–	–
شاهد	لگاریتمی	۰/۰۶۲۱۱	–	۱/۰۳۷	–	-۰/۰۲۸
فراصوت ۱۰ دقیقه		۰/۰۵۹۴۶	–	۱/۰۵۹	–	-۰/۰۵۰۲
فراصوت ۲۰ دقیقه		۰/۰۵۵۷۴	–	۱/۰۸۹	–	-۰/۰۸۳
فراصوت ۴۰ دقیقه		۰/۰۵۳۷۳	–	۱/۰۴۵	–	-۰/۱۴۲
فراصوت ۶۰ دقیقه		۰/۰۴۰۲۵	–	۱/۰۶۴	–	-۰/۰۵۶۳
شاهد	ونگ-سینگ	–	–	-۰/۰۴۰۶	۰/۰۰۰۳۹	–
فراصوت ۱۰ دقیقه		–	–	-۰/۰۴۳۸	۰/۰۰۰۴۶	–
فراصوت ۲۰ دقیقه		–	–	-۰/۰۴۶۵	۰/۰۰۰۵۳	–
فراصوت ۴۰ دقیقه		–	–	-۰/۰۵۱۰	۰/۰۰۰۶۵	–
فراصوت ۶۰ دقیقه		–	–	-۰/۰۳۱۱	۰/۰۰۰۲۳	–

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴. پارامترهای آماری مدل‌های لایه‌نازک خشک‌شدن برگ چای

گروه	مدل	R^2	پارامترهای آماری χ^2	RMSE
شاهد		۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۰۷۱۶	۰/۰۰۷۹۱۶
فراصوت ۱۰ دقیقه	نیوتن	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۱۴۱	۰/۰۱۰۹۹۵
فراصوت ۲۰ دقیقه		۰/۹۹۴	۰/۰۰۰۲۰۴	۰/۰۱۳۰۳۴
فراصوت ۴۰ دقیقه		۰/۹۹۲	۰/۰۰۰۳۶۹	۰/۰۱۷۱۸۷
فراصوت ۶۰ دقیقه		۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۰۷۴۸	۰/۰۰۸۱۵۸
شاهد		۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۰۰۴۳	۰/۰۰۱۸۰۷
فراصوت ۱۰ دقیقه	پیج	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۰۸۰	۰/۰۰۲۴۰۲
فراصوت ۲۰ دقیقه		۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۲۱۹	۰/۰۰۳۸۲۶
فراصوت ۴۰ دقیقه		۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۰۵۹۶	۰/۰۰۵۹۸۳
فراصوت ۶۰ دقیقه		۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۱۲۱	۰/۰۰۳۰۶۹
شاهد		۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۷۶۷
فراصوت ۱۰ دقیقه	هندرسون-پابیس	۰/۹۹۴	۰/۰۰۰۱۵۹	۰/۰۱۰۶۶
فراصوت ۲۰ دقیقه		۰/۹۹۴	۰/۰۰۰۲۴۱	۰/۰۱۲۶۸
فراصوت ۴۰ دقیقه		۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۴۷۲	۰/۰۱۶۸۲
فراصوت ۶۰ دقیقه		۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۷۷۱
شاهد		۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۰۵۱	۰/۰۰۵۶۷
فراصوت ۱۰ دقیقه	لگاریتمی	۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۰۶۶۷
فراصوت ۲۰ دقیقه		۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۰۵۳	۰/۰۰۵۱۹
فراصوت ۴۰ دقیقه		۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۴۶	۰/۰۰۴۰۳
فراصوت ۶۰ دقیقه		۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۲۹۷
شاهد		۰/۹۷۷	۰/۰۰۰۵۱۶	۰/۰۱۹۶
فراصوت ۱۰ دقیقه	ونگ-سینگ	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۲۴۸	۰/۰۱۳۳
فراصوت ۲۰ دقیقه		۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۱۰۶	۰/۰۰۸۴
فراصوت ۴۰ دقیقه		۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۴۳	۰/۰۰۵۰
فراصوت ۶۰ دقیقه		۰/۹۹۲	۰/۰۰۰۱۵۴	۰/۰۱۰۹

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 درنتیجه کاهش زمان لازم برای رسیدن به رطوبت لازم برای انبارداری شد. هم‌چنین بررسی‌ها نشان داد که با وجود درصد زیاد رطوبت اولیه، فقط در مرحلهٔ نرخ کاهشی فرایند خشک‌شدن برگ چای رخ داد. برای توصیف رفتار خشک‌شدن برگ‌ها از پنج مدل لایه‌نازک استفاده شد که در این میان مدل پیج در پیش‌فرایند فراصوت ۱۰ دقیقه با میانگین مقادیر ضریب تبیین ۰/۹۹۸، میانگین مربعات انحراف $۲/۶\times۱۰^{-۵}$، و ریشهٔ میانگین مربعات خطای $۳/۴۱\times۱۰^{-۳}$ 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.

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. & Abeysinghe, 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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.

www.SID.ir