



مدل‌سازی خشک شدن لایه نازک زردآلو

*اسماعیل میرزایی قلعه^۱، شاهین رفیعی^۲، علیرضا کیهانی^۳، زهرا امام‌جمعه^۴
و امین طاهری‌گراوند^۵

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران، ^۲ دانشیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران، ^۳ دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه تهران، ^۴ دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران
تاریخ دریافت: ۸۸/۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۵/۵

چکیده

در این پژوهش، رفتار خشک شدن برگه دو رقم زردآلو در خشک‌کن لایه نازک آزمایشگاهی براساس مدل‌های ریاضی خشک شدن مورد استفاده در منابع مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در چهار سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه انجام گرفت. ۹ مدل ریاضی خشک شدن بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد. ثابت‌ها و ضرایب مدل‌ها با هم مقایسه شدند. تمام مدل‌های ریاضی خشک شدن براساس سه شاخص آماری مربع کای (χ^2)، ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها ($RMSE$) و ضریب تعیین (R^2)، با هم مقایسه شدند. طبق نتایج به دست آمده مدل میدیلی و همکاران منحنی سینتیک خشک شدن زردآلو را با شاخص آماری R^2 ، χ^2 و $RMSE$ به ترتیب برابر ۰/۹۹۹۳۳۸، ۰/۰۰۰۰۰۴۵۶۰۸۷ و ۰/۰۰۶۵۱۳۶۳ برای رقم قوامی و ۰/۹۹۹۳۷۲، ۰/۰۰۰۰۳۴۷ و ۰/۰۰۵۷۷۵ برای رقم نصیری نسبت به مدل‌های دیگر بهتر برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: زردآلو، لایه نازک، خشک شدن، مدل‌سازی

* مسئول مکاتبه: mirzaeehale@ut.ac.ir

مقدمه

زردآلو نوع پرورش یافته زردآلوی جنگلی است که به وسیله تلقیح به عمل می آید و علاوه بر مصرف به صورت تازه از آن برای تولید زردآلوی خشک، زردآلودی فریز شده، مربا، ژله، آب میوه، کمپوت و غیره استفاده می کنند (گیزر و همکاران، ۲۰۰۲). ترکیه، ایران، ایتالیا، پاکستان و فرانسه از کشورهای عمده تولیدکننده زردآلو به شمار می آیند. صادرات ایران در سال ۲۰۰۷ بالغ بر ۶۸۰ تن می باشد (کوبیلاری و فاروک، ۲۰۰۴).

یکی از اساسی ترین اهداف خشک کردن محصولات کشاورزی، جابه جا کردن آب در جامدات به طرف بالا تا یک سطح (تراز) خاص می باشد، که ضایعات میکروبی و فعل و انفعالات شیمیایی، به طور اساسی حداقل باشد (مسکن و گوگاس، ۱۹۹۸). خشک کن لایه نازک به خشک کنی گفته می شود که ضخامت محصول و طول سینی حاوی نمونه 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 فرآیند خشک کردن بستگی دارد (پایس و همکاران، ۱۹۹۸). محققان زیادی در زمینه خشک کردن لایه نازک محصولات کشاورزی کار کرده اند، دویماز (۲۰۰۴) لایه های نازک هویج به ضخامت ۰/۵ سانتی متر را در چهار دمای ۵۰، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس با سرعت هوای ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه به وسیله خشک کن آزمایشگاهی خشک کرد. مدل پیچ نسبت به مدل هندرسون و پایس نتیجه بهتری نشان داد (دویماز، ۲۰۰۴). ارتکین و یالدیز در سال ۲۰۰۴ به بررسی انتخاب بهترین مدل برای خشک کردن ورقه های نازک بادنجان پرداختند. آزمایش ها در محدوده دمایی بین ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس و برای سرعت های بین ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه انجام گرفتند. این پژوهش 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 کم رنگ تر می شود. اما ضخامت تأثیر زیادی بر مشخصات رنگ، نمی گذارد. در این پژوهش مشاهده شد که بهترین مدل با خطای کمتر، مدل میدیلی و همکاران می باشد (ارتکین و یالدیز، ۲۰۰۴).

وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ مدل سازی ریاضی خشک کردن لایه نازک سیب را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش ها در چهار سطح دمایی ۷۵، ۸۵، ۹۵ و ۱۰۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱/۲ متر در ثانیه انجام شد. مدل های ریاضی مختلفی بر داده های آزمایشگاهی برازش داده شدند. نتایج نشان داد که مدل لگاریتمی بهتر از سایر مدل ها فرآیند خشک شدن را پیش بینی می کند (وانگ و همکاران، ۲۰۰۷).

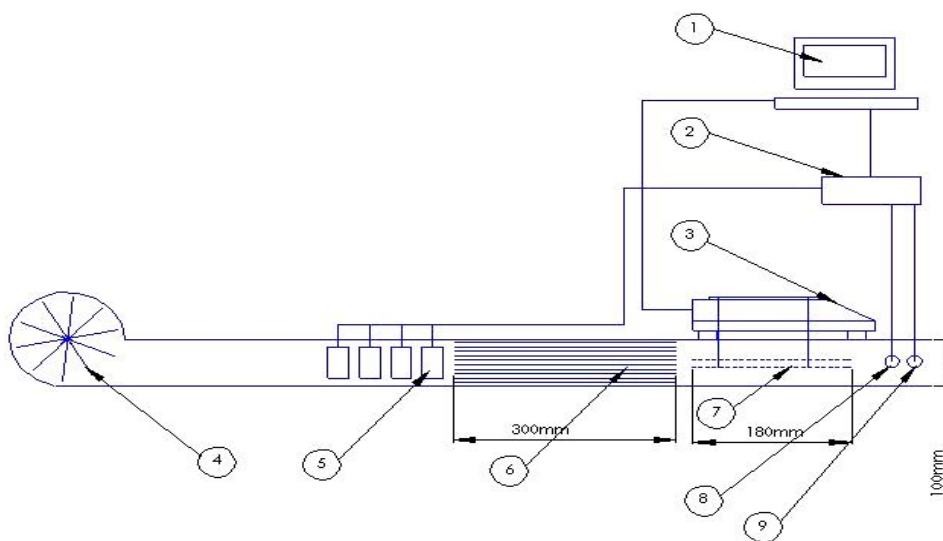
محمدی رفتار خشک شدن ورقه‌های نازک کیوی در خشک‌کن لایه نازک آزمایشگاهی را مورد بررسی قرار داد. آزمایش‌ها در پنج سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و سه سرعت هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه انجام گرفت. داده‌های حاصل از آزمایش با ۱۲ مدل مربوط به خشک‌کن‌های لایه نازک مورد بررسی قرار گرفتند. تمام مدل‌های ریاضی خشک شدن براساس سه شاخص آماری ضریب تعیین، مربع کای و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها با هم مقایسه شدند. طبق نتایج به‌دست آمده مدل میدیلی و همکاران منحنی سینتیک خشک شدن ورقه نازک کیوی را نسبت به مدل‌های دیگر بهتر برآورد کرد (محمدی، ۲۰۰۸). رفیعی و مقصدلو شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک کردن لایه نازک دانه گندم رقم تجن را مورد مطالعه قرار دادند (رفیعی و مقصدلو، ۲۰۰۵). بوزکیر مدل پیچ را برای مدل خشک کردن برگه زردآلوی شسته شده خشک شده ارزیابی کرد (بوزکیر، ۲۰۰۶). به هر حال، در مورد مدل خشک کردن برگه زردآلو ارقام ایرانی مطالعه‌ای صورت نگرفته است. بنابراین هدف از انجام این پژوهش، ارایه مناسب‌ترین مدل برای خشک شدن برگه زردآلوی ارقام ایرانی است. مدل یادشده براساس متغیر وابسته (رطوبت توده) و دو متغیر مستقل (زمان و دمای خشک شدن) بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش از میوه زردآلو رقم قوامی و نصیری که از شهرستان شاهرود تهیه شده بود، استفاده شد. آزمایش‌ها در چهار سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی ۲ متر بر ثانیه انجام شد. ۲۰۰ گرم برگه زردآلو بر روی یک سینی توری آلومینیومی مربعی به ضلع ۲۵ سانتی‌متر به‌گونه‌ای قرار داده شد که روی سینی فقط یک لایه از محصول قرار گرفته بود. در طی خشک شدن، وزن محصول به‌وسیله ترازوی دیجیتالی، مدل GF3000 ساخت شرکت A&D، ژاپن متصل به رایانه و رطوبت و دمای هوای خشک‌کن هر ۵ ثانیه اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. خشک کردن تا زمان ثابت شدن تقریبی وزن نمونه ادامه داشت. سپس نمونه‌ها در داخل آون با دمای ۷۸ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد (جنتی‌زاده و همکاران، ۲۰۰۸) و پس از خشک شدن کامل، وزن خشک نمونه‌ها به‌دست آمد. در نهایت رطوبت نمونه‌ها طی خشک شدن به‌وسیله معادله (۱) محاسبه شد.

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

که در آن، M_d : رطوبت برگه زردآلو بر پایه خشک (db)، W_w : وزن زردآلو در طی خشک شدن، W_d : وزن زردآلوی خشک می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها، از یک خشک‌کن لایه نازک آزمایشگاهی (شکل ۱) که در گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران ساخته شد بود، استفاده شد (یدالهی‌نیا، ۲۰۰۶). این خشک‌کن از یک فن سانتریفوژ برای ایجاد جریان هوا و چهار گرم‌کن برقی ۵۰۰ وات جمعاً به قدرت ۲۰۰۰ وات برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه خشک‌کن و دو حس گر دما (LM35) و رطوبت (خازنی، ساخت فیلیپین) برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده تشکیل شده است. ترازوی مورد استفاده در دستگاه خشک‌کن مدل GF3000 ساخت شرکت A&D ژاپن می‌باشد. این ترازو دارای دقت ۰/۰۱ گرم و حداکثر وزن قابل اندازه‌گیری ۳۱۰۰ گرم می‌باشد. برای اجرای فرایند کنترل و پایش خشک‌کن، میکرو کنترلر AVR مدل ATMEGA 32 مورد استفاده قرار گرفت که توسط نرم‌افزار سی‌پلاس برنامه آن نوشته شد.



۱- رایانه، ۲- میکروکنترلر، ۳- ترازوی دیجیتال، ۴- فن سانتریفوژ، ۵- گرم‌کن‌ها، ۶- محفظه مستقیم‌کننده، ۷- سینی نمونه‌ها، ۸- حس گر دمای هوای خشک‌کن، ۹- حس گر رطوبت هوای ورودی

شکل ۱- طرحواره خشک‌کن آزمایشگاهی.

برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا از یک سرعت‌سنج دیجیتالی مدل PROVA AVM-07 با حساسیت ۰/۰۱ متر بر ثانیه استفاده شد. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار همه آزمایش‌ها ۲۵ دقیقه بعد از روشن کردن سیستم شروع می‌شد. سپس سینی حاوی نمونه‌ها در محفظه خشک‌کن قرار داده می‌شد. نحوه خشک کردن به این صورت است که هوای جریان یافته در کانال به‌وسیله دمنده از گرم‌کن گذشته و پس از گرم شدن به‌وسیله کانال به سمت توده زردآلو هدایت می‌شود. جریان هوا هنگام گذر از توده، رطوبت زردآلو را جذب و باعث گرم شدن آن می‌شود. به این 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 برگه زردآلو از نسبت رطوبت طی خشک شدن توده استفاده شد. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک شدن به‌وسیله رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

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

که در آن، MR : نسبت رطوبت، M_d : رطوبت توده در لحظه جاری بر پایه خشک، M_e : رطوبت تعادلی و M_o : رطوبت اولیه توده محصول است. طرف چپ معادله نسبت رطوبت را که مشخص‌کننده فرآیند خشک کردن است نشان می‌دهد. براساس پژوهش‌های انجام شده، در محصولاتی که دارای رطوبت زیاد هستند معادله (۲) به‌صورت معادله (۳) ساده می‌گردد.

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

در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست. نسبت رطوبت به‌دست آمده طی آزمایش با ۹ مدل از مدل‌های استاندارد خشک شدن لایه نازک محصولات کشاورزی که در جدول (۱) آمده است مقایسه گردید. مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت طی خشک شدن براساس متغیر مستقل زمان به‌وسیله نرم‌افزار SPSS15 استخراج شد. از سه معیار ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها ($RMSE$)^۲ برای سنجش بهترین مدل استفاده شد

1- Chi-Square

2- Root Mean Square Error

که برای هر مدل هر چه مقدار R^2 بیشتر، χ^2 و $RMSE$ کمتر باشد مدل بهتر ارزیابی می‌شود (گورته، ۱۹۹۶):

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

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

که در آن، $M_{exp,i}$: رطوبت مشاهده شده در i امین اندازه‌گیری، $M_{pre,i}$: رطوبت پیش‌بینی شده از مدل در i امین اندازه‌گیری، N : تعداد مشاهده‌ها (داده‌ها) و n : تعداد ثابت‌های به‌کار رفته در معادله است. برای هر یک از دماهای خشک‌کن معادله‌های جدول (۱) استخراج شده و متوسط شاخص‌های دقت برازش در دماهای مختلف برای هر مدل به‌دست آمد و با یکدیگر مقایسه شده و مدل برتر انتخاب و برای مدل‌های برتر ضرایب و ثابت‌ها برای دماهای مختلف به‌دست آمد و نمودار منحنی خشک شدن برگه زردآلو نیز رسم شد.

جدول ۱- مدل‌های رگرسیون خشک شدن توده بستر نازک مورد استفاده در مدل‌سازی.

ردیف	نام مدل	مدل	مرجع
۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	(Henderson, 1974)
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	(Guarte, 1996)
۳	هندرسون و پاپیس	$MR = a \exp(-kt)$	(Zhang and Litchfield, 1991)
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Karathanos, 1999)
۵	دوجمله‌ای	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(Yaldiz et al., 2001)
۶	دوجمله‌ای نمایی	$MR = a \exp(-kt) + \exp(-mt)$	(Akpınar et al., 2003)
۷	تقریب پخش	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	(Karathanos, 1999)
۸	میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Karathanos, 1999)
۹	ورما و همکاران	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	(Verma, 1985)

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

نتایج و بحث

رطوبت اولیه زردآلو در طی آزمایش برای ارقام قوامی و نصیری به ترتیب برابر ۷۹/۶۱ و ۷۹/۸۴ بر پایه ماده تر بود. با توجه به رطوبت توده طی خشک شدن آزمایشگاهی زردآلو در دماهای متفاوت، از مدل‌های جدول (۱) برای برازش منحنی خشک شدن در دامنه دمای خشک‌کن ۴۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس استفاده شد. با توجه به مقادیر R^2 ، χ^2 و $RMSE$ ، مدل رگرسیونی میدیلی و همکاران تغییرات رطوبت طی خشک کردن ارقام قوامی و نصیری را بهتر برازش کرد که نتایج برازش مدل‌ها براساس متوسط شاخص‌های آماری برای ارقام قوامی و نصیری به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. مقادیر ضریب k و ثابت‌های مدل (a ، b و n) برای ارقام قوامی و نصیری به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ آمده است.

جدول ۲- مقایسه دقت برازش مدل‌ها براساس متوسط شاخص‌های آماری در دماهای مختلف (قوامی).

مدل	R^2	χ^2	$RMSE$
نیوتن	۰/۹۹۴۴۶۸	۰/۰۰۰۴۰۹۹۳۷	۰/۰۱۸۹۴۷۸
پیچ	۰/۹۹۸۴۸	۰/۰۰۰۱۰۹۲۳۴	۰/۰۰۹۹۷۴۷۹
هندرسون و پاپیس	۰/۹۹۶۳۴۶	۰/۰۰۰۲۶۹۹۴۶	۰/۰۱۵۵۹۴۰۷
لگاریتمی	۰/۹۹۸۸۴۶	۰/۰۰۰۰۷۵۵۷۵۴	۰/۰۰۸۱۶۳۸
دوجمله‌ای	۰/۹۹۶۵۶۲	۰/۰۰۰۲۲۰۳۶۹	۰/۰۱۴۹۷۵۷۴
دوجمله‌ای نمایی	۰/۹۹۴۷۶۶	۰/۰۰۰۳۹۲۱۱۱	۰/۰۱۸۲۲۷۵۲
تقریب پخش	۰/۹۹۸۷۸۴	۰/۰۰۰۰۸۸۱۵۰۹	۰/۰۰۸۸۱۰۷۲
میدیلی و همکاران	۰/۹۹۹۳۳۸	۰/۰۰۰۰۴۵۶۰۸۷	۰/۰۰۶۵۱۳۶۲
ورما و همکاران	۰/۹۹۸۷۱۶	۰/۰۰۰۰۸۵۶۹۲۷	۰/۰۰۸۶۸۴۰۳

جدول ۳- مقایسه دقت برازش مدل‌ها براساس متوسط شاخص‌های آماری در دماهای مختلف (نصیری).

مدل	R^2	χ^2	RMSE
نیوتن	۰/۹۸۵۱۲۲	۰/۰۰۰۷۲۲	۰/۰۲۲۴۹۸
بیچ	۰/۹۹۷۱۷۲	۰/۰۰۰۵۴۵	۰/۰۱۸۷۳۲
هندرسون و پابیس	۰/۹۹۱۴۶۲	۰/۰۰۰۴۳۳	۰/۰۱۸۲۲۲
لگاریتمی	۰/۹۹۹۰۹۴	۰/۰۰۰۱۷۷	۰/۰۱۱۱۸۵
دوجمله‌ای	۰/۹۹۹۱۶	۰/۰۰۱۴۰۹	۰/۰۲۲۸۳۷
دوجمله‌ای نمایی	۰/۹۹۴۷۴۸	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۱۴۲۲۸
تقریب پخش	۰/۹۹۸۹۶	۰/۰۰۰۰۵۴۲	۰/۰۰۷۰۳۷
میدیلی و همکاران	۰/۹۹۹۳۷۲	۰/۰۰۰۰۳۴۷	۰/۰۰۵۷۷۵
ورما و همکاران	۰/۹۹۵۷۵	۰/۰۰۰۲۳۳	۰/۰۱۳۵۲۱

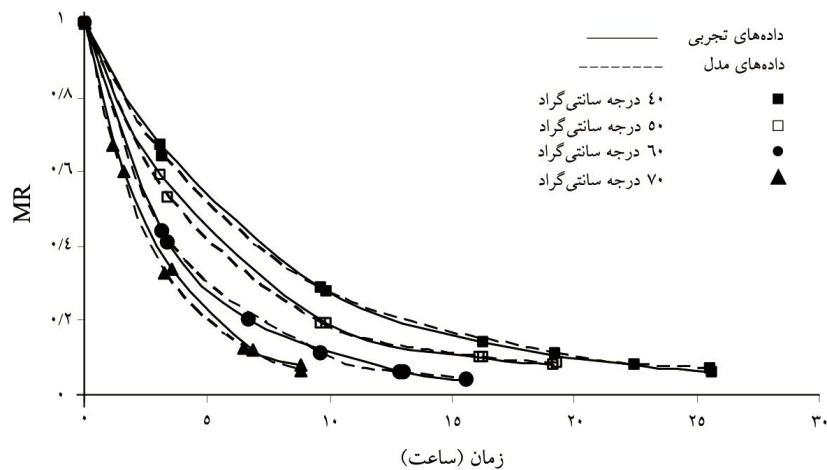
جدول ۴- مقادیر ثابت و ضریب مدل رگرسیونی میدیلی و همکاران به تفکیک دمای خشک‌کن (قوامی).

دما (درجه سلسیوس)	A	K (یک بر دقیقه)	b	N	R^2
۴۰	۱/۰۲۷۰۹۰۷۴۲	۰/۰۰۴۹۰۵۰۲۰	-۰/۰۰۰۰۲۹۱۳۷	۰/۸۴۶۷۱۱۴۶۳	۰/۹۹۸۷۸
۵۰	۰/۹۸۴۹۹۰۹۶۱	۰/۰۰۲۰۶۰۳۰۳	-۰/۰۰۰۰۱۰۲۹۱	۱/۰۵۵۱۹۲۵	۰/۹۹۹۶۹
۶۰	۱/۰۰۳۹۳۳۲۶۹	۰/۰۰۲۲۹۴۸۱۲	-۰/۰۰۰۰۶۷۱۱۶	۱/۰۶۸۵۸۷۴۰۹	۰/۹۹۹۰۶
۷۰	۰/۹۹۲۷۶۸۱۰۷	۰/۰۰۴۴۶۴۰۷۹	-۰/۰۰۰۰۸۵۵۳۲	۱/۰۰۵۳۵۵۰۰۸	۰/۹۹۹۶۸

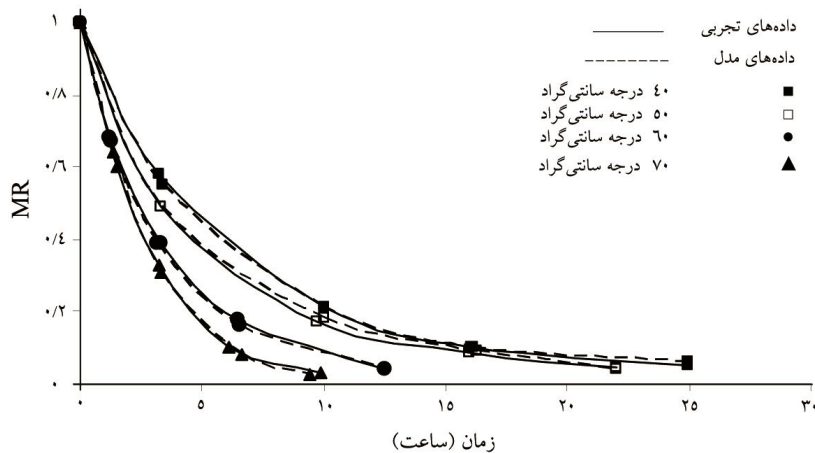
جدول ۵- مقادیر ثابت و ضریب مدل رگرسیونی میدیلی و همکاران به تفکیک دمای خشک‌کن (نصیری).

دما (درجه سلسیوس)	A	K (یک بر دقیقه)	b	n	R^2
۴۰	۰/۹۸۰۶۳۷۷۰۵	۰/۰۰۲۶۵۹۴۷۶	-۰/۰۰۰۰۱۹۰۴۲	۰/۹۶۴۳۶۲۴۷۵	۰/۹۹۹۳۶
۵۰	۰/۹۹۷۸۴۴۳۶۶	۰/۰۰۳۴۹۰۹۸۳	-۰/۰۰۰۰۵۱۱۱۷	۰/۹۷۹۰۳۲۳۵۶	۰/۹۹۶۲۱
۶۰	۰/۹۵۷۷۴۳۲۱۹	۰/۰۰۵۶۲۳۹۶۲	-۰/۰۰۰۰۱۸۳۱۱	۰/۹۴۰۳۷۶۷۷۲	۰/۹۹۹۶۱
۷۰	۰/۹۹۲۷۴۴۵۹۸	۰/۰۰۴۹۴۰۸۸۶	-۰/۰۰۰۰۴۹۵۹۱	۱/۰۲۵۵۸۲۰۲۸	۰/۹۹۸۲۷

ثابت خشک کردن K (یک بر دقیقه) و ضرایب a ، b و n (بدون بعد) مدل رگرسیونی میدیلی و همکاران برای هر یک از دماهای خشک‌کن به دست آمد. محمدی مدل رگرسیونی میدیلی و همکاران را به عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی نسبت رطوبت میوه کیوی پیشنهاد داد (محمدی، ۲۰۰۸). براساس نتیجه به دست آمده از مطالعه طغزل و پهلوان در زمینه خشک کردن زردآلو در چهار سطح دمایی ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و محدوده سرعت ۱/۵-۰/۲ متر بر ثانیه، مدل لگاریتمی می‌تواند به طور رضایت بخشی، منحنی خشک کردن را توصیف کند (طغزل و پهلوان، ۲۰۰۳). منحنی خشک شدن براساس داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل میدیلی و همکاران به عنوان بهترین مدل، برای ارقام قوامی و نصیری به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل تغییر رطوبت طی خشک شدن می‌توان دریافت که هرچه دمای هوای خشک‌کننده بیشتر باشد در دقایق اول خشک شدن، کاهش رطوبت سریع‌تر می‌باشد (هندرسون، ۱۹۷۴؛ کاراتانوس، ۱۹۹۹؛ یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱). مطابق شکل‌های (۲) و (۳) داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل بسیار به هم نزدیک بوده به طوری که منحنی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و منحنی حاصل از داده‌های مدل روی یکدیگر منطبق شده‌اند. با توجه به بررسی شاخص‌های ارزیابی مدل‌های رگرسیونی برتر کاملاً مشخص می‌گردد که مدل جدید می‌تواند داده‌های آزمایشگاهی را بهتر پیش‌بینی کند.



شکل ۲- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل میدیلی و همکاران (رقم قوامی).



شکل ۳- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل میدیلی و همکاران (رقم نصیری).

نتیجه‌گیری

۱- مدل میدیلی و همکاران منحنی خشک شدن برگه زردآلو رقم قوامی را با شاخص آماری R^2 ، χ^2 و $RMSE$ به ترتیب برابر $0/999338$ ، $0/0000456087$ و $0/00651363$ نسبت به مدل‌های دیگر بهتر برآورد کرد.

۲- مدل میدیلی و همکاران منحنی خشک شدن برگه زردآلو رقم نصیری را با شاخص آماری R^2 ، χ^2 و $RMSE$ به ترتیب برابر $0/999372$ ، $0/0000347$ و $0/005775$ نسبت به مدل‌های دیگر بهتر برآورد کرد.

۳- افزایش دمای خشک کردن باعث افزایش سرعت خشک کردن می‌شود.

منابع

- Akpınar, E.K., Bicer, Y. and Yildiz, C. 2003. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59: 99-104.
- Bozkır, O. 2006. Thin-layer drying and mathematical modeling for washed dry apricot. *Journal of Food Engineering*, 77: 146-151.
- Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61: 359-364.

- Ertekin, C. and Yaldiz, O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63: 349-359.
- Gezer, I., Hacseferogullar, H. and Demir, F. 2002. Some physical properties of apricot pit and its kernel. *Journal of Food Engineering*, 56: 49-57.
- 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.
- Henderson, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17: 1167-1172.
- Janatizadeh, A., Naderi Boldaji, M., Fatahi, R., Ghasemi Varnamkhasti, M. and Tatabaefar, A. 2008. Some Post harvest Physical Properties of Iranian apricot fruit. *International agrophysics*, 22: 356-363.
- Karathanos, V.T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39: 337-344.
- Kubilay, V. and Faruk, O. 2004. Mechanical behavior of apricot pit under compression loading. *Journal of Food Engineering*, 65: 255-261.
- Maskan, M. and Gogus, F. 1998. Sorption isotherms and drying characteristics of mulberry (*Morus Alba*). *Journal of Food Engineering*, 37: 437-449.
- Mohammadi, A. 2008. Selection of Drying Models and Comparison of Time and Consumption Energy in Drying Different Condition of kiwi (Haivard Variety) Slice M.Sc. Thesis. University of Tehran, Iran.
- Pabis, S., Jayas, S. and Sankviski, S. 1998. Grain Drying: Theory and Practice.
- Rafiee, S. and maghsoodloo, Y. 2005. Modeling drying of Wheat (cv. Tagan). *Journal of Iranian Food Industry*, 2: 3. 49-58.
- Togrul, I.T. and Pehlivan, D. 2003. Modeling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58: 23-32.
- Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B. and Wraton, F.T. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of ASAE*, 28: 296-301.
- Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F. and Zhao, G. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple. *Food Research international*, 40: 36-46.
- Yadollahinia, A. 2006. A Thin layer drying model for paddy dryer. M.Sc. Thesis. Faculty of Bio-systems Engineering, University of Tehran.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26: 457-465.
- Zhang, Q. and Litchfield, J.B. 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*, 9: 383-395.



Modeling of thin layer drying of apricot

*E. Mirzaee Ghale¹, S. Rafiee², A. Keyhani³, Z. Emam-jomeh⁴
and A. Tahere Geravand⁵

¹Ph.D. Student., Dept. of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran

²Associate Prof., Dept. of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran

³Professor., Dept. of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran

⁴Associate Prof., Dept. of Food Science and Technology Engineering, University of Tehran

⁵M.Sc. Student, Dept. of of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran

Abstract

In this research the thin layer drying behavior of apricot (*cv. GHAVAMI* and *NASIRY*) at temperatures of drying air of 40, 50, 60 and 70 °C and at drying air velocity of 2 ms⁻¹ was studied. In order to select the best drying curve equation, 9 different thin layer drying models were fitted to the experimental data and were compared according to their coefficient of determination (R^2), reduced chi-square (χ^2) and root mean square error ($RMSE$). According to the results, Midilli et al. models could satisfactorily describe the drying curve of apricot with R^2 , χ^2 and $RMSE$ of 0.999338, 0.0000456087 and 0.00651363 for *cv. GHAVAMI* and 0.999372, 0.0000347 and 0.005775 for *cv. NASIRY*, respectively.

Keywords: Apricot; Thin layer; Drying; Modeling

* Corresponding Author; Email: mirzaeeghale@ut.ac.ir