

بررسی مدل خشک کردن ورقه های نازک کیوی (رقم هایوارد) در خشک کن لایه نازک (۴۸۵)

علی محمدی^۱، شاهین رفیعی^۲، علیرضا کیهانی^۳، زهرا امام جمعه^۴

چکیده

در این تحقیق، رفتار خشک شدن ورقه های نازک کیوی در خشک کن لایه نازک آزمایشگاهی بر اساس مدل های ریاضی خشک شدن مورد استفاده در منابع مورد بررسی قرار گرفت. آیش ها در پنج سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد و ضخامت ۶ میلی متر و سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه با سه تکرار انجام گرفت. ۱۰ مدل ریاضی خشک شدن بر داده های آزمایشگاهی برازش داده شد. ثابت ها و ضرایب مدل ها با هم مقایسه شدند. اثرات دمایی هوای خشک کن به روش رگرسیون غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفت. تمام مدل های ریاضی خشک شدن بر اساس سه شاخص آماری مربع کای (χ^2)، ریشه متوسط مربع خطای داده ها ($RMSE$) و بازده مدل (EF)، با هم مقایسه شدند. طبق نتایج به دست آمده مدل میدیلی و همکاران منحنی سینتییک خشک شدن ورقه نازک کیوی را با شاخص آماری EF ، χ^2 و $RMSE$ به ترتیب برابر ۰/۹۹۸۸۱۴، ۰/۰۰۰۱۰۱ و ۰/۰۰۹۹۱۷ نسبت به مدل های دیگر بهتر برآورد کرد.

کلیدواژه: مدلسازی، کیوی، رگرسیون غیرخطی، لایه ی نازک

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده مهندسی بیوسیستم دانشگاه تهران

پست الکترونیک: Mohammadi_017@yahoo.com

۲- دانشیار گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشکده مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تهران

۳- دانشیار گروه مهندسی صنایع غذایی، دانشکده مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تهران

مقدمه

درصد بالایی از محتویات میوه ها و وزن تازه آن ها، آب است. بنابراین آنها در مقایسه با بقیه محصولات گیاهی مانند دانه ها، فعالیت بالای متابولیکی را نمایش می دهند. این فعالیت متابولیکی بعد از برداشت، ادامه می یابد، بنابراین باعث می شود بسیاری از میوه ها به کالاهای سریع فاسد شونده تبدیل شوند. یکی از نمونه راه های بهبود بخشیدن به دوام در میوه ها، کاهش میزان رطوبت در آنها می باشد به طوری که میکروارگانیسم ها نتوانند رشد کنند. خشک کردن یکی از راه های مدرن نگهداری از محصولها می باشد. یکی از اساسی ترین اهداف خشک کردن محصولات کشاورزی، جا به جا کردن آب در جامدات به طرف بالا تا یک سطح (تراز) خاص می باشد، که ضایعات میکروبی و زوال فعل و انفعالات شیم یی، به طور اساسی کمترین باشد [۴]. 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، ضخامت لایه نازک به عوامل مهمی از جمله سرعت هوا، درجه حرارت و رطوبت نسبی هوای مورد استفاده در فرایند خشک کردن بستگی دارد [۵].

از جمله گیاهانی که در قرن حاضر توسط گاه شناسان کشف و معرفی شده است، گیاه کیوی (*Actinidia deliciosa*) می باشد. مبدا اصلی کیوی جنگل های مناطق معتدل اطراف رودخانه یانگ تسه در جنوب چین است و در سال ۱۳۴۷ این گیاه وارد ایران شده است [۱]. سطح زیر کشت کیوی در ایران سالانه بالغ بر ۳۵۰۰ هکتار و میزان تولید نزدیک به ۸۶۸۰۰ تن بوده است [۲]. ایران از نظر تولید و صادرات کیوی، در میان کشورهای تولید کننده، مقام پنجم را به خود اختصاص داده است. طبق آمار رسمی سازمان خوار و بار جهانی (FAO, 2005) ایران در سال ۲۰۰۵، بیش از ۴۸۰۰۰ تن محصول کیوی را به کشور های مختلف صادر کرده است [۶].

محققین زیادی در زمینه خشک کردن لایه نازک محصولات کشاورزی کار کرده اند، رفیعی و مقصدلو (۱۳۸۴) شبیه ازی مدل سینتیکی خشک کردن لایه نازک دانه گندم رقم تجن را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق از روش اجزاء محدود برای حل عددی معادله انتقال جرم در طی فرایند خشک شدن استفاده شد و با فرض این که در داخل مرز دانه پخش رطوبت به صورت مایع و در مرز به صورت بخار می باشد، خشک شدن دانه به دو شکل کره و بیضی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی صحت داده های مدل شبیه سازی شده، توده بستر نازک گندم با پنج سطح دمایی ۳۵، ۴۵، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس خشک شد. نتیجه این تحقیق حاکی از این بود که مدل بیضوی نسبت به مدل کروی، داده های آزمایشگاهی را بهتر شبیه سازی می نماید [۳]. ساسیلیک و الیسین (۲۰۰۶) ورقه های نازک سیب را با ضخامت های ۵ و ۹ میلی متر در دماهای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه خشک کردند. محصول ۲۴۰ تا ۴۶۰ دقیقه تحت شرایط خشک شدن قرار داشت. با توجه به آ ایش های انجام شده رگرسیون غیر خطی، مدل لگاریتمی نسبت به سایر مدل ها برازش بهتری نشان داد [۷]. دویماز (۲۰۰۴) لایه های نازک هویج به ضخامت ۰/۵ سانتی متر را در چهار دمای ۶۵، ۶۰، ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد با سرعت هوای ۰/۵ تا ۱ m/s به وسیله خشک کن آزمایشگاهی خشک کرد. مدل پیچ نسبت به مدل هندرسون و پاییس نتیجه بهتری نشان داد [۸]. ارتکین و بالدیز در سال ۲۰۰۴ به بررسی انتخاب بهترین مدل برای خشک کردن ورقه های نازک بادنجان پرداختند. آزمایشات در رنج دمایی بین ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس و برای سرعت های بین ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه انجام گرفتند. این تحقیق نشان داد که زیاد کردن دما و سرعت، زمان خشک شدن را به طور جدی کاهش می دهد و نیز با افزایش دما و سرعت، رنگ بادنجان کمرنگ تر می شود اما ضخامت تاثیر زیادی بر مشخصات رنگ، نمی گذارد. در این تحقیق مشاهده شد که بهترین مدل با خطای کمتر، مدل میدیلی و همکاران می باشد [۹]. به هر حال، در مورد مدل خشک کردن ورقه کیوی مطالعات کمی صورت گرفته است، سیمال و همکاران (۲۰۰۵)، سه مدل پیچ، نمایی و ضریب پخش را برای مدل خشک کردن ورقه کیوی ارزیابی کردند [۱۰]. مسکن (۲۰۰۱) تغییر رنگ کیوی را هنگام خشک کردن در دو حالت هوای داغ و میکروبیو بررسی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که خشک کردن در هوای داغ تاثیر کمتری روی تغییر رنگ کیوی دارد [۱۱].

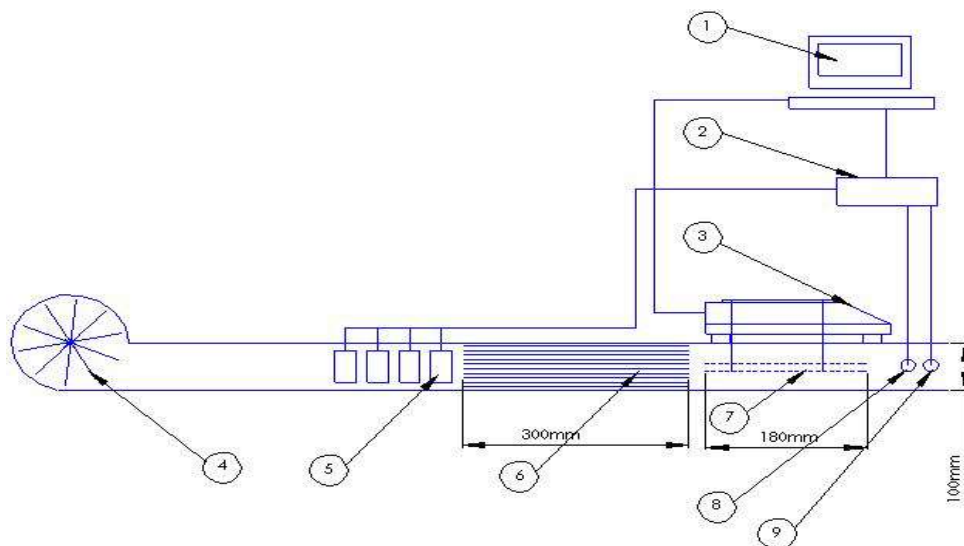
هدف از انجام این تحقیق، ارائه مناسب ترین مدل برای خشک شدن ورقه های نازک کیوی بود. مدل مذکور بر اساس متغیر وابسته (رطوبت توده) و دو متغیر مستقل (زمان و دمای خشک شدن) بر داده های آزمایشگاهی برازش داده شد.

مواد و روش ها

برای انجام این تحقیق از میوه کیوی رقم هایوارد که از بازار میوه و ترهبار کرج تهیه شد، استفاده کردیم. آمایشها در پنج سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی ۱/۵ متر بر ثانیه و ضخامت ۶ میلی متر برای ورقه های نازک کیوی در سه تکرار انجام شد. برای تهیه ورقه های نازک کیوی با ضخامت مورد نظر از دستگاه ورقه بر (کالباس بر) استفاده گردید. ۱۵۰ گرم ورقه نازک کیوی بر روی دو سینی توری آلومینیمی مربعی به طول ۲۵ سانتی متر به گونه ای ریخته شد که روی هر سینی یک لایه از محصول قرار گرفته بود. در طی خشک شدن، وزن ورقه ها به وسیله ترازوی دیجیتالی متصل به رایانه و رطوبت و دمای هوای خشک کن هر ۵ ثانیه اندازه گیری و ثبت می شد. خشک شدن تا زمان ثابت شدن تقریبی وزن ورقه های نازک کیوی ادامه داشت. سپس نمونه ها در داخل آون با دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد [۱] و پس از خشک شدن کامل، وزن خشک نمونه ها به دست آمد. در نهایت رطوبت ورقه ها طی خشک شدن به وسیله معادله (۱) محاسبه شد.

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (1)$$

که M_d رطوبت ورقه های کیوی بر پایه خشک (d.b.)، W_w وزن کیوی در طی خشک شدن، W_d وزن کیوی خشک می باشد. برای انجام آزمایشها، از یک خشک کن لایه نازک آزمایشگاهی (شکل ۱) که در گروه مهندسی مکانیک - مین های کشاورزی، دانشگاه تهران ساخته شد بود، استفاده شد [۱۲]. این خشک کن از یک فن سانتریفوژ برای ایجاد جریان هوا و چهار گرم کن برقی ۵۰۰ وات جمعاً به قدرت ۲۰۰۰ وات برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه خشک کن و دو حسگر دما (LM35) و رطوبت (خاننی، ساخت فیلیپین) برای اندازه گیری دما و رطوبت نسبی هوای خشک کننده تشکیل شده است ترازوی مورد استفاده در دستگاه خشک کن مدل GF3000 ساخت شرکت A&D ژاپن می باشد. این ترازو دارای دقت ۰/۰۱ گرم و حداکثر وزن قابل اندازه گیری ۳۱۰۰ گرم می باشد. برای اجرای فرایند کنترل و پایش خشک کن، میکرو کنترلر AVR مدل ATMEGA 32 مورد استفاده قرار گرفت که توسط نرم افزار سی پلاس برنامه آن نوشته شد.



- ۱- رایانه ۲- میکروکنترلر ۳- ترازوی دیجیتال ۴- فن سانتریفوژ ۵- گرم کن ها
۶- محفظه مستقیم کننده ۷- سینی نمونه ها ۸- حسگر دمای هوای خشک کن ۹- حسگر رطوبت هوای ورودی

شکل ۱- طرحواره خشک کن آزمایشگاهی (یداللهی نیا، ۱۳۸۵)

برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا از یک سرعت‌سنج نوع سیم داغ مدل TESTO 405-V1 (ساخت آلمان) با حساسیت 0.1 m/s استفاده شد. نحوه اندازه‌گیری بدین صورت بود که پایه حسگر (سیم داغ) در نقاط مختلف کانال ورودی هوا قرار داده شده و سرعت‌ها قرائت گردید و سرعت متوسط منظور شد. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار کلیه آزمایش‌ها ۳۰ دقیقه بعد از روشن کردن سیستم شروع می‌شد. سپس سینی حاوی نمونه‌ها در محفظه خشک‌کن قرار داده می‌شد. نحوه خشک کردن بدین صورت است که هوای جریان یافته در کانال به وسیله دمنده از گرم‌کن گذشته و پس از گرم شدن به وسیله کانال به سمت توده کیوی هدایت می‌شود. جریان هوا هنگام گذر از توده، رطوبت کیوی را جذب و باعث گرم شدن آن می‌شود. بدین ترتیب افزایش دما باعث تسریع در خروج آب از بافت نمونه و در نتیجه خشک شدن محصول می‌گردد.

مدلسازی ریاضی منحنی خشک شدن

برای مدلسازی ریاضی سینتیک خشک شدن توده بستر نازک کیوی از نسبت رطوبت در طی خشک شدن توده استفاده می‌شود. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک شدن به وسیله رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

که MR نسبت رطوبت، M_d رطوبت توده در لحظه جاری بر پایه خشک، M_e رطوبت تعادلی و M_0 رطوبت اولیه توده محصول. طرف چپ معادله نسبت رطوبت را که مشخص کننده فرآیند خشک کردن است نشان می‌دهد. براساس تحقیقات انجام شده، در محصولاتی که دارای رطوبت زیاد هستند معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن به جای معادله (۲) به صورت معادله (۳) ساده می‌گردد.

$$MR = \frac{M_d}{M_0} \quad (3)$$

در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست. نسبت رطوبت به دست آمده در طی آزمایش با ۱۰ مدل از مدل‌های استاندارد خشک شدن لایه نازک محصولات کشاورزی که در جدول (۱) آمده است مقایسه گردید. مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک شدن براساس متغیر مستقل زمان به وسیله نرم‌افزار SPSS13 استخراج شد. از سه معیار ضریب تبیین (R^2)، مربع کای (χ^2)^۱ و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE)^۲ برای سنجش بهترین مدل استفاده شد که برای هر مدل هرچه مقدار R^2 بیشتر و χ^2 و RMSE کمتر باشد مدل بهتر ارزیابی می‌شود [۱۳]:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{exp,i} - M_{pre,i})^2}{N - n} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_{pre,i} - M_{exp,i}) \right]^{1/2} \quad (5)$$

که $M_{exp,i}$ رطوبت کیوی مشاهده شده در i امین اندازه‌گیری، $M_{pre,i}$ رطوبت کیوی پیش‌بینی شده از مدل در i امین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و n تعداد ثابت‌های به کار رفته در معادله است. برای هر یک از دماهای خشک‌کن معادلات جدول (۱) استخراج شده و متوسط شاخص‌های دقت برازش در دماهای مختلف برای هر مدل به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شده و سه مدل برتر انتخاب و برای مدل‌های برتر ضرایب و ثابت‌ها برای دماهای مختلف به دست آمد و نمودار منحنی خشک شدن ورقه کیوی نیز رسم شد.

¹ - Chi-Square

² - Root Mean Square Error

جدول ۱- مدل های رگرسیون خشک شدن توده بستر نازک مورد استفاده در مدل سازی

ردیف	نام مدل	مدل*	مرجع
۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	[۱۴]
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	[۱۳]
۳	هندرسون و پاییس	$MR = a \exp(-kt)$	[۱۵]
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	[۱۶]
۵	دو جمله ای	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	[۱۷]
۶	دو جمله ای نمایی	$MR = a \exp(-kt) + \exp(-mt)$	[۱۸]
۷	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	[۱۹]
۸	تقریب پخش	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	[۱۶]
۹	هندرسون و «پاییس اصلاح شده»	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	[۲۰]
۱۰	میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[۱۶]

*M: رطوبت (d.b.)، t: زمان (min) و a، b و c، ضرایب h، g، k و m، ثابت های مدل است.

نتایج و بحث

رطوبت اولیه کیوی در طی آزمایش ۴/۷۲-۴/۴۶ بر پایه ماده خشک بود. با توجه به رطوبت توده در طی خشک شدن آزمایشگاهی کیوی در ماه های متفاوت، از مدل های جدول (۱) برای برازش منحنی خشک شدن در دامنه دمای خشک کن ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد استفاده شد. با توجه به مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE، مدل های رگرسیونی میدیلی و همکاران، تقریب پخش و پیچ به ترتیب تغییرات رطوبت در طی خشک کردن را بهتر برازش کردند به طوری که ضریب تبیین متوسط سه مدل به ترتیب عبارت از ۰/۹۹۸۸۱۴، ۰/۹۹۸۰۳۸ و ۰/۹۹۸۰۲۸ بود. مقادیر ضریب k و ثابت های مدل ها (a، b و n) در جداول ۳-۵ آمده است.

جدول ۲- مقایسه دقت برازش مدل ها بر اساس متوسط شاخص های آماری در دماهای مختلف

مدل	RMSE	χ^2	R^2
نیوتن	۰/۰۰۱۴۶۹	۰/۰۳۷۹۴۱	۰/۹۸۲۳۰۲
پیچ	۰/۰۱۲۶۹۶	۰/۰۰۰۱۶۶	۰/۹۹۸۰۲۸
هندرسون و پاییس	۰/۰۲۹۹۷۰	۰/۰۰۰۹۱۴	۰/۹۸۸۹۸۸
لگاریتمی	۰/۰۲۰۸۷۷	۰/۰۰۰۴۵۸	۰/۹۹۴۵۰۸
دو جمله ای	۰/۰۳۰۰۰۱	۰/۰۰۰۹۱۶	۰/۹۸۸۹۸۸
دو جمله ای نمایی	۰/۰۳۷۹۷۲	۰/۰۰۱۴۷۲	۰/۹۸۲۲۷۰
ونگ و سینگ	۰/۰۲۰۳۵۷۶	۰/۰۰۰۴۵۴	۰/۹۹۴۵۳۲
تقریب پخش	۰/۰۱۲۶۰۸	۰/۰۰۰۱۶۶	۰/۹۹۸۰۳۸
هندرسون و پاییس اصلاح شده	۰/۰۳۰۸۱۵	۰/۰۰۰۹۶۳	۰/۹۸۸۹۸۸
میدیلی و همکاران	۰/۰۰۹۹۱۷	۰/۰۰۰۱۰۱	۰/۹۹۸۸۱۴

جدول ۳- مقادیر ثابت و ضرایب مدل رگرسیونی میدیلی و همکاران به تفکیک دمای خشک کن

R^2	n	B	$k(\text{min}^{-1})$	a	دما ($^{\circ}\text{C}$)
۰/۹۹۸۸۵	۱/۲۷۴۳۰۱	-۰/۰۰۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۹۴۶	۰/۹۶۰۱۹۳	۴۰
۰/۹۹۸۹۸	۱/۲۸۵۶۸۷	-۰/۰۰۰۰۰۱۰	۰/۰۰۱۱۴۸	۰/۹۵۵۵۱۷	۵۰
۰/۹۹۹	۱/۳۴۶۷۸۸	۰/۰۰۰۰۰۸۷	۰/۰۰۱۱۱۰	۰/۹۷۴۵۸۸	۶۰
۰/۹۹۷۹۵	۱/۴۷۵۲۱۴	۰/۰۰۰۰۱۱۶	۰/۰۰۱۰۷۵	۰/۹۴۴۹۶۵	۷۰
۰/۹۹۹۲۹	۱/۵۱۸۷۰۶	۰/۰۰۰۰۱۴۲	۰/۰۰۳۲۲۱	۰/۹۷۵۶۴۱	۸۰

$$M = a \exp(-kt^n) + bt$$

جدول ۴- مقادیر ثابت و ضرایب مدل رگرسیونی تقریب پخش به تفکیک دمای خشک کن

R^2	b	$k(\text{min}^{-1})$	a	دما ($^{\circ}\text{C}$)
۰/۹۹۸۳۵	۰/۹۸۱۴۹۷	۰/۰۰۷۷۲۸	-۳۲/۵۸۸۶۶۴	۴۰
۰/۹۹۸۴۷	۰/۹۸۵۶۴۵	۰/۰۰۹۳۶۹	-۴۱/۶۷۷۵۰۸	۵۰
۰/۹۹۸۶۸	۰/۹۸۸۴۵۸	۰/۰۱۲۳۰۸	-۵۶/۵۸۰۱۲۷	۶۰
۰/۹۹۶۲۶	۰/۹۹۱۹۹۶	۰/۰۱۹۷۵۴	-۹۶/۲۳۴۱۹۳	۷۰
۰/۹۹۸۴۳	۰/۹۹۳۵۵۷	۰/۰۲۵۳۵۸	-۱۰۴/۲۷۳۰۸۶	۸۰

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$$

جدول ۵- مقادیر ثابت های و ضرایب مدل پیچ به تفکیک دمای خشک کن

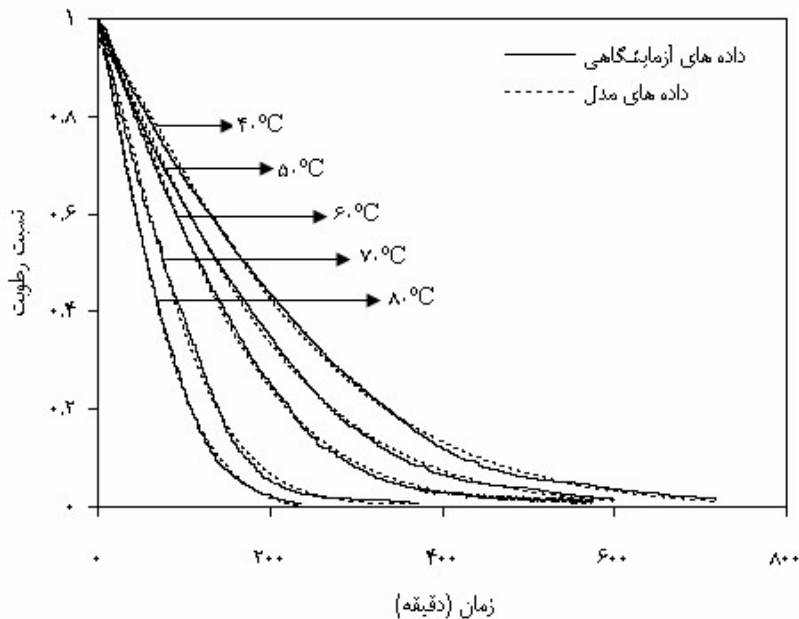
R^2	N	$k(\text{min}^{-1})$	دما ($^{\circ}\text{C}$)
۰/۹۹۷۹۸	۱/۲۰۶۱۸۹	۰/۰۰۱۴۵۵	۴۰
۰/۹۹۸۰۴	۱/۲۴۰۲۹۱	۰/۰۰۱۵۱۱	۵۰
۰/۹۹۸۷۶	۱/۲۸۳۱۲۹	۰/۰۰۱۵۷۴	۶۰
۰/۹۹۶۷۱	۱/۳۳۵۰۴۴	۰/۰۰۲۲۰۴	۷۰
۰/۹۹۸۶۵	۱/۳۹۵۸۴۵	۰/۰۰۳۷۳۹	۸۰

$$MR = \exp(-kt^n)$$

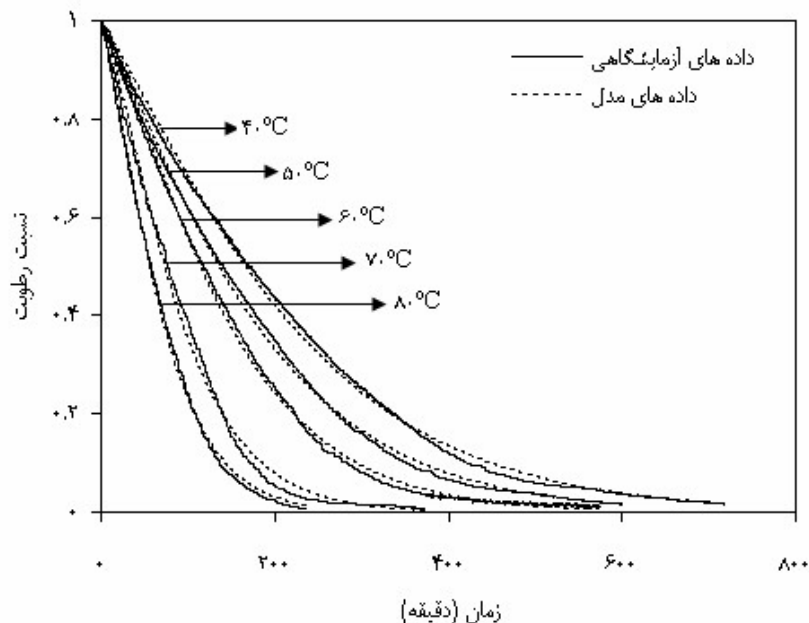
برای ارزیابی مدل ها، مقدار بیشتر ضریب تبیین به عنوان اولین شاخص و سپس مقدار کمتر χ^2 و RMSE مورد بررسی قرار گرفت که مدل میدیلی و همکاران بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۹۸۸۱۴) و کمترین مقدار χ^2 و RMSE (به ترتیب ۰/۰۰۰۱۰۱ و ۰/۰۰۹۹۱۷) را دارا بود در نتیجه بهترین مدل در بین مدل های ارائه شده این مدل است. بنابراین مدل ارائه شده می تواند برای بررسی و پیش بینی روند خشک شدن توده بستر نازک کیوی رقم هایوارد مورد استفاده قرار گیرد.

ثابت خشک کردن $k(\text{min}^{-1})$ و ضرایب a، b و n (بدون بعد) مدل رگرسیونی سه روش برتر برای هر یک از دماهای خشک-کن به دست آمد. منحنی خشک شدن براساس داده های آزمایشگاهی و داده های حاصل از مدل های میدیلی و همکاران، تقریب پخش و پیچ به ترتیب در شکل های (۲)، (۳) و (۴) نشان داده شده اند. همان گونه که از شکل های (۲)، (۳) و (۴) مشاهده می شود داده های آزمایشگاهی و مدل های شبیه سازی بسیار نزدیک می باشند. با توجه به شکل تغییر رطوبت در طی خشک شدن می توان دریافت که هرچه دمای هوای خشک کننده بیشتر باشد در دقایق اول خشک شدن کاهش رطوبت سریع تر می باشد [۱۴ و ۲۰ و ۲۱]. مطابق شکل (۲) داده های آزمایشگاهی و داده های حاصل از مدل بسیار به هم نزدیک بوده به طوری که منحنی حاصل از داده های

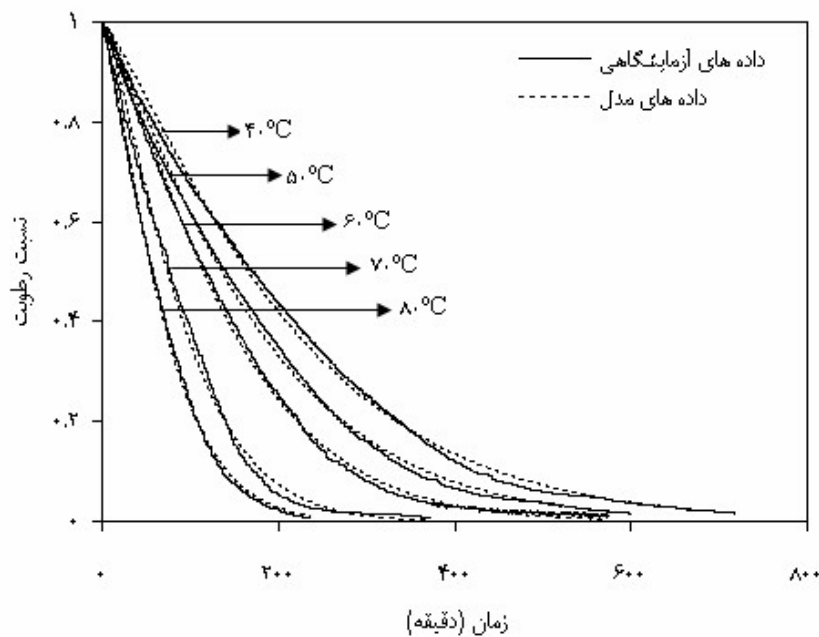
آزمایشگاهی و منحنی حاصل از داده های مدل تقریباً روی یکدیگر منطبق شده اند ولی منحنی های مشابه در شکل (۳) و (۴) کمی انحراف نشان می دهد. با توجه به بررسی شاخص های ارزیابی مدل های رگرسیونی و بررسی شکل های، مدل های برتر، کاملاً مشخص می گردد که مدل جدید می تواند داده های آزمایشگاهی را بهتر پیش بینی کند.



شکل ۲- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل از داده های آزمایشگاهی و داده های مدل میدیلی و همکاران



شکل ۳- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل از داده های آزمایشگاهی و داده های مدل تقریب پخش



شکل ۴- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل از داده های آزمایشگاهی و داده های مدل پیچ

نتیجه گیری

- ۱- افزایش دمای خشک کردن باعث افزایش سرعت خشک کردن می شود.
- ۲- مدل های میدیلی و همکاران، تقریب پخش و پیچ برای ضخامت ۶ میلی متر و سرعت هوای ورودی ۱/۵ متر بر ثانیه به ترتیب خشک شدن توده بستر نازک ورقه های نازک کیوی را با دقت بیشتری (به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۹۸۸۱۴، ۰/۹۹۸۰۳۸ و ۰/۹۹۸۰۲۸) نسبت به سایر مدل های تجربی مدل سازی می کنند.
- ۳- مدل میدیلی و همکاران منحنی خشک شدن ورقه نازک کیوی را با شاخص آماری EF ، χ^2 و $RMSE$ به ترتیب برابر ۰/۹۹۸۸۱۴، ۰/۰۰۰۱۰۱ و ۰/۰۰۹۹۱۷ نسبت به مدل های دیگر بهتر برآورد کرد و می توان این مدل را به عنوان مدلی جدید به مدل های شبیه سازی موجود اضافه نمود.

پیشنهادها

- ۱- در پژوهشی دیگر اثر رطوبت هوای ورودی بر روی مدل سینتیک خشک شدن ورقه های نازک کیوی بررسی شود.

- ۲- می توان اثر دما، سرعت و رطوبت در محیط خشک کردن را بر روی رنگ و طعم ورقه های خشک ده کیوی بررسی کرد.
- ۳- پیشنهاد می شود از روش های دیگر شبیه سازی مانند شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و روش اجزاء محدود نیز برای شبیه سازی خشک کردن استفاده شود.
- ۴- مدل های رگرسیونی سینتیک خشک شدن برای محصولات دیگر نیز استخراج گردد.

منابع

۱. میرزایی مقدم، ح.، توکلی هاشجین، ت.، مینایی، س. و رجایی، ا. ۱۳۸۶. بررسی درجه کشتسانی، درصد پسماند و برخی خواص فیزیکی میوه کیوی. سومین کنفرانس دانشجویی مهندسی ماشین های کشاورزی. اردیبهشت، شیراز.
۲. بی نام- آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی. ۱۳۸۴. <www.maj.ir>
۳. رفیعی، ش. و مقصدلو، ی. ۱۳۸۴. شبیه سازی مدل خشک کردن دانه گندم (رقم تجن). مجله علوم و صنایع غذایی ایران. دوره ۲، شماره ۳، ۴۹-۵۸.
4. Maskan, M and Gogus, F. 1998. Sorption isotherms and drying characteristics of mulberry (Morus Alba). Journal of Food Engineering, v(37): 437-449.
5. Pabis, S., Jayas, S. and Sankviski S. 1998. Grain Drying: Theory and Practice.
6. Food and Agriculture Organization (FAO). 2005. Report, Rome.
7. Sacilik, K. and Elicin, A. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. Journal of Food Engineering, v(73):281-289
8. Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering, v(61): 359-364.
9. Ertekin, C and Yaldiz, O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. Journal of Food Engineering, v(63): 349-359.
10. Simal, S., A. Femenia., M.C. Garau and C. Rossello. 2005. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. Journal of Food Engineering, v(66): 323-328.
11. Maskan, M. 2001. Kinetics of color change of kiwifruits during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering, v(48): 169-175.
12. Yadollahinia A., 2006. A Thin layer drying model for paddy dryer. M. Sc. Thesis. Faculty of Bio-systems Engineering, University of Tehran.
13. Guarte, R.C. 1996. Modelling the drying behaviour of copra and development of a natural convection dryer for production of high quality copra in the Philippines. Ph.D. dissertation, 287. Hohenheim University, Stuttgart, Germany.
14. Westerman, P. W., White, G. M. and Ross, I. J. 1973. Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled corn. Transactions of the ASAE, v(16): 1136-1139.
15. Zhang, Q. and Litchfield, J.B. 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. Drying Technology, v(9): 383-395.
16. Yaldiz, O. and Ertekin, C. 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. Drying Technology, v(19): 583-596.
17. Rahman, M. S., Perera, C.O. and Thebaud, C. 1998. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. Food international research, v(30): 485-491.
18. Henderson, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. Transactions of the ASAE, v(17): 1167-1172.
19. Özdemir, M. and Devres, Y.O. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts



- during roasting. *Journal of Food Engineering*, v(42): 225–233.
20. Karathanos, V.T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, v(39): 337–344.
 21. Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, v(26): 457–465.
 22. Akpınar, E.K., Bicer, Y. and Yildiz, C. 2003. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, v(59): 99-104.



Drying kinetics modeling of kiwifruit (cv. Hayward) slices in thin layer dryer

Ali Mohammadi^a, Shahin Rafiee^a, Alireza Keyhani^a, Zahra Emam-Djomeh^b

^aDepartment of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Bio-systems
Engineering,

University of Tehran, Karaj, Iran

^bDepartment of Food Science and Engineering, Faculty of Bio-systems Engineering,
University of Tehran, Karaj, Iran

Abstract

In this paper, thin layer drying behaviour of Kiwifruit slice was experimentally investigated in a convective type dryer and the mathematical modeling performed by using thin layer drying models given in literature. Drying experiments were conducted at inlet drying air temperatures of the 40, 50, 60, 70 and 80 °C; for samples of 6 mm thickness, at a drying air velocity of 1.5 m/s and with three replications in each treatment. Ten different thin layer mathematical drying models were compared (according to their coefficients of correlation) to estimate the drying curves. The effects of drying air temperature on the model constants and coefficients were evaluated through a non-linear regression technique. The models were compared according to three statistical parameters of: root mean square error, chi-square, and modeling efficiency. According to the obtained results, Midilli et al. model could satisfactorily describe the drying curve of Kiwifruit slices with $EF=0.998814$, $x^2=0.000101$ and $RMSE=0.009917$ at different temperature.

Keywords: Modeling; kiwifruit; non-linear regression; thin layer