

ارائه مدل ریاضی نرخ تبخیر برای خشک شدن لایه نازک آلبالو (*Prunus cerasus* L.) (۱۴۸)

حامد مهرآورد^۱، محمدحسین کیانمهر^۲، مرتضی آغاباشلو^۳، اکبر محمد عرب حسینی^۴، هادی صمیمی اخیجیانی^۵

چکیده

نرخ تبخیر، شاخص مصرف انرژی در طول پروسه خشک کردن است. این مقاله یک مدل ریاضی برای نرخ تبخیر در مقابل زمان ارائه می کند، که با داده های آزمایشگاهی تصدیق شده اند. توصیف نرخ تبخیر برحسب زمان، مزیت های زیادی دارد از جمله:

۱- بهینه کردن طرح خشک کن ها و اجزای آن ها،

۲- تشخیص کاربردهای خاص و اشکال بهینه برای سیستم خشک کن ها،

۳- کنترل آسان،

۴- محصول خروجی مطلوب.

رای به دست آوردن داده های آزمایشگاهی از یک خشک کن آزمایشگاهی محفظه ثابت استفاده شد. آلبالوی تازه برداشت شده برای مطالعات خشک کن تهیه گردید. آزمایش های در محیطی با رطوبت نسبی ۳۵-۲۹ درصد، درجه حرارت ۲۵-۳۶ درجه سانتیگراد، در دماهای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد و سه سطح سرعت ۰،۳، ۰،۹ و ۱،۸ متر بر ثانیه انجام شده اند. برای برازش داده های نرخ تبخیر در مقابل زمان با استفاده از رگرسیون چند متغیره، از نرم افزار (MATLAB) استفاده شد. مدل ارائه شده به وسیله معیارهای R^2 ، χ^2 و ریشه میانگین مربع خطا تصدیق شد. در نهایت، قدرت تخمین مدل ارائه شده برر ی شد.

کلیدواژه: نرخ تبخیر، خشک شدن لایه نازک، مدل ریاضی، آلبالو

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پست الکترونیک: hamedm@ut.ac.ir
۲- استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
۴- استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
۵- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

مقدمه:

آلبالو به طور عمده در لهستان، روسیه، صربستان، مجارستان، ایران، اتریش، آذربایجان و آلمان تولید می شود. براساس آمار فائو (سازمان خواربار جهانی، ۲۰۰۶)، ایران در حدود ۴۸،۶۷ میلیون تن تولید که معادل ۵٪ تولید جهانی است [۱]. آلبالو برای تهیه محصولات مختلفی مانند نکتار، سس، ژله، آب نبات و مربا استفاده می شود. بهر حال خشک کردن به طور گسترده ای برای حفظ آلبالو استفاده می شود [۲]. خشک کردن یکی از قدیمی ترین روشها برای حفظ محصولات کشاورزی و غذایی می باشد. خشک کردن مواد غذایی به خاطر کاهش حجم و وزن بعد از پروسه خشک شدن قابل حمل و نقل می سازد [۳]. در زمانهای قدیم، انرژی خورشید جهت خشک کردن استفاده می شد. اما مشکلات زیادی در استفاده از این روش وجود دارد از جمله: تغییرات نامناسب در کیفیت غذا، عدم کنترل کافی در پروسه خشک کردن، طولانی بودن زمان خشک شدن و غیر بهداشتی بودن محصول. مشکلاتی از این قبیل استفاده از تکنولوژی جدید در پروسه خشک کردن را لازم می سازد. در مقابل، خشک کنهای صنعتی مزایایی نسبت به روش سنتی دارند از جمله: برداشت به موقع محصول، کاهش تلفات در مزرعه، برنامه ریزی برای برداشت در شرایط نامطلوب آب و هوایی، افزایش مدت انبارداری مواد غذایی، استفاده مجدد از تلفات مواد غذایی، بدست آوردن محصول مطلوب، کاهش هزینه ها و کاهش مدت زمان فرآوری. مصرف مقدار زیادی از انرژی در صنعت خشک کردن، خشک کردن را یک عملیات با مصرف انرژی زیاد ولی با اهمیت زیاد صنعتی مطرح می سازد [۴]. بنابراین خواص فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی مانند انتقال جرم و حرارت، دیفیوژن، ضریب هدایت حرارتی، گرمایی ویژه و نرخ تبخیر، برای طراحی یک سیستم جدید یا بهبود سیستم های موجود باید شناخته شود. خشک کردن لایه نازک به فرآیند خشک کردن دانه ها بر می گردد که بایستی تمام دانه ها در شرایط یکسان هوای داغ (در یک دما و رطوبت ثابت) قرار گیرند. تمام خشک کنهای هوای داغ بر اساس خشک شدن لایه نازک مدل زی می شوند [۵]. گرچه مطالعات زیادی از مدلهای تجربی، تئوری و نیمه تئوری از مدل سازی خشک شدن لایه نازک برای محصولات کشاورزی مختلف به مانند میوه ها، دانه ها و سبزیجات در مقالات وجود دارد [۲، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶] ولی اطلاعات کمی از مدلسازی نرخ تبخیر بر حسب زمان وجود دارد [۱۷، ۱۸]. مدلسازی نرخ تبخیر بر حسب زمان مزیت های زیادی دارد، از جمله: مصرف انرژی کمتر، کنترل ساده، خروجی بهینه محصول، ملاحظات اقتصادی در طراحی پروژه ها و بدست آوردن شرایط بهینه. مدلسازی نرخ تبخیر برای خشک شدن لایه نازک آلبالو هدف اصلی این تحقیق می باشد. اگر خشک کن برای یک سرعت و گرمای خاص طراحی شود، نرخ تبخیر تنها بر حسب تابعی از زمان بدست می آید و در نهایت انرژی لازم در نقطه ای پروسه خشک کردن بدست می آید.

مواد روشها

تهیه نمونه ها

آلبالوی تازه برداشت شده از بازار تهیه شد و برای انجام آزمایشات در یخچال در دمای ۵+ سانتیگراد نگهداری شد. آلبالوهای نارس و فاسد بطور دستی جدا شده و نمونه های یکنواخت برای انجام آزمایش انتخاب گردیدند. محتوای رطوبت اولیه آلبالوها، به روش خشک کردن در آون بدست آمد. نمونه های ۲۰ گرمی در آون در دمای 2 ± 10.5 درجه سانتیگراد به مدت ۷ ساعت قرار گرفتند. طوریکه تغییر وزنی بین دو بار وزن کردن مشاهده نشد. این روند در ۵ مرتبه تکرار شد. نتایج نشان داد که محتوای رطوبت اولیه آلبالوها در حدود ۷۵،۴ درصد پایه تر می باشد.

شرایط خشک کردن و انجام آزمایشات

شکل شماتیک خشک کن و ابزار اندازه گیری در مقاله سینتیک خشک شدن گردو (*Juglans regia L.*) در مدت زمان خشک شدن با هوای داغ شریح شده است.

طرح آزمایشات

تمام آزمایشات در این تحقیق سه بار برای سه سطح سرعت (۹۰ و ۸۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد) و سه سطح سرعت (۱،۸ و ۰،۹ و ۰،۳ متر بر ثانیه) تکرار شده اند. تاثیر منحصر بفرد و ترکیبی اثرات متغیرها (دما و سرعت هوا) روی ماکزیمم نرخ تبخیر و مدول نرخ تبخیر برای خشک شدن آلبالو براساس یک طرح کاملاً تصادفی (۳ ۳۰ ۳) با استفاده روش از تجزیه واریانس (ANOVA) و با استفاده نرم افزار کامپیوتری *MATLAB* انجام شد.

ملاحظات تئوری

طغرل وپهلوان (۲۰۰۳) یک معادله درجه دو برای مدل کردن نرخ تبخیر ارائه کردند [۱۸].

$$DR = a + bt + ct^2 \quad (۱)$$

تغییرات نرخ تبخیر با زمان به وسیله یک معادله نمایی می تواند بیان شود [۱۷].

$$DR = a \exp(-bt) \quad (۲)$$

چون این معادلات نمی توانند به دقت نرخ تبخیر را بیان کنند (بخصوص در لحظات اولیه خشک شدن)، یک مدل جدید برای مدل کردن نرخ تبخیر پیشنهاد می گردد.

نرخ تبخیر برای آلبالو با استفاده از معادله (۳) محاسبه می گردد:

$$DR = \frac{MC_{t+dt} - MC_t}{dt} \quad (۳)$$

که در آن DR نرخ تبخیر، MC_{t+dt} محتوی رطوبت در زمان $t+dt$ ، MC_t محتوی رطوبت در زمان t ، dt فاصله زمانی بین وزن کردن نمونه ها است.

مشاهده می شود که نرخ تبخیر در لحظات اولیه با گذشت زمان به سرعت افزایش می یابد و به یک نقطه اوجی که بیشترین مقدار نرخ تبخیر است می رسد و بعد از آن با گذشت زمان نرخ تبخیر بطور مداوم کاهش می یابد. این ویژگی نرخ تبخیر می تواند توسط معادله ذکر شده بیان شود [۱۹].

$$DR = DR_{\max} \left(\frac{t}{k}\right) \exp\left(1 - \frac{t}{k}\right) \quad (۴)$$

که در آن k زمانی است که بیشترین نرخ تبخیر اتفاق می افتد، DR نرخ تبخیر در لحظه مشخص، DR_{\max} ماکزیمم نرخ تبخیر و t مدت زمان خشک کردن است.

لازم به ذکر است که در بسیاری از حالات مقادیر k و DR_{\max} بطور مستقیم از داده های اندازه گیری شده نرخ تبخیر بدست می آید.

تحت چنین شرایطی، مقدار بهینه ای که خطای برازش داده ها را صفر می کند، می تواند با حل معادله زیر که از اصل حداقل وزن مربعات بدست می آید، به حداقل برسد.

$$\sum \left(\frac{DR}{DR_{\max}}\right)^2 \left[\ln\left(\frac{DR}{DR_{\max}}\right) - \left(1 + \ln\left(\frac{t}{k}\right) - \frac{t}{k}\right) \right] (k - t) = 0 \quad (۵)$$

روشهای کامپیوتری زیادی برای بدست آوردن مقدار بهینه داده های اندازه گیری شده ایجاد شده اند. k به مدول نرخ تبخیر برمی گردد و اندازه شکل منحنی نرخ تبخیر را تعیین می کند.

سه معیار ضریب همبستگی (R^2)، چی دو کاهشی (χ^2) و ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) برای تصدیق مدل ارائه شده استفاده شده اند، که با استفاده از فرمولهای زیر محاسبه می گردند:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (DR_{pred,i} - DR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{DR}_{pred} - DR_{exp,i})^2} \quad (6)$$

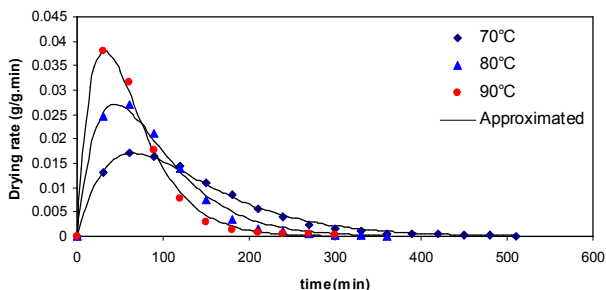
$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (DR_{exp,i} - DR_{pre,i})^2}{N - m} \quad (7)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (DR_{pre,i} - DR_{exp,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

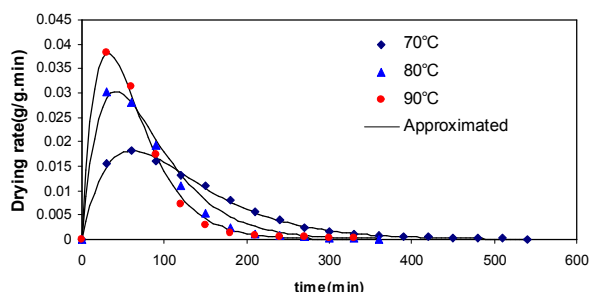
که در آن $DR_{exp,i}$ داده های آزمایشی i ام نرخ تبخیر، $DR_{pre,i}$ داده های پیشگوئی شده نرخ تبخیر، N تعداد مشاهدات و m تعداد ثابتهای نرخ تبخیر است.

نتایج و بحث

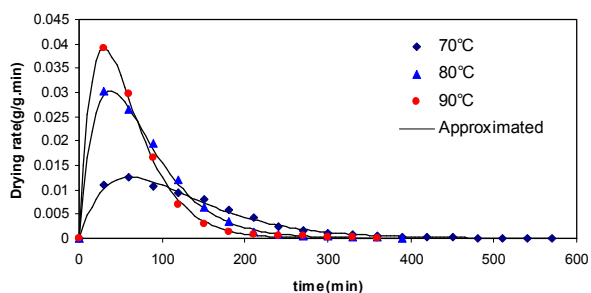
شکل های ۲-۴ منحنی های نرخ تبخیر برای خشک شدن لایه نازک آلبالو برای سطوح مختلف دما و سرعت ثابت را نشان می دهد. تمام منحنی های برازش شده، شامل مدل ارائه ه می باشند. همانطوری که در شکل های ۲-۴ مشاهده می شود، در لحظات اولیه خشک شدن، نرخ تبخیر افزایش پیدا کرده و به یک مقدار ماکزیممی می رسد. پس از آن با پیشرفت زمان، نرخ تبخیر بطور مداوم کاهش می یابد (مرحله نزولی). نتایج مشابهی برای سایر محصولات کشاورزی در طول پروسه خشک کردن گزارش شده است [۲۴، ۲۳، ۲۲، ۲۱، ۲۰، ۱۴، ۱۱، ۹، ۷]. همچنین از شکل های ۲-۴، مشخص است که با سرعت هوای (دمیده شده) ثابت، ماکزیمم نرخ تبخیر در بیشترین دما اتفاق می افتد. مقایسه این شکل ها با یکدیگر نشان می دهد که اثر سرعت هوا بر روی نرخ تبخیر ناچیز است. همانطوری که که در شکل ها مشاهده میشود، تاثیر مستقیم دما روی نرخ تبخیر، بعد از گذشت ۱۵۰-۸۰ دقیقه تقریباً کم می شود، ولی بعد از آن، تاثیر دما روی نرخ تبخیر برعکس می شود.



شکل ۲. نرخ تبخیر بر اساس پایه تر، در مقابل زمان در دماهای مختلف وقتی که سرعت هوا ۰,۳ متر بر ثانیه است برای خشک شدن لایه نازک آلبالو



شکل ۳. نرخ تبخیر بر اساس پایه تر، در مقابل زمان در دماهای مختلف وقتی که سرعت هوا ۰,۹ متر بر ثانیه است برای خشک شدن لایه نازک آلبالو



شکل ۴. نرخ تبخیر بر اساس پایه تر، در مقابل زمان در دماهای مختلف وقتی که سرعت هوا ۱,۸ متر بر ثانیه است برای خشک شدن لایه نازک آلبالو

تحلیل رگرسیونی چند متغییره با نرم افزار *MATLAB* انجام شد. جدول ۱ نتایج برازش (ضریب همبستگی R^2 ، چی دو کاهش χ^2 و $RMSE$ ریشه میانگین مربع خطا) مدل ارائه شده، با استفاده از داده های آزمایشگاهی برای خشک شدن لایه-نازک آلبالو را نشان می دهد. نتایج برازش نشان داد که مدل ارائه شده برای منحنی نرخ تبخیر قابل قبول است و این در حالی است که منحنی نرخ تبخیر، تغییرات منظمی در طول خشک شدن ندارد. چون ارتفاع کم لایه نازک قادر نیست رطوبت کافی را در تمام مدت زمان خشک شدن روی لایه حفظ کند. در تمام آزمایشها، مدل ارائه شده همخوانی خوبی برای منحنی نرخ تبخیر خشک شدن لایه نازک آلبالو داشت. مقادیر ضریب همبستگی R^2 ، چی دو کاهش χ^2 و $RMSE$ ریشه میانگین مربع خطا، برای مدل ارائه شده به ترتیب بین ۰,۹۹۰۶-۰,۹۹۸۸، $۲,۱۴۰ \times 10^{-12}$ تا $۱,۵۰۰ \times 10^{-10}$ و $۹,۹۱۰ \times 10^{-4}$ تا $۲,۸۶۰ \times 10^{-4}$ قرار داشت.

جدول ۱. نتایج برازش برای مدل استفاده شده

۱,۸ متر بر ثانیه			۰,۹ متر بر ثانیه			۰,۳ متر بر ثانیه			سرعت
χ^2	RMSE	R^2	χ^2	RMSE	R^2	χ^2	RMSE	R^2	دما
$۵,۸۳ \times 10^{-11}$	$۳,۵۲ \times 10^{-4}$	۰,۹۹۳۷	$۲,۱۴ \times 10^{-11}$	$۲,۸۶ \times 10^{-4}$	۰,۹۹۷۹	$۸,۰۶ \times 10^{-11}$	$۴,۰۳ \times 10^{-4}$	۰,۹۹۵۸	۷۰ درجه سانتیگراد
$۷,۹۷ \times 10^{-11}$	$۴,۵۷ \times 10^{-4}$	۰,۹۹۸۱	$۳,۵۶ \times 10^{-11}$	$۶,۹۱ \times 10^{-4}$	۰,۹۹۱۶	$۱,۵۰ \times 10^{-10}$	$۹,۹۱ \times 10^{-4}$	۰,۹۹۰۶	۸۰ درجه سانتیگراد
$۵,۸۰ \times 10^{-11}$	$۴,۹۳ \times 10^{-4}$	۰,۹۹۸۸	$۷,۶۲ \times 10^{-11}$	$۸,۷۳ \times 10^{-4}$	۰,۹۹۵۷	$۷,۰۵ \times 10^{-11}$	$۸,۹۵ \times 10^{-4}$	۰,۹۹۵۷	۹۰ درجه سانتیگراد

مدول نرخ تبخیر برای تمام آزمایشات در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۲. مدول نرخ تبخیر k (دقیقه) برای آزمایشات

شرایط هوا	۰,۳ متر بر ثانیه	۰,۹ متر بر ثانیه	۱,۸ متر بر ثانیه
۷۰ درجه سانتیگراد	۶۵,۱۵±۱,۱۴	۶۱,۰۲±۱,۲	۶۱,۶۲±۲,۵۴
۸۰ درجه سانتیگراد	۴۴,۱۵±۲,۹۰	۴۱,۵۱±۲,۴۱	۳۷,۹۷±۲,۱۴
۹۰ درجه سانتیگراد	۳۱,۸۱±۲,۱۲	۳۱,۵۶±۲,۸۸	۳۰,۰۲±۳,۲۵

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که مدول نرخ تبخیر به طور معنی داری از دما و سرعت هوای دمیده شده تاثیر می پذیرد. همچنین نتایج آنالیز واریانس نشان داد که ماکزیمم نرخ تبخیر به طور معنی داری از دما تاثیر می پذیرد در حالیکه اثر سرعت معنی دار نیست (جدول ۳ و ۴).

جدول ۳. تجزیه واریانس (ANOVA) برای اثر سرعت و دمای هوای روی مدول نرخ تبخیر (k)

منبع	d.f.	MSE	F	P>F
دما	۲	۲۳۱۷,۴۹	۴۲۱۴۶,۴۵***	۰,۰۰۰۰
سرعت	۲	۳۳,۵۸	۶۱۰,۶۸***	۰,۰۰۰۰
دما×سرعت	۴	۶,۳۴	۱۱۵,۳۵***	۰,۰۰۰۰
خطا	۱۸	۰,۰۵		
کل	۲۶			

*** معنی دار در سطح ۱ درصد، n.s. بی معنی

جدول ۴. تجزیه واریانس (ANOVA) برای اثر سرعت و دمای هوای روی ماکزیمم نرخ تبخیر (DR_{max})

منبع	d.f.	MSE	F	P>F
دما	۲	۰,۰۰۰۹۸	۲۰,۹***	۰,۰۰۰۰
سرعت	۲	۰,۰۰۰۰۱	۲,۷۲ n.s.	۰,۰۹۲۷
دما×سرعت	۴	۰,۰۰۰۰۴	۷,۸۶***	۰,۰۰۰۰۸
خطا	۱۸	.		
کل	۲۶			

مقدار k زمانی را نشان می دهد که محصول به بیشترین مقدار انرژی برای از دست دادن رطوبت نیاز دارد. بن این مقدار آن به ویژگیهای بافت محصول و شرایط هوای داغ بستگی دارد و از آن به عنوان یک معیار مناسب در طراحی خشک کنها استفاده می شود.

براساس داده های آزمایشگاهی ، مقدار محاسبه شده از k از ۶۵,۱۵ تا ۳۰,۰۲ دقیقه برای خشک شدن لایه نازک آلبالو در دامنه دمایی ۷۰-۹۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۰,۳-۱,۸ متر بر ثانیه متغیر است. مشخص است که مقدار پارامتر k در دماهای بالا نسبت به دماهای پایین، کمتر است. به عبارت دیگر مدت زمانی که نیاز است به بیشترین مقدار نرخ تبخیر برسیم، در دماهای بالا در مقایسه با دماهای پایین، کمتر است.

برای محاسبه اثرات متغیرها روی مدول نرخ تبخیر، k و DR_{max} در مقابل دمای هوا و سرعت هوای داغ با استفاده از رگرسیون چند متغیره برازش شدند. تمام حالات ممکن رای متغیرهای خشک شدن تست شدند، که همگی شامل تحلیل رگرسیونی بودند.

$$k = 173.32 - 1.573T - 2.487V$$

$$R^2 = 0.9532$$

ماکزیمم نرخ تبخیر که برای تمام آزمایشات بدست آمده بود، در مقابل شرایط هوا با رگرسیون چند متغییره برازش شده‌اند. معادله مربوطه و ضریب همبستگی مربوطه در زیر ذکر شده است:

$$DR_{\max} = -0.06271 + 0.001134T - 0.0001V$$

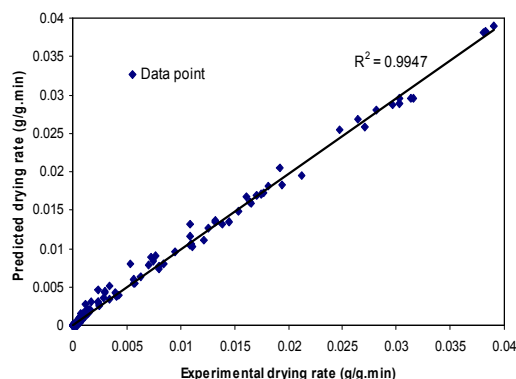
$$R^2 = 0.9590$$

این معادله نشان می‌دهد که تاثیر سرعت روی نرخ تبخیر ناچیز است. معادله کلی برای نرخ تبخیر برحسب تابعی از شرایط هوا و داغ و زمان می‌تواند به صورت زیر بیان شود.

$$DR = f(T, V, t) = (-0.06271 + 0.001134 T - 0.0001 V) \left(\frac{t}{173.32 - 1.573 T - 2.487 V} \right)$$

$$\exp\left(1 - \frac{t}{173.32 - 1.573 T - 2.487 V}\right)$$

اگر خشک کن برای شرایط خاصی از دما و سرعت هوای داغ طراحی شود (۷۰-۹۰ درجه سانتیگراد و ۱.۸-۳ متر بر ثانیه سرعت هوا)، نرخ تبخیر تنها برحسب تابعی از زمان بدست می‌آید. شکل ۵ داده های آزمایشگاهی نرخ تبخیر در مقابل داده های پیشگوئی شده با استفاده از مدل جدید برای خشک شدن لایه نازک آلبالو را نشان می‌دهد. داده ها در نزدیکی یک خط ۴۵ درجه قرار گرفتند و مشخص است که مدل استفاده شده قدرت تخمین خوبی دارد.



شکل ۵. مقایسه نرخ تبخیر بدست آمده از داده های آزمایشگاهی در مقابل مقادیر پیشگویی شده با مدل ارائه شده برای روند خشک شدن آلبالو

نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ تبخیر لایه نازک آلبالو ارائه شده است. داده های آزمایشگاهی برای تصدیق مدل جدید استفاده شده و کاربرد مدل برای پروسه های واقعی خشک شدن تشریح شده است. نرخ تبخیر برحسب تابعی از زمان و شرایط هوای داغ برای خشک شدن لایه نازک آلبالو بیان شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل ارائه شده قدرت تخمین خوبی دارد. همچنین مقاله اخیر ثابتی بنام k معرفی می‌کند که معرف مدول نرخ تبخیر می‌شود، و معیار مهمی در طراحی پروژه های خشک کن می‌باشد. اگر خشک کن برای شرایط خاصی از دما و سرعت طراحی شود، نرخ تبخیر تنها برحسب تابعی از زمان محاسبه خواهد شد.

منابع:

- [۱]FAO (2006). Statistical Database. Available from: <http://www.fao.org/>.
- [۲]Doymaz, I. (2005). Influence of pretreatment solution on the drying of Sour-Cherry. *Journal of Food Engineering*, 78, 591-596.
- [۳]Koyuncu, T., Pinar, Y., & Lule, F. (2007). Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna Jacq.*) and yellow (*Crataegus aronia Bosc.*) fruits. *Journal of Food Engineering*, 78, 1471-1475.
- [۴]Sahin, A. Z, & Dincer, I. (2002). Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 45 (16), 3267-3273.
- [۵]Chakraverty, A., & Singh, R. P. (1988). *Post harvest Technology of Cereals, Pulses and Oilseeds*. OXFORD & IBH PUBLISHING CO. PVT. LTD. New Delhi.
- [۶]Ozdemir, M. & Devres, Y. O. (1999).The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42, 225±233.
- [۷]Babalıs, S. J., & Belessiotis, V. G. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying. *Journal of Food Engineering*, 65, 449-458.
- [۸] Doymaz, I. (2004). Drying kinetics of white mulberry. *Journal of Food Engineering*, 61, 341-346.
- [۹] Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349-359.
- [۱۰]Menges, H. O., & Ertekin, C. (2006). Mathematical modelling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77, 119-125.
- [۱۱]Celma, A. R., Rojas, S., Lopez, F., Montero, I., & Miranda, T. (2007).Thin-layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction. *Journal of Food Engineering*, 80, 1261-1271.
- [۱۲]Kumar, D. G. P., Hebbar, H. U. & Ramesh, M. N. (2006). Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices. *LWT*, 39, 700-705.
- [۱۳]Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 243-248.
- [۱۴]Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X. & Hu, X. (2007). Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering*, 80,536-544.
- [۱۵]Lertworasirikul, S. (2007). Drying kinetics of semi-finished cassava crackers: A comparative study. *LWT*, Article in press.
- [۱۶]Ruiz, R. S., Vizcarra, M. G. & Martinez, C. (2007). Hydration of grain kernels and its effect on drying. *LWT*, Article in press.
- [۱۷] Guine, R. P. F., Ferreira, D. M. S., Barroca, M. J. & Gonc-alves, F. M. (2007). Study of the drying kinetics of solar-dried pears. *Biosystems Engineering*, 98, 422 – 429.
- [۱۸] Togrul, I. T. & Pehlivan, D. (2003). Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58, 23-32.
- [۱۹]Wong, J. Y. (2001). *Theory of ground vehicles*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc.



- [۲۰]Kaleemullah, S., & Kailappan, R. (2006). Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies. *Journal of Food Engineering*, 76, 531–537.
- [۲۱]Kaya, A., Aydin, O., & Demirtas, C. (2007). Drying Kinetics of Red Delicious Apple. *Biosystems Engineering*, 96 (4), 517–524.
- [۲۲]Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., & Raghavan, G. S. V. (2007). Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. *Journal of Food Engineering*, 79, 1452–1459.
- [۲۳]Tasirin, S. M., Kamarudin, S. K., Jaafar, K., & Lee, K. F. (2007). The drying kinetics of bird's chillies in a fluidized bed dryer. *Journal of Food Engineering*, 79, 695–705.
- [۲۴]Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J., & Hu, X. (2007). Mathematical modelling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40, 39–46.

Mathematical modeling of drying rate during thin-layer drying of sour cherry (*Prunus cerasus L.*)

M. Aghbashlo, M. H. Kianmehr, A. Arabhosseini, H. Samimi, H. Mehravar

Department of Agricultural Technical Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Aboreyhan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

Tel: +98 292 302345/23249 fax: +98 292 3020340

Abstract

Drying rate is the index of energy consumption during the drying process. This paper presents a mathematical model of drying rate versus time during thin-layer drying, which was verified with experimental data. Definition of the drying rate as a function of time has many advantages such as (1) optimizing the design of drying systems and their components, (2) identifying appropriate applications and optimal configurations for drying systems, (3) easy control and (4) desired product output. The laboratory scale static-tray dryer was used to obtain the experimental data. Freshly harvested sour cherries were used for drying studies. The experiments were carried out in ambient air with 29–35% RH and at a temperature of 25–36°C. Also, the Experiments were performed at air temperatures of 70, 80 and 90°C. At each temperature, three air velocity values were used: 0.3, 0.9 and 1.8 m/s. *MATLAB* software was used to fit the drying rate curves against time using the multiple regression analysis technique. The presented model was verified with R^2 , χ^2 and root mean square error (RMSE). Consequently, the estimating power of the new model was evaluated.

Keyword: Drying rate, mathematical modeling, sour cherries, thin-layer drying