

## ارزیابی مدل های خشک شدن لایه نازک برای توصیف سینتیک خشک کردن زرشک (۱۴۹)

مرتضی آغباشلو<sup>۱</sup>، محمدحسین کیانمهر<sup>۲</sup>، اکبر محمد عرب حسینی<sup>۳</sup>، حامد مهرآور<sup>۴</sup>، هادی صمیمی اخیجهانی<sup>۵</sup>

### چکیده

زرشک به عنوان یک گیاه داروئی و زینتی در دنیا شناخته شده است. میوه زرشک بی دانه برای درمان سرطان کبد، معده، تصفیه خون و خوشبو کردن دهان استفاده می شود. به منظور ارزیابی و انتخاب مدل مناسب جهت روند خشک شدن زرشک به روش لایه نازک، شش مدل نیمه تئوری و یا تجربی با داده های آزمایشگاهی برازش شد. آزمایشات در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد و سه سرعت ۵/، ۱ و ۲ متر بر ثانیه انجام شد. از بین مدل های برازش شده، مدل پیچ به عنوان بهترین مدل ریاضی با توجه به معیار های  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE انتخاب شد. ثابت های مربوط به مدل پیچ در مقابل شرایط هوایی داغ با توجه به آنالیز رگرسیونی غیر خطی تحلیل گردید.

**کلیدواژه:** زرشک، خشک شدن، لایه نازک، مدل پیچ

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

## مقدمه:

خشک کردن قدیمی‌ترین روشی است که برای نگهداری مواد غذایی استفاده شده است. انسان‌های اولیه دریافته‌اند که بعد از رسیدن محصول، دانه‌های که بطور طبیعی روی ساقه خشک می‌شوند قابل استفاده خواهند بود. در زمانهای قدیم نور خورشید برای خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده می‌شد اما مشکلات زیادی در استفاده از این روش وجود داشت، از جمله تغییرات نامطلوب در کیفیت مواد غذایی و فقدان کنترل کافی در طول دوره خشک کردن. استفاده از فن‌آوریهای جدید برای پروسه خشک کردن را ضروری می‌سازد. زرشک تازه به رنگ قرمز شاد و تخم مرغی شکل بوده و به صورت خوشه از ساقه آویزان است، که با از دست دادن رطوبت به رنگ قهوه‌ای یا سیاه تغییر می‌یابد [۱]. زرشک حاوی اسیدهای آلی و ترکیبات فنولی شامل آنتوسیانین و رنگدانه‌های کاروتنوئید و همچنین فنولاز، پلی‌فنولاز و آنزیم‌های گلیکوسیداز می‌باشد. میوه بدست آمده از درخت زرشک برای درمان سرطان کبد، معده، تصفیه خون و خوشبو کردن دهان استفاده می‌شود [۲]. زرشک بی‌دانه یکی از محصولات باغی شرق ایران و با سطح زیر کشت ۶۰۰۰ هزار هکتار و تولید سالانه ۲۲۰۰۰ هزار تن می‌باشد و عمدتاً به صورت خشک به بازار عرضه می‌گردد. مدل‌های شبیه‌سازی شده از پروسه‌های خشک کردن برای طراحی دستگاه‌های جدید، بهبود سیستم‌های موجود یا حتی برای کنترل خشک‌کنها استفاده می‌شود [۳]. بنابراین، ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی مانند انتقال جرم و حرارت، دیفیوژن، ضریب هدایت حرارتی و گرمایی ویژه برای طراحی یک خشک‌کن جدید مورد نیاز است.

به خشک شدن دانه‌ها تحت شرایط ثابت دمایی و رطوبتی به صورت تک‌لایه گسترده خشک کردن به روش لایه نازک گویند [۴]. محققین زیادی سینتیک خشک کردن محصولات کشاورزی را جهت یافتن بهترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن آن‌ها بررسی کرده‌اند، مثل خشک شدن انجیر هندی با خشک‌کن خورشید [۵]، خرما [۶]، تکه‌های انبه [۷] [انجیر [۸]، تکه‌های سیب زمینی [۹]، پوست کنجد [۱۰] و برنج مالزیایی [۱۱]. هر چند تحقیقات زیادی در مورد مدل کردن به روش لایه نازک برای محصولات مختلف (میوه‌ها، دانه‌ها و سبزیجات) انجام پذیرفته است، اما اطلاعات کمی درباره خشک شدن یک گیاه دارویی مانند زرشک وجود دارد. هدف اصلی این تحقیق، انتخاب بهترین مدل ریاضی و شرایط هوای داغ برای خشک کردن زرشک به منظور طراحی و بهینه‌سازی (زمان خشک شدن و مصرف انرژی) یک سیستم جدید می‌باشد.

## مواد و روشها

### آماده‌سازی نمونه‌ها

زرشک تازه از کشاورزان محلی شهرستان بیرجند واقع در استان خراسان تهیه شده و در فریز با دمای +۵ درجه سانتیگراد برای اجرای آزمایشات نگهداری شد. زرشک‌های نرسیده و فاسد به طور دستی جدا شدند. محتوی رطوبت اولیه زرشک‌ها با استفاده از روش آون داغ تعیین گردید. از نمونه‌های ۲۰ گرمی در دمای  $10.5 \pm 2$  درجه سانتیگراد به مدت ۴ ساعت، برای تعیین محتوای رطوبتی استفاده شد. نتایج نشان داد که رطوبت اولیه زرشک‌ها ۷۴٫۲۸٪ بود.

### شرایط خشک کردن و انجام آزمایشات

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

### ملاحظات تئوری

منحنی‌های خشک شدن با پنج مدل متفاوت رطوبت نسبی که در جدول ۱ گزارش شده، برآزش شدند. رطوبت نسبی زرشک‌ها در طول خشک کردن با استفاده از فرمول (۱) محاسبه شد:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

که در آن MR رطوبت نسبی (بی‌بعد)،  $M_t$  محتوی رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)،  $M_e$  محتوی رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد) و  $M_o$  محتوی رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد). مقدار  $M_e$  در مقایسه با  $M_o$  و  $M_t$  کوچک بوده، لذا خطای ناشی از در نظر نگرفتن آن جزئی است [۱۲].

جدول ۱ - مدل های مورد استفاده برای برازش داده های تجربی

$MR = \exp(-kt)$	مدل لوئیس [۸ و ۱۳].
$MR = a \exp(-kt)$	مدل هندرسون و پابیس [۵ و ۱۴].
$MR = \exp(-kt^n)$	مدل پیچ [۱۵].
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	مدل لگارتمی [۱۶].
$MR = a \exp(-kt/l^2)$	مدل دیفیوژن تقریبی [۱۷ و ۱۸].

سه معیار برای تعیین بهترین برازش استفاده شد، ضریب همبستگی  $R^2$ ، چپ دو کاهشی  $\chi^2$  و RMSE.

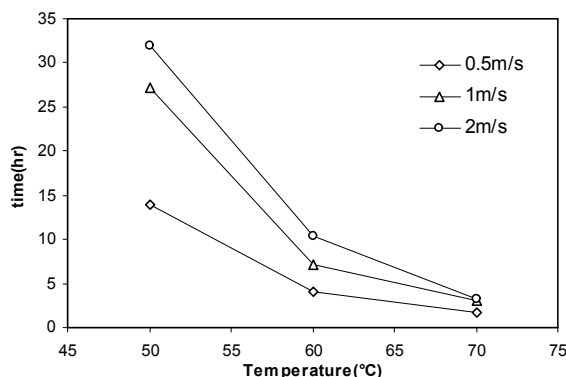
$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - m} \quad (8)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

که  $MR_{exp,i}$  رطوبت نسبی آزمایشگاهی  $i$ ام  $MR_{pre,i}$  رطوبت نسبی پیشگویی شده  $i$ ام،  $N$  تعداد مشاهدات و  $m$  تعداد ثابتهای خشک شدن. بهترین برازشی که می تواند خصوصیات خشک شدن گردو را توصیف کند با توجه به ضریب همبستگی  $R^2$  بالا، چپ دو کاهشی  $\chi^2$  و RMSE پایین انتخاب شد. برای محاسبه تاثیرات متغیرهای خشک کردن روی ثابتهای مدل پیچ، ثابتها در مقابل دمای هوا و سرعت هوای داغ با استفاده از رگرسیون غیر خطی برازش شده اند. تمام حالات ممکن از متغیرهای خشک شدن در نظر گرفته شد و مورد تست رگرسیونی قرار گرفت.

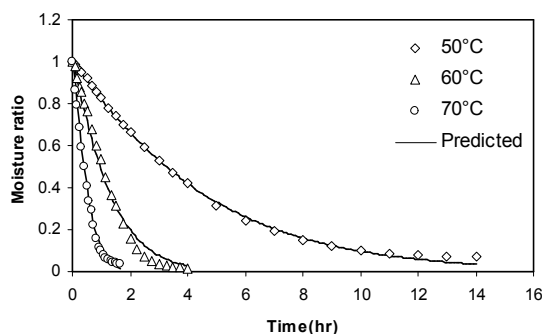
### نتایج و بحث

شکل (۱) زمان کلی خشک شدن در مقابل دما در سرعتهای ثابت را نشان می دهد. در سرعت های پایین تر، مدت زمان کل خشک شدن کمتر است. در سرعت ۲ متر بر ثانیه ۲ تا ۲٫۵ برابر بزرگتر از مدت زمان مورد نیاز برای خشک شدن در سرعت ۰٫۵ متر بر ثانیه است (در دمای ثابت). در حالیکه زمان کل خشک شدن در سرعت ثابت و در محدوده دمایی ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد ۷٫۵ تا ۱۰ برابر افزایش می یابد. به عبارتی، تاثیر دما در مقایسه با اثر سرعت روی زمان خشک شدن لایه نازک زرشک معنی دار تر بوده است.

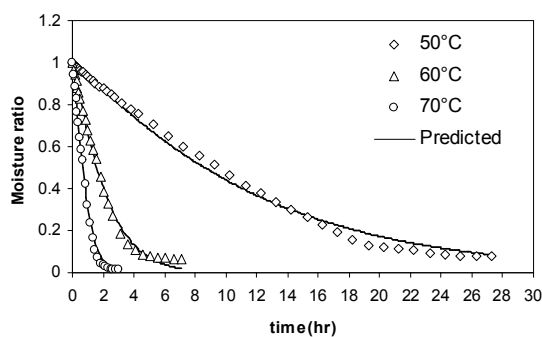


شکل ۱. زمان نهایی خشک شدن در مقابل دماهای مختلف در سرعتهای ثابت

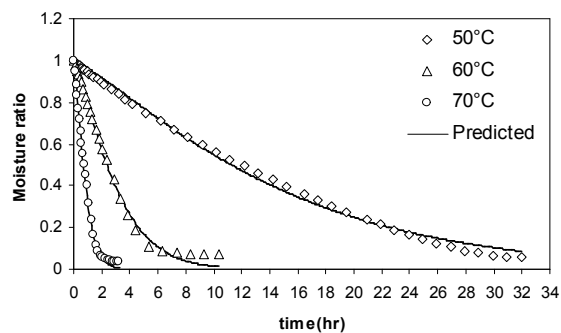
اشکال ۲ تا ۴ منحنی های خشک شدن زرشک در دماهای متفاوت و سرعت ثابت را نشان می دهند. عمده مواد جامد قابل حل زرشک کربوهیدرات است به همین دلیل رطوبت اولیه آن زیاد می باشد. آب موجود در میوه ها به دو صورت جذب سطحی و جذب شیمیایی وجود دارد. عمده رطوبت زرشک به صورت جذب سطحی است، پس انرژی کمی برای تبخیر آب آن مورد نیاز است.



شکل ۲. منحنی های خشک شدن لایه نازک زرشک در دماهای مختلف و خطوط پیشگویی شده توسط مدل پیچ سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه



شکل ۳. منحنی های خشک شدن لایه نازک زرشک در دماهای مختلف و خطوط پیشگویی شده توسط مدل پیچ سرعت ۱ متر بر ثانیه



شکل ۴. منحنی های خشک شدن لایه نازک زرشک در دماهای مختلف و خطوط پیشگویی شده توسط مدل پیچ سرعت ۲ متر بر ثانیه

در پروسه خشک کردن، انتقال جرم داخلی با پخش مایع، بخار و نیروهای کاپیلاری در محصول همراه است و آب موقع رسیدن به سطح تبخیر می شود. وقتی که رطوبت زرشک بالا باشد کاهش رطوبت دارای حرکت کاپیلاری است. کاهش رطوبت بوسیله نیروهای کاپیلاری اتفاق می افتد. تبخیر رطوبت آزاد از سطح میوه با پیشرفت پروسه خشک کردن بیشتر می شود، بنابر این با اتمام رطوبت چروکیدگی اتفاق می افتد. با گذشت زمان منافذ و فضاهای آزاد، آب خود را از دست داده و نسبت مواد جامد در میوه افزایش می یابد، در نتیجه نرخ کاهش رطوبت و انتقال حرارت به طور معنی داری کاهش می یابد. در شروع پروسه خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد بوده و نرخ از دست دادن رطوبت زیاد است، بتدریج با پیشرفت زمان محتوی رطوبت محصول به طور طبیعی کاهش پیدا کرده و نرخ کاهش رطوبت به طور طبیعی کاهش می یابد. محصول عمده رطوبت خود را در لحظات اولیه پروسه خشک کردن از دست می دهد و زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقیمانده لازم است. تحلیل رگرسیونی چند متغییره در محیط نرم افزار *MATLAB* انجام شد. جدول ۲-۴ نتایج برازش ( $R^2$  و  $RMSE$ ) برای مدل های ذکر شده با استفاده از داده های آزمایشگاهی را نشان می دهد. بهترین مدلی که می تواند سینتیک خشک شدن زرشک را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار میانگین  $R^2$  و کمترین مقادیر میانگین  $RMSE$  انتخاب شد. با مقایسه  $R^2$  و  $RMSE$  مشخص شد. مدل پیچ بهترین مدل برای توصیف داده های آزمایشگاهی است.

جدول ۲.  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $\chi^2$  برای ۰.۵ متر بر ثانیه

مدل	۵۰ درجه سانتیگراد			۶۰ درجه سانتیگراد			۷۰ درجه سانتیگراد		
	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
لوئیس	۰.۹۹۷۴	$۶.۹۱ \times 10^{-۵}$	۰.۰۱۷۷	۰.۹۷۴۴	$۵.۹ \times 10^{-۴}$	۰.۰۵۸۴	۰.۹۸۴	$۱.۰۰ \times 10^{-۲}$	۰.۰۳۹۳
پیچ	۰.۹۹۹۸	$۱.۱۷ \times 10^{-۵}$	۰.۰۱۱۴۸	۰.۹	$۱.۹۵ \times 10^{-۴}$	۰.۰	۰.۹۹۷۴	$۲.۸۱ \times 10^{-۵}$	۰.۰۱۶۲
هندرسون و پابیس	۰.۹۹۸۵	$۲.۶۴ \times 10^{-۵}$	۰.۰۱۴۰	۰.۹۸۳	$۲.۴ \times 10^{-۲}$	۰.۰۴۷۳	۰.۹۸۷۸	$۶.۱۷ \times 10^{-۴}$	۰.۰۳۵۲
لگاریتمی	۰.۹۹۸۵	$۲.۷۵ \times 10^{-۵}$	۰.۰۱۴۰	۰.۹۸۳۹	$۲.۵۵ \times 10^{-۲}$	۰.۰۴۷۳	۰.۹۸۷۸	$۶.۵۱ \times 10^{-۴}$	۰.۰۳۵۲
دیفیوژن تقریبی	۰.۹۹۷۸	$۵.۲۴ \times 10^{-۵}$	۰.۰۱۶۸	۰.۹۹۰۳	$۹.۲۹ \times 10^{-۴}$	۰.۰۳۷۶	۰.۹۹	$۲.۶۴ \times 10^{-۴}$	۰.۰۲۸۹

جدول ۳.  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $\chi^2$  برای ۱ متر بر ثانیه

مدل	۵۰ درجه سانتیگراد			۶۰ درجه سانتیگراد			۷۰ درجه سانتیگراد		
	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
لوئیس	۰.۹۸۸۵	$۶.۹۱ \times 10^{-۵}$	۰.۰۱۷۷	۰.۹۹۰۳	$۸.۵۷ \times 10^{-۴}$	۰.۰۳۳۸	۰.۹	$۶.۴۷ \times 10^{-۲}$	۰.۰۵۹۸
پیچ	۰.۹۹۵۰	$۷.۴۷ \times 10^{-۵}$	۰.۰۲۲۴۶	۰.۹۹۵	$۱.۷ \times 10^{-۲}$	۰.۰۲۲۹	۰.۹	$۷.۷۴ \times 10^{-۵}$	۰.۰۱۹۳
هندرسون و پابیس	۰.۹۹۰۶	$۲.۷ \times 10^{-۵}$	۰.۰۳۴۴	۰.۹	$۵.۴۶ \times 10^{-۲}$	۰.۰۳۰۵	۰.۹۸۱	$۳.۰۷ \times 10^{-۲}$	۰.۰۵۰۲
لگاریتمی	۰.۹۹۰۶	$۲.۷۸ \times 10^{-۵}$	۰.۰۳۴۴	۰.۹۹۲	$۵.۷ \times 10^{-۲}$	۰.۰۳۰۵	۰.۹۸	$۳.۲۳ \times 10^{-۲}$	۰.۰۵۰۲
دیفیوژن تقریبی	۰.۹۸۸۴	$۴.۱۴ \times 10^{-۵}$	۰.۰۳۸۴	۰.۹۹۲	$۶.۰ \times 10^{-۴}$	۰.۰۳۱۷	۰.۹۷۲۰	$۷.۱۲ \times 10^{-۲}$	۰.۰۶۵۷

جدول ۴.  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $\chi^2$  برای ۲ متر بر ثانیه

مدل	۵۰ درجه سانتیگراد			۶۰ درجه سانتیگراد			۷۰ درجه سانتیگراد		
	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
لوئیس	۰.۹۸۸۴	$۴.۱ \times 10^{-۲}$	۰.۰۳۶۹	۰.۹۸۳۶	$۲.۵۹ \times 10^{-۲}$	۰.۰۴۴۷	۰.۹۷۸	$۳.۷ \times 10^{-۲}$	۰.۰۴۸۹
پیچ	۰.۹۹۵۸	$۵.۳۸ \times 10^{-۴}$	۰.۰۲۲۲	۰.۹۹۵۵	$۱.۹ \times 10^{-۲}$	۰.۰۲۳۶	۰.۹۹۷۳	$۵.۳ \times 10^{-۵}$	۰.۰۱۷۱
هندرسون و پابیس	۰.۹۸۹۵	$۳.۵ \times 10^{-۲}$	۰.۰۳۵۵	۰.۹۸۸	$۱.۳۸ \times 10^{-۲}$	۰.۰۳۸۶	۰.۹	$۱.۷ \times 10^{-۲}$	۰.۰۴۱۰
لگاریتمی	۰.۹۸۹۵	$۳.۶۰ \times 10^{-۲}$	۰.۰۳۵۵	۰.۹	$۱.۴۴ \times 10^{-۲}$	۰.۰۳۸۶	۰.۹۸۵	$۱.۸۴ \times 10^{-۲}$	۰.۰۴۱۰
دیفیوژن تقریبی	۰.۹۸۸۴	$۴.۳۶ \times 10^{-۲}$	۰.۰۳۷۷	۰.۹۸۷۳	$۱.۶۷ \times 10^{-۲}$	۰.۰۴۰۸	۰.۹	$۴.۰۵ \times 10^{-۲}$	۰.۰۵۱۰

تابتهای مدل پیچ در جدول ۵ گزارش شده اند. در تمام آزمایشات مدل پیچ همخوانی خوبی برای منحنی خشک شدن زرشک به روش لایه نازک داشت. مقادیر  $R^2$  و  $RMSE$  برای مدل پیچ به ترتیب بین  $0.9915-0.9989$ ،  $1.95 \times 10^{-4}$  تا  $1.17 \times 10^{-5}$  و  $0.0334-0.114$  قرار داشت.

جدول ۵. تابتهای مدل پیچ برای آزمایشات مختلف

سرعت دما	۰,۵ متر بر ثانیه	۱ متر بر ثانیه	۲ متر بر ثانیه
	n	k	n
۵۰ درجه سانتیگراد	۱,۰۷۹	۰,۰۶۵۰	۱,۱۰۰
۶۰ درجه سانتیگراد	۱,۱۶۰	۰,۴۰۳۸	۱,۱۶۲
۷۰ درجه سانتیگراد	۱,۲۸۵	۱,۱۶۳۰	۱,۳۰۱

رابطه ای بین تابتهای مدل پیچ، سرعت و دمای هوای داغ با استفاده از رگرسیون چند متغیره برقرار شد. معادله و  $R^2$  مربوطه در زیر گزارش شده است. تحلیل رگرسیونی این پارامترها در سطح ۱٪ درصد معنی دار بود.

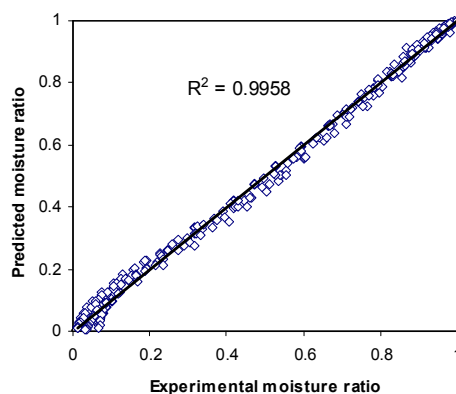
$$k = 2.497 \cdot 10^{20} V^{-0.8442} \exp\left(-\frac{15977.3}{T_{abs}}\right) \quad R^2 = 0.9874$$

$$n = 13.45 V^{0.0561} \exp\left(-\frac{802.5}{T_{abs}}\right) \quad R^2 = 0.9497$$

در نتیجه، معادله زیر برای خشک کردن لایه نازک زرشک بدست مد:

$$MR = f(t, T, V) = \exp\left(2.497 \cdot 10^{20} V^{-0.8442} \exp\left(-\frac{15977.3}{T_{abs}}\right) t\right)^{13.45 V^{0.0561} \exp\left(-\frac{802.5}{T_{abs}}\right)}$$

شکل ۵ نتایج داده های آزمایشگاهی در مقابل داده های پیشگوئی شده با استفاده از مدل پیچ را نشان می دهد. تمرکز داده ها در کنار خط ۴۵ درجه قدرت مدل پیچ برای پیشگوئی منحنی خشک شدن لایه نازک زرشک را نشان می دهد.



شکل ۵. داده های پیشگوئی شده رطوبت نسبی با مدل پیچ در مقابل داده های آزمایشگاهی برای خشک شدن لایه نازک زرشک در دماهای مختلف

شکل ۶ (سمت چپ) زرشکهای خشک شده با استفاده از خشک کن آزمایشگاهی هوای داغ (در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و سرعت ۱ متر بر ثانیه) را نشان می دهد. همچنین شکل ۶ (سمت راست) زرشکهای خشک شده با استفاده از نور خورشید را نشان می دهد.



شکل ۶ مقایسه زرشکهای خشک شده با استفاده از نور خورشید و خشک کن آزمایشگاهی

### نتیجه گیری

منحنی نرخ تبخیر زرشک در مرحله نزولی اتفاق می افتد. در مقایسه با سرعت، دما روی زمان خشک شدن تاثیر معنی دارتری دارد. با افزایش سرعت هوا در یک دمایی ثابت، زمان خشک شدن طولانی تر می گردد. مدل پیچ بهترین برازش برای داده های آزمایشگاهی با توجه  $R^2$  و  $RMSE$  داشت. رنگ و شکل طبیعی زرشک تا حد زیادی در خشک کن آزمایشگاهی حفظ شده است. در محتوی رطوبتی اولیه بالا اگر جهت هوا خلاف جهت ورود محصول باشد، سخت شدن پوسته محصول خواهد افتاد. برای بدست آوردن محصول مطلوب باید رطوبت آزاد به طور کامل و مقداری از آب کاپیلاری از میوه خارج شود. راحت ترین روش برای رسیدن به این هدف کاهش فشاربخار در اطراف میوه در یک خشک کن و دور کردن رطوبت از سطح محصول است. این عمل با استفاده از دما و سرعت مناسب انجام می گیرد.

منابع:

[۱]. م. کافی و احمد بالندری، ۱۳۸۱. زرشک تولید و فن آوری. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

- [۲] DUKE, J.A. 1991. Handbook of Medicinal Herbs, 8th Ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- [۳] XIA, B. and SUN, D.W. 2002. Application of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. Com. and Elec. in Agri. 34, 5–24.
- [۴] CHAKRAVERTY, A. and SINGH, R.P., 1988. Post harvest Technology of Cereals, Pulses and Oilseeds. OXFORD and IBH PUBLISHING CO. PVT. LTD. New Delhi.
- [۵] LAHSASNI, S., KOUHILA, M., MAHROUZ, M., AIT MOHAMED, L. and AGORRAM, B. 2004. Characteristic drying curve and mathematical modeling of thin-layer solar drying of Prickly pear cladode (opuntia ficus indica). J. Food Pro Eng. 27(2), 103–117.
- [۶] BAKARI, H.H. and HOBANI, A.I. 2000. Thin-layer drying of dates. J. Food Pro Eng. 23(3), 177–189.
- [۷] GOYAL, R.K., KINGSLEY, A.R.P., MANIKANTANL, M.R. and ILYAS, S.M. 2006. Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices. Bio. Eng. 95(1), 43–49.
- [۸] BABALIS, S. J., PAPANICOLAOU, E., KYRIAKIS, N. and BELESSIOTIS, V.G. 2005. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (Ficus Carica). J. Food. Eng. 75, 205–214.



- [۹] AKPINAR, E., MIDILLI, A. and BICER, Y. 2003. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *J. Ene. con. and man.* 44, 1689–1705.
- [۱۰] AL-MAHASNEH, M.A., RABABAH, T.M., AL-SHBOOL, M.A. and Yang, W. 2007. Thin-layer drying kinetics of Sesame hulls under forced convection open sun drying. *J. Food Pro Eng.* 30(3), 324–337.
- [۱۱] NG, P.P., TASRIAN, S.M. and LAW, C.L. 2006. Thin layer method analysis of spouted bed dried Malaysian paddy characteristic drying curves. *J. Food Pro Eng.* 29(4), 414–428.
- [۱۲] DIAMANTE, L.M. and MUNRO, P.A. 1991. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51, 271–276.
- [۱۳] LEWIS, W. K. 1921. The rate of drying of soild materials. *Ind. Eng. Chem.* 13, 427–432.
- [۱۴] HENDERSON, S.M. and PABIS, S. 1961. Grain drying theory. 1. temperature affection drying coefficient. *J. Agr. Eng. Res.* 6, 169–170.
- [۱۵] PAGE, G.E. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M. Sc. Thesis, Purdue University.
- [۱۶] TOGRUL, I.T. and PEHLIVAN, D. 2004. Modelling of thin-layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *J. Food Eng.* 65(3), 413–425.
- [۱۷] YALDIZ, O., ERTEKIN, C. and UZUN, H.I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy.* 26, 457–465.





## EVALUATION OF THIN-LAYER DRYING MODELS FOR DESCRIBING DRYING KINETICS OF BARBERRIES (*BARBERRIES VULGARIS*)

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

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

*E.mail: [maghashlo@ut.ac.ir](mailto:maghashlo@ut.ac.ir) , [mortazaaghashlo@yahoo.com](mailto:mortazaaghashlo@yahoo.com)*

### ABSTRACT

Barberry is known as a medicinal and ornamental plant throughout the world. Edible fruit from the barberry is used in medicine to treat liver, neck and stomach cancer, for purification of the blood and for breath freshness. In order to assess and select a suitable form of the drying curve, six different semi-theoretical and/or empirical models were fitted to the experimental data. Experiments were performed at air temperatures of 50, 60 and 70 °C. At each temperature, three air velocity values were selected: 0.5, 1 and 2 m/s. Consequently, of all the drying models, the Page model was selected as the best mathematical model according to  $R^2$ ,  $\chi^2$  and RMSE parameters. Constants related to the Page model are reported and regressed against air condition using multiple regression analysis.