

بررسی مدل‌های خشک‌کردن ورقه‌های نازک میوه موز (۳۹۲)

فرناز فرهپور^۱، عبدالله گل‌محمدی^۲، محمد حسین کیانمهر^۳

چکیده

یکی از گونه‌های میوه‌های گرمسیری که از نظر اقتصادی و صنعتی حائز اهمیت است، موز می‌باشد. این محصول به صورت تازه یا فرآوری شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌ها از سه رقم موز دوارف کاوندیش^۴، گراندناین^۵ و گروس میشل^۶ انتخاب شد و به شکل ورقه‌هایی با ضخامت ۳ و ۶ میلی‌متر برش داده شد. آزمایش‌های خشک‌شدن در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۱ m/s اجرا شد. رطوبت اولیه بر پایه ماده خشک سه رقم موز به ترتیب ۳۵۱/۲۸، ۳۷۰/۱۷ و ۳۲۸/۸۱٪ بود. در این تحقیق از یک خشک‌کن آزمایشگاهی استفاده شد و خشک‌کردن ورقه‌های میوه موز و مدل‌های استاندارد خشک‌کردن لایه نازک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. وزن نمونه‌ها در طی آزمایشات در هر ۳۰ دقیقه توسط ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری و ثبت گردید و داده‌های حاصل از آزمایش‌های خشک‌شدن به صورت نمودارهای نسبت رطوبت-زمان ترسیم شد. ۱۱ مدل خشک‌شدن لایه نازک بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد (برازش داده‌های آزمایشگاهی با دو مدل نیوتون و هندرسون-ویپایس بی‌نتیجه بود) و کیفیت برازش آنها بر حسب سه پارامتر ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مربع کای (X^2) ارزیابی شد. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل پیچ و پیچ اصلاح شده نسبت به سایر مدل‌ها با دقت بیشتری تغییرات رطوبت را در ورقه‌های نازک موز شبیه‌سازی می‌کند. مقدار R^2 در مدل‌های پیچ و پیچ اصلاح شده بزرگتر از ۰/۹۸۱۱۳ و مقادیر X^2 و RMSE به ترتیب کوچکتر از ۰/۰۱۸۳۹ و ۰/۰۴۲۷۷۵ بود.

کلیدواژه: خشک‌کردن، مدل، سینتیک، موز، لایه نازک

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد رشته مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی،
پست الکترونیک: farnaz.farahpour@gmail.com

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان

4- Dwarf cavendish
5- Grand naine
6- Gros michel

۱. مقدمه:

موز یکی از مهمترین میوه های مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری می باشد. اهمیت موز به خاطر میوه، الیاف و فرآورده های جانبی آن می باشد. موز در مناطق گرمسیری جنوب و مناطق نیمه گرمسیری و مرطوب شمالی ایران در شرایط گلخانه ای قابل کشت می باشد. طبق آمار سطح زیر کشت، میزان تولید و عملکرد تولید موز در ایران به ترتیب ۳۵۰۳/۴۳ هکتار، ۷۴۶۷۸/۳ تن و ۳۰۱۴۶/۲۵ کیلوگرم در هکتار می باشد [۲]. میوه موز رسیده پس از برداشت بسیار آسیب پذیر بوده و در معرض فساد می باشد [۷]. یکی از راه های نگداری و ذخیره سازی موز پس از برداشت، خشک کردن آن است. خشک کردن مواد غذایی، محصولات کشاورزی و میوه ها به روش های مختلفی امکان پذیر است، مانند خشک کردن در آفتاب، خشک کردن با هوای گرم، خشک کردن با اشعه مایکروویو و غیره. کنترل شرایط خشک شدن در خشک کردن با آفتاب بسیار مشکل می باشد، بنابراین این روش در پژوهش های علمی و پروسه های صنعتی قابل استفاده نمی باشد.

جایاس و همکاران معتقدند خشک کن لایه نازک به خشک کنی گفته می شود که ضخامت محصول و طول سینی حاوی در آن به حدی باشد که دما و رطوبت هوای خشک کن قبل و بعد از عبور از محصول یکسان باشد [۹]. تلفات تولیدات و محصولات کشاورزی و باغبانی فعالان بخش کشاورزی را بر آن داشت تا در جستجوی روشی برای پیشگیری از این تلفات باشند. خشک کردن روشی مناسب جهت ذخیره سازی مواد غذایی و محصولات کشاورزی می باشد. خشک کردن به خاطر کاهش وزن و حجم مواد غذایی موجب کاهش هزینه های بسته بندی و حمل و نقل می گردد. علاوه بر این در خشک کردن فرآورده های جدیدی تولید شده و باعث ایجاد ارزش افزوده برای مواد غذایی می گردد [۴، ۵، ۱۳]. خشک کردن فرآیند پیچیده ای شامل انتقال جرم^۱ و حرارت^۲ می باشد [۱۱]. در فرآیند خشک شدن انتقال حرارت به دو طریق انجام می شود، یکی از طریق جابجایی^۳ حرارت توسط جریان هوای گرم خشک^۴ و دیگری از طریق هدایت^۴ بین سینی خشک کن و نمونه ها [۷]. در خشک شدن چهار پدیده انتقالی متداول رخ می دهد، انتقال حرارت داخلی و خارجی و انتقال جرم داخلی و خارجی [۱۲]. آگاهی از روند فرآیند خشک شدن موز به منظور کنترل شرایط خشک شدن، طراحی یک الگوی بهینه خشک کردن و دستیابی به فرآورده هایی با کیفیت مطلوب مهم می باشد. برخی مدل های ریاضی (جدول ۱) برای پیش بینی و شبیه سازی فرآیند خشک شدن مواد تحت شرایط مختلف مورد استفاده قرار گرفته اند. بسته به نوع معادله، مدل ها می توانند به مدل های تئوری، تجربی و نیمه تجربی تقسیم بندی شوند [۱۲].

اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از:

۱. بررسی مدل های استاندارد استفاده شده توسط سایر محققین.
۲. انتخاب بهترین مدل برای پیش بینی فرآیند خشک شدن میوه موز.
۳. تعیین شرایط مناسب خشک شدن میوه موز.
۴. مطالعه تغییرات رطوبت لایه ای نازک از موز و استخراج منحنی خشک شدن آن (کاهش رطوبت نسبت به زمان).

-
1. Mass transfer
 2. Heat transfer
 3. Convection
 4. Conduction

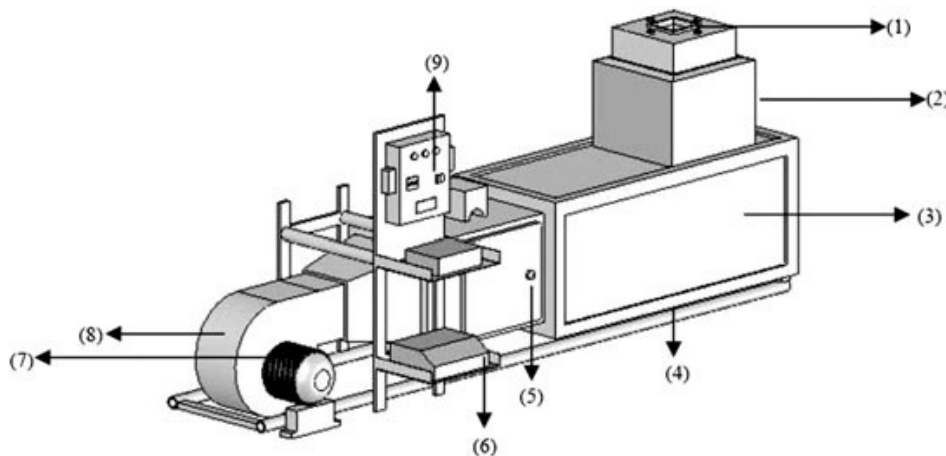
۲. مواد و روش‌ها :

۲-۱ تهیه نمونه‌ها :

میوه‌های رسیده موز از سه رقم دوارف‌کاوندیش و گراندناین از گلخانه و رقم گروس‌میشل از بازار تهیه شدند. پوست موزها جدا شد و موزها به شکل ورقه‌هایی با ضخامت ۳ و ۶ میلی‌متر برش داده شدند. نمونه‌ها ابتدا وزن شدند و سپس تعدادی از آنها در آن دمای ۱۰۳°C به مدت ۳/۵ ساعت قرار گرفتند و رطوبت اولیه آنها محاسبه شد [۱۰]. رطوبت اولیه بر پایه خشک برای ارقام دوارف‌کاوندیش، گراندناین و گروس‌میشل به ترتیب % ۳۵۱/۲۸، % ۳۷۰/۱۷ و % ۳۲۸/۸۱ بدست آمد.

۲-۲ راه اندازی دستگاه خشک‌کن :

در این تحقیق از یک خشک‌کن آزمایشگاهی با سینی ثابت (طراحی و ساخته شده در گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان) استفاده شد (شکل ۱). اجزای اصلی خشک‌کن عبارتند از یک فن گریز از مرکز برای دمیدن هوا، المنت‌های گرم‌کننده هوا (4.5 KW)، محفظه خشک‌کن، سیستم کنترل، ای‌رتور^۱ و سینی نمونه‌ها. به منظور کاهش اثرات نامطلوب دما و رطوبت هوا بر آزمایشات، محفظه خشک‌کن و تونل هدایت هوای گرم به وسیله پشم شیشه و چوب عایق بندی شده‌اند. خشک‌کن مجهز به یک سیستم اتوماتیک کنترل کننده دمای هوای عبوری با دقت $\pm 1^\circ\text{C}$ می‌باشد. سرعت جریان هوا با استفاده از یک بادسنج^۲ با دقت $\pm 0.05\text{ m/s}$ تنظیم شد. سرعت جریان هوا به وسیله اینورتور که به الکتروموتور (1.5 KW) متصل است ثابت نگه‌داشته شد. جهت برخورد هوای گرم به نمونه‌ها به صورت عمودی انتخاب شد. همچنین دمای هوای خشک‌کن در طی آزمایشات توسط یک کنترل کننده دما ثابت نگه‌داشته شد. سی دقیقه قبل از شروع آزمایشات، خشک‌کن راه اندازی و پارامترهای سرعت و دمای هوا روی مقدار مورد نظر تنظیم شد تا خشک‌کن به شرایط پایدار برسد. آزمایشات در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۱ m/s انجام شد [۶].



شکل (۱). شمائی از طرح کلی خشک‌کن آزمایشگاهی

۱. سینی.
۲. محل قرارگیری سنسورها.
۳. محفظه عایق‌بندی شده.
۴. پایه.
۵. گرم‌کننده.
۶. اینورتور.
۷. الکتروموتور.
- ۸.
۹. واحد کنترل کننده اتوماتیک

1. Inverter (Lenz 8300 germany)
2. PROVA AVM-07

۳-۲ اجرای آزمایش :

پس از آنکه موزها پوست گرفته شد و به ضخامت های مورد نظر برش داده شد، نمونه‌ها روی سینی دستگاه خشک‌کن چیده شدند. نمونه‌ها هر سی دقیقه با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.1 gr وزن شد. توزین نمونه‌ها تا زمانیکه محتوای رطوبت نمونه‌ها به مقدار ثابتی رسیده و اختلاف وزن بین دو توزین متوالی به کمتر از 0.1 gr نرسیده بود، ادامه یافت. به منظور افزایش دقت، کلیه آزمایشات در ۴ تکرار انجام شد.

۴-۲ بررسی‌های تئوری :

۱-۴-۲ مدل‌سازی نمودارهای خشک شدن لایه نازک :

به منظور بررسی خصوصیات خشک شدن میوه موز، بایستی روند خشک شدن را مدل نمود. در این مطالعه داده‌های آزمایشی فرآیند خشک شدن ورقه‌های موز در شرایط مختلف دمای هوای خشک‌کن، سرعت جریان هوای عبوری و ضخامت نمونه‌ها، با ۱۱ مدل خشک کردن لایه نازک استاندارد (جدول ۱) برازش داده شد. در این مدل‌ها MR معرف نسبت رطوبت می‌باشد و با استفاده از فرمول (۱) قابل محاسبه است.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

M محتوای رطوبت در هر لحظه، M_0 محتوای رطوبت اولیه و M_e محتوای رطوبت تعادلی می‌باشد (۶، ۱۴). مقادیر M در مقایسه با M_0 و M بسیار کوچک بوده و معادله (۱) می‌تواند به صورت معادله (۲) نوشته شود.

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (2)$$

جدول (۱). مدل‌های استاندارد خشک کردن لایه نازک

شماره	نام مدل	مدل	منبع
۱	نیوتون	$MR = \exp(-kt)$	(۸)
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	(۸)
۳	هندرسون و پاییس	$MR = a \exp(-kt)$	(۸)
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	(۸)
۵	پیچ اصلاح شده	$MR = \exp(-(kt)^n)$	(۸)
۶	دو جمله ای	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(۸)
۷	وانگ و سینگ	$MR = m_0 + at + bt^2$	(۸)
۸	ورما و همکاران	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	(۱۳)
۹	تقریب پخش	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	(۱۱)
۱۰	هندرسون و پاییس اصلاح شده	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	(۱۳)
۱۱	دوجمله ای نمایی	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	(۱۳)

۲-۴-۲ انتخاب بهترین مدل :

کیفیت برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ریاضی بر حسب سه پارامتر ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)^۲ و مربع کای (χ^2) ارزیابی شد. برای محاسبه $RMSE$ و χ^2 از روابط (۳) و (۴) استفاده شد.

1. Correlation coefficient
2. Root mean square error

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (3)$$

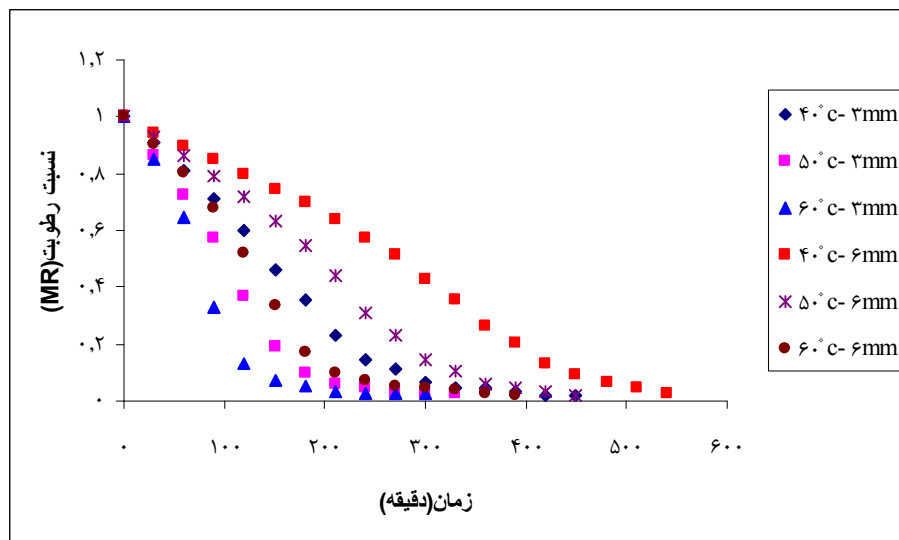
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (4)$$

$MR_{exp,i}$ مقادیر نسبت رطوبت حاصل از آزمایشات، $MR_{pre,i}$ مقادیر نسبت رطوبت پیش بینی شده، N تعداد داده ها و Z تعداد ثابت های معادله هستند [۱۴]. مدلی که بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار $RMSE$ و χ^2 را نشان دهد به عنوان بهترین مدل برای بیان روند خشک شدن میوه موز معرفی می شود [۶].

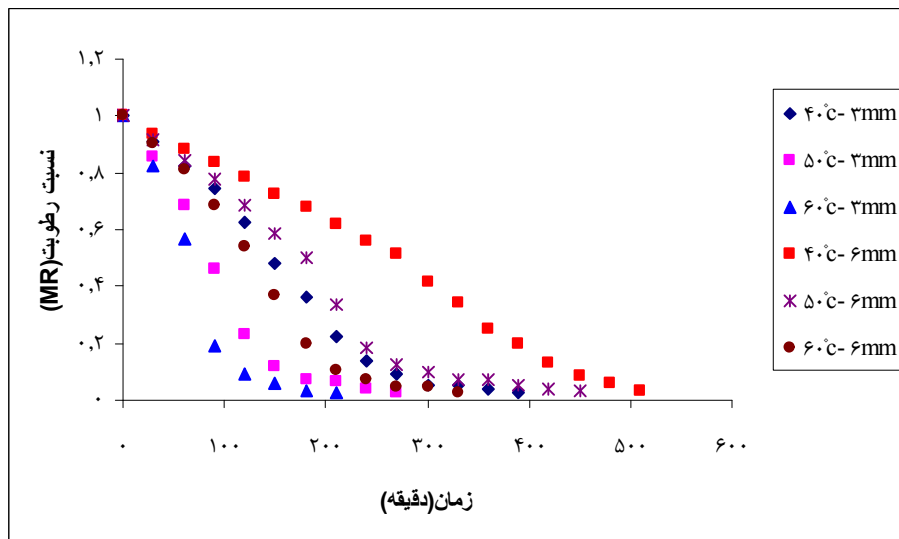
۳ نتایج و بحث :

۳-۱ ویژگی های نمودارهای خشک شدن :

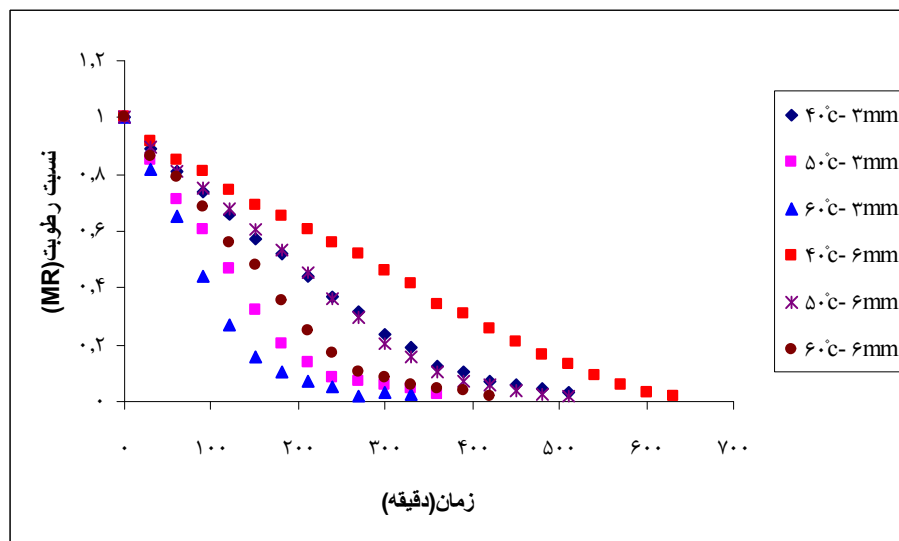
پس از اجرای آزمایش های خشک کردن، داده های حاصل با استفاده از معادله (۱) به نسبت رطوبت (MR) تبدیل شدند. شکل های ۲-۴ تغییرات نسبت رطوبت در طی زمان خشک شدن را برای سه رقم موز در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و ضخامت های ۳ و ۶ میلی متر در سرعت هوای ثابت را نشان می دهند. نمودارها نشان می دهند که فرآیند خشک شدن موز روندی غیر خطی دارد. همانطور که دیده می شود افزایش دمای خشک کن باعث کاهش زمان خشک شدن می شود و فرآیند خشک شدن در مدت زمان کوتاه تری اتفاق می افتد. در اغلب آزمایش ها افزایش دمای خشک کن از ۴۰ °C به ۵۰ °C بیشترین اثر را در کاهش زمان خشک شدن دارد. همچنین نمودارها نشان می دهند که در دماهای بالاتر (۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد) در ۴۰-۳۰٪ ابتدای زمان کل خشک شدن، حدود ۵۰٪ کل محتوای رطوبت تبخیر می شود و در دمای پایین تر (۴۰ °C) این مقدار رطوبت در حدود ۴۵-۴۰٪ زمان کل خشک شدن تبخیر می شود. ۵۰٪ باقیمانده محتوای رطوبت برای تبخیر شدن نیاز به زمان بیشتری دارد. این پدیده به این علت است که در ابتدای فرآیند خشک شدن آب موجود در ساختار مولکولی بافت میوه آب آزاد است و با استفاده از انرژی کمی می توان این آب را خارج ساخت، بنابراین نرخ خشک شدن سریع است، اما با کاهش محتوای رطوبت، نرخ خشک شدن نیز کاهش می یابد زیرا در این مرحله تبخیر آب از لایه منتشره و یا لایه جذبی صورت می گیرد بنابراین عمل تبخیر به کندی انجام می شود.



شکل (۲). نمودار خشک شدن رقم دوارف کاوندیش



شکل(۳). نمودار خشک شدن رقم گراند ناین



شکل(۴). نمودار خشک شدن رقم گروس میشل

۳-۲ برآزش مدل های تجربی با داده های آ مایشی :

پس از آنکه آزمایشات خشک شدن انجام شد، داده های حاصل از آزمایشات با استفاده از محیط curve fitting نرم افزار MATLAB.6 با مدل های ریاضی استاندارد (جدول ۱) برآزش داده شد. نتایج حاصل از نرم افزار مثل ثابت های معادلات و شاخص های آماری R^2 ، $RMSE$ و χ^2 برای برآورد کیفیت برآزش داده های آزمایشی با مدل های استاندارد و انتخاب بهترین معادله برای پیش بینی روند خشک شدن موز مورد استفاده قرار گرفت. جدول های ۲-۷ نتایج حاصل از برآزش داده های آزمایشی با مدل های لایه نازک را نشان می دهند. در تمامی مدل ها مقدار R^2 بزرگتر از ۰/۸۸۳۸۳، و مقادیر χ^2 و $RMSE$ به ترتیب کوچکتر از ۰/۰۶۹۱۷۸ و ۰/۱۷۶۲۵ می باشد. مقادیر R^2 در مدل های پیچ ۱، پیچ اصلاح شده ۲ و مدل وانگ و سینگ ۱ بزرگتر از

۰/۹۷۴۷۱ و مقادیر χ^2 و $RMSE$ به ترتیب کوچکتر از ۰/۰۶۹۱۷۸ و ۰/۰۸۸۲۴۶ می باشد. مقدار R^2 در مدل های پیچ و پیچ اصلاح شده بزرگتر از ۰/۹۸۱۱۳ و مقادیر χ^2 و $RMSE$ به ترتیب کوچکتر از ۰/۰۱۸۲۹ و ۰/۰۴۲۷۷۵ می باشد. بنابراین مدل های پیچ و پیچ اصلاح شده نسبت به سایر مدل ها با دقت بیشتری تغییرات رطوبت را در ورقه های نازک موز شبیه سازی می کند. جدول (۲) نتایج آماری حاصل از معادلات خشک شدن لایه نازک برای رقم دوارف کاوندیش، سرعت هوای ۱ m/s و ضخامت ۳ میلی-متر

مدل	۴۰°			۵۰°			۶۰°		
	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2
پیچ	۰/۹۹۵۲	۰/۰۲۳۵۸۹	۰/۰۰۰۵۵۷	۰/۹۹۲۵	۰/۰۳۲۴۸۵	۰/۰۰۱۰۵۵	۰/۹۹۵۹۴	۰/۰۲۷۴۵	۰/۰۰۰۸۶
لگاریتمی	۰/۹۴۵۷۸	۰/۰۷۹۳۱۵	۰/۰۰۰۷۱۹	۰/۹۳۱۰۸	۰/۰۹۸۴۹۳	۰/۰۱۲۱۲۶	۰/۹۲۱۸۲	۰/۱۲۰۳۸	۰/۰۱۵۵۲۷
پیچ اصلاح شده	۰/۹۹۵۲	۰/۰۲۳۵۸۹	۰/۰۰۰۵۵۶	۰/۹۹۲۵	۰/۰۳۲۴۸۵	۰/۰۰۱۰۵۵	۰/۹۹۵۹۴	۰/۰۲۷۴۵	۰/۰۰۰۸۶
دو جمله ای	۰/۹۴۵۷۸	۰/۰۹۱۵۸۵	۰/۰۰۸۴۴۱	۰/۹۳۱۰۷	۰/۱۲۷۱۶	۰/۰۱۶۱۷۱	۰/۹۲۱۸۲	۰/۱۷۰۲۵	۰/۰۲۰۷۰۸
وانگ و سینگ	۰/۹۹۳۳۳	۰/۰۲۹۷۳۶	۰/۰۰۰۸۸۴	۰/۹۹۳۵۲	۰/۰۳۳۷۵۷	۰/۰۰۱۱۴	۰/۹۷۷۵۵	۰/۰۷۴۴۸۸	۰/۰۲۱۱۵۷
ورما و همکاران	۰/۹۶۵۹۵	۰/۰۶۷۱۹	۰/۰۰۴۲۵۱	۰/۹۶۱۷۳	۰/۰۸۲۰۵۸	۰/۰۰۶۷۳۴	۰/۹۷۲۸۸	۰/۰۸۱۸۶۷	۰/۰۰۵۱۳۵
تقریب پخش	۰/۹۲۹۸۳	۰/۰۹۶۴۵۳	۰/۰۰۹۳۰۳	۰/۹۱۷۷۵	۰/۱۲۰۳	۰/۰۱۴۴۷۱	۰/۹۰۸۶۳	۰/۱۵۰۲۸	۰/۰۱۸۳۸۳
هندرسون و پاییس	۰/۹۴۵۷۸	۰/۰۹۱۵۸۵	۰/۰۰۱۲۵۸۲	۰/۹۳۱۰۸	۰/۱۲۷۱۵	۰/۰۴۸۵۰۵	۰/۹۲۱۸۲	۰/۱۷۰۲۵	۰/۰۶۲۱۰۸
دو جمله ای نمایی	۰/۹۲۹۸۱	۰/۰۹۰۲۴	۰/۰۰۸۱۴۳	۰/۹۱۷۶۸	۰/۱۰۷۶۴	۰/۰۱۱۵۸۷	۰/۹۰۸۵۸	۰/۱۳۰۱۹	۰/۰۱۴۷۲

جدول (۳) نتایج آماری حاصل از معادلات خشک شدن لایه نازک برای رقم دوارف کاوندیش، سرعت هوای ۱ m/s و ضخامت ۶ mm

مدل	۴۰°			۵۰°			۶۰°		
	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2
پیچ	۰/۹۸۴۰۱	۰/۰۳۸۹۹۶	۰/۰۰۱۵۲۱	۰/۹۸۹۶۶	۰/۰۳۳۲۹۳	۰/۰۰۱۱۰۹	۰/۹۹۲۷۱	۰/۰۳۱۱۹۷	۰/۰۰۰۹۷۳
لگاریتمی	۰/۹۱۸۰۱	۰/۰۸۸۳۱۴	۰/۰۰۸۳۹۹	۰/۹۲۴۴۵	۰/۰۸۹۹۸۲	۰/۰۰۸۹۹۶	۰/۹۱۲۸۱	۰/۱۰۷۸۶	۰/۰۱۱۶۳۴
پیچ اصلاح شده	۰/۹۸۴۰۱	۰/۰۳۸۹۹۶	۰/۰۰۱۵۲۱	۰/۹۸۹۶۶	۰/۰۳۳۲۹۳	۰/۰۰۱۱۰۸	۰/۹۹۲۷۱	۰/۰۳۱۱۹۷	۰/۰۰۰۸۳۴
دو جمله ای	۰/۹۰۸۰۱	۰/۰۹۱۶۴۸	۰/۰۰۹۰۹۹	۰/۹۲۴۴۵	۰/۰۹۴۸۴۹	۰/۰۱۰۱۲۱	۰/۹۱۲۸۱	۰/۱۱۸۱۵	۰/۰۱۷۴۵۱
وانگ و سینگ	۰/۹۹۷۷۵	۰/۰۱۵۱۶۵	۰/۰۰۰۲۳	۰/۹۹۴۸۲	۰/۰۲۴۸۳۳	۰/۰۰۰۶۱۷	۰/۹۹۲۰۴	۰/۰۳۵۷۰۷	۰/۰۰۱۲۷۵
ورما و همکاران	۰/۹۳۰۶۱	۰/۰۸۴۳۰۷	۰/۰۰۷۱۰۸	۰/۹۴۳۶۷	۰/۰۸۲۶۲۶	۰/۰۰۰۶۸۲۷	۰/۹۴۷۰۶	۰/۰۹۲۰۶۶	۰/۰۰۸۴۷۶
تقریب پخش	۰/۸۹۶۰۵	۰/۱۰۳۱۹	۰/۰۱۰۶۴۹	۰/۹۰۳۸۴	۰/۱۰۷۰۱	۰/۰۱۱۴۵	۰/۸۹۲۵۶	۰/۱۳۱۱۶	۰/۰۱۷۲۰۴
هندرسون و پاییس	۰/۹۱۸۰۱	۰/۰۹۵۳۹	۰/۰۰۱۰۹۱۹	۰/۹۲۴۴۵	۰/۱۰۰۶	۰/۰۱۳۴۹۵	۰/۹۱۲۸۱	۰/۱۳۲۱	۰/۰۳۴۹۰۱
دو جمله ای نمایی	۰/۸۹۶۰۲	۰/۰۹۹۴۵۱	۰/۰۰۹۸۹۱	۰/۹۰۳۸۲	۰/۱۰۱۵۳	۰/۰۱۰۳۰۸	۰/۸۹۲۴۸	۰/۱۱۹۷۸	۰/۰۳۳۲۷۴

جدول (۴) نتایج آماری حاصل از معادلات خشک شدن لایه نازک برای رقم گراند ناین، سرعت هوای ۱ m/s و ضخامت ۳ میلی متر

مدل	۳۴°			۳۵°			۳۶°		
	R ²	RMSE	χ ²	R ²	RMSE	χ ²	R ²	RMSE	χ ²
پیچ	۰/۹۹۳۳	۰/۰۲۸۵۴۴	۰/۰۰۰۸۱۵	۰/۹۹۶۴۸	۰/۰۲۳۹۶۳	۰/۰۰۰۵۷۴	۰/۹۹۲۹	۰/۰۳۸۱۶۶	۰/۰۰۱۴۹۳
لگاریتمی	۰/۹۲۷۷۲	۰/۰۹۴۰۹۶	۰/۰۱۰۱۱۹	۰/۹۳۷۴	۰/۱۰۱۱۲	۰/۰۱۳۷۸	۰/۹۱۰۴۴	۰/۱۳۵۵۹	۰/۰۱۵۶۱۲
پیچ اصلاح شده	۰/۹۹۳۳	۰/۰۲۸۵۴۴	۰/۰۰۰۸۱۵	۰/۹۹۶۴۸	۰/۰۲۳۹۶۳	۰/۰۰۰۵۷۴	۰/۹۹۲۹	۰/۰۳۸۱۶۶	۰/۰۰۱۴۹
دو جمله ای	۰/۹۲۷۷۲	۰/۱۰۰۵۹	۰/۰۱۱۸۰۵	۰/۹۳۷۴	۰/۱۳۰۵۴	۰/۰۱۷۰۴۱	۰/۹۱۰۴۴	۰/۱۶۶۰۷	۰/۰۲۰۸۱۶
وانگ و سینگ	۰/۹۹۱۸۳	۰/۰۳۳۷۱۲	۰/۰۰۱۱۳۷	۰/۹۸۳۵۱	۰/۰۵۸۰۲۶	۰/۰۰۳۳۶۷	۰/۹۷۴۷۱	۰/۰۸۸۲۴۶	۰/۰۶۹۱۷۸
ورما و همکاران	۰/۹۵۱۱	۰/۰۸۲۴۵۸	۰/۰۰۶۷۹۹	۰/۹۷۴۶۴	۰/۰۷۱۹۵۵	۰/۰۰۵۱۷۷	۰/۹۷۲۵	۰/۰۹۳۰۲۱	۰/۰۰۴۲۸۱
تقریب پخش	۰/۹۰۷۸	۰/۱۱۳۳۳	۰/۰۱۲۸۲	۰/۹۸۰۳۳	۰/۰۶۳۳۶۷	۰/۰۰۴۰۱۵	۰/۸۹۹۱۲	۰/۱۷۶۲۵	۰/۰۱۸۰۲۸
هندرسون و پاییس	۰/۹۲۷۷۲	۰/۱۰۸۶۵	۰/۰۱۷۷۰۸	۰/۹۳۷۴	۰/۱۳۰۵۴	۰/۰۵۱۱۲۲	۰/۹۳۶۱۲	۰/۱۴۲۷	۰/۰۶۱۰۹۳
دوجمله ای نمایی	۰/۹۰۷۷۷	۰/۱۰۵۹۳	۰/۰۱۱۲۲۱	۰/۹۲۴۴۱	۰/۱۱۱۱۲	۰/۰۱۳۳۴۷	۰/۸۹۹۰۳	۰/۱۴۳۹۷	۰/۰۱۴۴۴۱

جدول (۵) نتایج آماری حاصل از معادلات خشک شدن لایه نازک برای رقم گراند ناین، سرعت هوای ۱ m/s و ضخامت ۶ میلی متر

مدل	۳۴°			۳۵°			۳۶°		
	R ²	RMSE	χ ²	R ²	RMSE	χ ²	R ²	RMSE	χ ²
پیچ	۰/۹۸۱۱۳	۰/۰۴۱۹۷۲	۰/۰۰۱۷۶۲	۰/۹۸۴۵۴	۰/۰۴۲۷۵۵	۰/۰۰۱۸۲۹	۰/۹۸۸۰۵	۰/۰۳۹۰۳۴	۰/۰۰۱۰۶۱
لگاریتمی	۰/۹۲۴۲	۰/۰۸۴۱۲۴	۰/۰۰۷۶۲۱	۰/۹۰۹۱	۰/۱۰۳۶۸	۰/۰۱۲۰۹۳	۰/۹۰۴۲۷	۰/۱۱۰۴۸	۰/۰۱۳۵۰۸
پیچ اصلاح شده	۰/۹۸۱۱۳	۰/۰۴۱۹۷۲	۰/۰۰۱۷۶۲	۰/۹۸۴۵۴	۰/۰۴۲۷۷۵	۰/۰۰۱۸۲۸	۰/۹۸۸۰۵	۰/۰۳۹۰۳۴	۰/۰۰۱۰۵۳
دو جمله ای	۰/۹۲۴۲	۰/۰۸۷۳	۰/۰۰۸۲۵۶	۰/۹۰۹۱	۰/۱۰۹۹۷	۰/۰۱۳۸۲	۰/۹۰۴۲۷	۰/۱۲۱۰۲	۰/۰۱۶۸۷۹
وانگ و سینگ	۰/۹۹۷۶۶	۰/۰۱۵۳۲۶	۰/۰۰۰۲۳۵	۰/۹۸۷۲۶	۰/۰۴۱۱۶۹	۰/۰۰۱۶۹۵	۰/۹۹۲۹۸	۰/۰۳۲۷۶۶	۰/۰۰۰۸۹۴
ورما و همکاران	۰/۹۳۴۵۵	۰/۰۸۱۱۱۷	۰/۰۱۰۵۱۱	۰/۹۳۰۸۶	۰/۰۹۵۹۷۴	۰/۰۰۹۴۰۷	۰/۹۳۶۹۸	۰/۰۹۸۱۹۳	۰/۰۰۸۴۲۶
تقریب پخش	۰/۹۰۶۴۵	۰/۰۹۶۹۸۲	۰/۰۰۶۴۰۶	۰/۸۸۷۹	۰/۱۲۲۱۲	۰/۰۱۴۹۱۳	۰/۸۸۳۸۶	۰/۱۳۳۳	۰/۰۱۶۶۲۲
هندرسون و پاییس	۰/۹۲۴۲	۰/۰۹۲۸۶۵	۰/۰۰۹۹۰۸	۰/۹۰۹۱	۰/۱۱۷۵۶	۰/۰۱۹۳۴۹	۰/۹۰۴۲۷	۰/۱۳۵۳	۰/۰۳۳۷۶۹
دوجمله ای نمایی	۰/۹۰۶۳۸	۰/۰۹۳۴۸۸	۰/۰۰۸۴۷	۰/۸۸۷۸۷	۰/۱۱۵۱۵	۰/۰۱۳۲۵۹	۰/۸۸۳۸۳	۰/۱۲۱۷	۰/۰۱۳۸۵۴

جدول (۶) نتایج آماری حاصل از معادلات خشک شدن لایه نازک برای رقم گروس میشل، سرعت هوای ۱ m/s و ضخامت ۳ میلی-متر

مدل	۴۰°			۵۰°			۶۰°				
	R ²	RMSE	χ ²	R ²	RMSE	χ ²	R ²	RMSE	χ ²		
پیچ	۰/۹۹۲۴۷	۰/۰۲۶۳۲۹	۰/۰۰۰۶۹۴	۰/۹۹۳۴۴	۰/۰۲۸۲۲۴	۰/۰۰۰۷۹۷	۰/۹۹۷۵۹	۰/۰۱۸۳۷۹	۰/۰۰۰۳۳۸		
لگاریتمی	۰/۹۷۴۵۳	۰/۰۴۸۴۰۸	۰/۰۰۲۵۵۶	۰/۹۶۴۹۶	۰/۰۶۵۲۰۷	۰/۰۰۴۹۶۱	۰/۹۶۹۵	۰/۰۶۵۴۲۷	۰/۰۰۵۳۵۱		
پیچ اصلاح شده	۰/۹۹۲۴۷	۰/۰۲۶۳۲۹	۰/۰۰۰۶۹۳	۰/۹۹۳۴۴	۰/۰۲۸۲۲۴	۰/۰۰۰۷۹۷	۰/۹۹۷۵۹	۰/۰۱۸۳۷۹	۰/۰۰۰۳۳۸		
دو جمله	ای	۰/۹۷۴۵۳	۰/۰۵۰۵۶	۰/۰۰۲۸۱۲	۰/۹۶۴۹۶	۰/۰۷۷۱۵۵	۰/۰۰۵۹۵۳	۰/۹۶۹۵	۰/۰۸۴۴۶۶	۰/۰۰۷۱۳۴	
وانگ و	سینگ	۰/۹۹۹۱۵	۰/۰۰۹۳۳۲	-۰۵۸۸۵۲	۰/۹۹۵۸۲	۰/۰۲۴۳۲۵	۰/۰۰۰۵۹۲	۰/۹۹۴۶۳	۰/۰۳۰۶۹۳	۰/۰۰۰۹۴۲	
ورما و	همکاران	۰/۹۷۹	۰/۰۴۵۹۱۶	۰/۰۰۲۱۰۸	۰/۹۷۷۲	۰/۰۵۶۸۱۲	۰/۰۰۳۳۲۸	۰/۹۸۷۶۲	۰/۴۶۶۰۶	۰/۰۰۲۱۷۲	
تقریب	پخش	۰/۹۶۹۰۹	۰/۰۵۵۷	۰/۰۰۳۱۰۳	۰/۹۵۷۸۴	۰/۰۷۷۲۶۳	۰/۰۰۵۹۷	۰/۹۶۳۱۸	۰/۰۸۰۳۶۷	۰/۰۰۶۴۵۹	
هندرسون	و پاییس	اصلاح شده	۰/۹۷۴۵۳	۰/۰۵۳۰۲۸	۰/۰۰۳۵۱۵	۰/۹۶۴۹۶	۰/۰۷۷۱۵۴	۰/۰۱۱۹۶	۰/۹۶۹۵	۰/۰۸۴۴۶۶	۰/۰۲۱۴۰۴
دوجمله	ای نمایی	۰/۹۶۹۰۴	۰/۰۵۳۳۷۵	۰/۰۰۲۸۴۹	۰/۹۵۷۷۶	۰/۰۷۱۵۹۶	۰/۰۰۵۱۲۶	۰/۹۶۳۰۹	۰/۰۷۱۹۶۸	۰/۰۰۵۱۷۹	

جدول (۷) نتایج آماری حاصل از معادلات خشک شدن لایه نازک برای رقم گروس میشل، سرعت هوای ۱ m/s و ضخامت ۶ میلی-متر

مدل	۴۰°			۵۰°			۶۰°				
	R ²	RMSE	χ ²	R ²	RMSE	χ ²	R ²	RMSE	χ ²		
پیچ	۰/۹۸۵۲۸	۰/۰۳۴۹۲۶	۰/۰۰۱۲۲	۰/۹۸۷۹۶	۰/۰۳۳۵۲۶	۰/۰۰۱۱۲۴	۰/۹۹۱۷۷	۰/۰۳۰۵۰۴	۰/۰۰۰۹۳۱		
لگاریتمی	۰/۹۶۳۳۷	۰/۰۵۵۰۹۹	۰/۰۰۳۳۲۶	۰/۹۵۸۶۳	۰/۰۶۲۱۳۸	۰/۰۰۴۲۴۷	۰/۹۵۹۷۳	۰/۰۶۷۴۸۹	۰/۰۰۵۱۲۴		
پیچ اصلاح شده	۰/۹۸۵۲۸	۰/۰۳۴۹۲۶	۰/۰۰۱۲۲	۰/۹۸۷۹۶	۰/۰۳۳۵۲۶	۰/۰۰۱۱۲۴	۰/۹۹۱۷۷	۰/۰۳۰۵۰۴	۰/۰۰۰۹۳		
دو جمله	ای	۰/۹۶۳۳۷	۰/۰۵۸۶۵۸	۰/۰۰۳۴۴۱	۰/۹۵۸۶۳	۰/۰۶۸۶۹۸	۰/۰۰۴۷۱۹	۰/۹۵۹۷۳	۰/۰۷۶۵۲۵	۰/۰۰۵۸۵۶	
وانگ و	سینگ	۰/۹۹۸۵۵	۰/۰۱۱۲۹۴	۰/۰۰۰۱۲۸	۰/۹۹۸۱۵	۰/۰۱۳۷۷۱	۰/۰۰۰۱۹	۰/۹۹۵۰۷	۰/۰۲۵۰۵۳	۰/۰۰۰۶۲۸	
ورما و	همکاران	۰/۹۶۶۴۱	۰/۰۵۴۳۹۲	۰/۰۰۲۹۵۸	۰/۹۶۵۳۶	۰/۰۵۹۶۳۱	۰/۰۰۳۵۵۶	۰/۹۷۰۱۹	۰/۰۶۱۵۹۲	۰/۰۰۳۷۹۴	
تقریب	پخش	۰/۹۵۷۴۹	۰/۶۱۱۸۵	۰/۰۰۳۷۴۴	۰/۹۵۰۶۱	۰/۰۷۱۲۰۶	۰/۰۰۵۰۷	۰/۹۵۱۱۷	۰/۰۷۸۸۳۲	۰/۰۰۶۲۱۴	
هندرسون	و پاییس	اصلاح شده	۰/۹۶۳۳۷	۰/۰۵۸۶۵۸	۰/۰۰۳۹۷	۰/۹۵۸۶۳	۰/۰۶۸۶۹۶	۰/۰۰۶۰۶۷	۰/۹۵۹۷۳	۰/۰۷۶۵۲۵	۰/۰۰۸۱۹۹
دوجمله	ای نمایی	۰/۹۵۷۴۳	۰/۵۹۴	۰/۰۰۳۵۲۸	۰/۹۵۰۵۴	۰/۰۶۷۹۳۸	۰/۰۰۴۶۱۶	۰/۹۵۱۱	۰/۰۷۴۳۷۵	۰/۰۰۵۵۳۲	

منابع:

- ۱- ان پاتر، ن، ۱۳۷۰، علم مواد غذایی، مسعود فلاحی، کشت و صنعت چین چین، جلد ۱، ص ۲۸۸.
- ۲- بی نام. (۱۳۸۴). آمارنامه کشاورزی. وزارت جهاد کشاورزی.
- ۳- فرجی، ر، ۱۳۷۱، اصول نگهداری مواد غذایی، نویسنده، ص ۲۸۰.
- ۴- ملکی، م، دخانی، ش، صنایع غذایی، ۱۳۷۰، نگهداری غذا با استفاده از حرارت، خشک کردن و یخ زدن، دانشگاه، مرکز نشر دانشگاه، جلد اول، ص ۴۱۹.
- ۵- هلدمان، د، سینک، پ، ۱۳۶۸، مهندسی صنایع غذایی، ترجمه جهاد دانشگاهی دانشکده فنی دانشگاه تهران شاخه مهندسی شیمی، تهران، جهاد دانشگاهی دانشکده فنی دانشگاه تهران، ص ۴۵۰.
- 6- Aghbashlo, M., M.H. Kianmehr, & H. Samimi Akhijahani. 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Journal of Energy Conversion and Management*, article in press.
- 7- Demirel, D & M. Turhan. 2003. Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices. *Journal of Food Engineering*, V(59): 1–11.
- 8- Goyal, R.K., A.R.P. Kingsly, M.R. Manikantan, & S.M. Ilyas. 2007. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, V(79): 176–180.
- 9- Pabis, S., S. Jayas and S. Sankviski. 1998. *Grain drying: theory and Practice*.
- 10- Prachayawarakorn, S., W. Tia, N. Plyto, & S. Soponronnarit. (2008). Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *Journal of Food Engineering*, 85, pp 509–517.
- 11- Sacilik, K., A. Konuralp Elicin, & G. Unal. 2006. Drying kinetics of Üryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, V(76): 362–368.
- 12- Simal, S., A. Femenia, M.C. Garau, & C. Rossello. (2005). Use of Exponential, Page's and Diffusional Models to Simulate the Drying Kinetics of Kiwi Fruit. *Journal of Food Engineering*, 66, pp 323–328.
- 13- Türk Togrul, I & D. Pehlivan. 2004. Modeling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, V(65): 413–425.
- 14- Wang, Z., J. Sun, X. Liao, F. Chen, G. Zhao, J. Wu, & X. Hu. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, V(40): 39–46.