



بررسی خصوصیات خشک شدن توت سفید با استفاده از خشک‌کن مادون‌قرمز- جابجایی

محمد کاوه^{۱*}، رضا امیری چایجان^۲، ساسان خیاطی^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان (skaweh@yahoo.com)

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

چکیده

در این پژوهش، خشک‌شدن لایه نازک توت سفید در یک خشک‌کن مادون قرمز آزمایشگاهی مورد تحقیق قرار گرفت. خشک‌کردن محصول در سه دمای ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سلسیوس و در یک سرعت جریان هوای ۰/۴ متر بر ثانیه و دو توان تابش مادون قرمز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ وات انجام شد. برای انتخاب یک منحنی خشک‌کردن مناسب، چهار مدل لایه نازک خشک شدن به داده‌های آزمایشگاهی برازش شد. در میان مدل‌های ریاضی مورد تحقیق مدل *Midilli et al.* بهترین مدل برای شرح دادن رفتار خشک‌شدن لایه نازک توت با بیشترین مقدار ضریب همبستگی (R^2) و کمترین مربعات کاهش یافته (χ^2) و خطای ریشه میانگین مربعات (RSME) انتخاب شد. نتایج بررسی‌های مقدار ضریب پخش رطوبت موثر برای خشک‌شدن لایه نازک توت نیز نشان داد که دمای 70°C و توان تابش ۱۰۰۰ W دارای بیشترین ضریب پخش رطوبت موثر است.

واژه‌های کلیدی: توت، خشک‌کردن، خشک‌کن مادون قرمز، مدل لایه نازک، ضریب پخش رطوبت موثر

مقدمه

میوه توت از درخت توت (*Morus sp.*)، از خانواده Moraceae و در منطقه با آب و هوای معتدل در نیم کره شمالی و مناطق استوایی رشد می‌کند. توت می‌تواند در مناطق وسیعی از شرایط آب و هوایی، خاک و توپوگرافی رشد کند (Ercisli and Orhan, 2007). میوه توت در اندازه‌های ۲-۳ سانتی‌متر متنوع است و در ظاهر شبیه شاه توت می‌باشد. میوه توت حالت کال به صورت سفید، سبز و زرد رنگ می‌باشد. و در هنگام رسیدن، قرمز سپس بنفش و در نهایت سیاه می‌شود. میوه رسیده با طعم شیرین آن، به طور گسترده در ساخت مربا و کیک استفاده می‌شود (Huang et al., 2011).

در گذشته، از انرژی خورشید برای خشک کردن انواع محصولات کشاورزی و مواد غذایی استفاده می‌شد اما مشکلات زیادی در استفاده از این روش وجود دارد که عبارتند از: تغییرات نامناسب در کیفیت غذا، عدم کنترل کافی در فرآیند خشک کردن، طولانی بودن زمان خشک‌شدن و غیر بهداشتی بودن محصول. مشکلاتی از این قبیل استفاده از تکنولوژی جدید در فرآیند خشک کردن را ضروری می‌سازد. خشک‌کن‌های صنعتی مزایایی نسبت به روش‌های سنتی دارند که عبارتند از: برداشت به موقع



محصول، کاهش تلفات در مزرعه، برنامه ریزی برای برداشت در شرایط نامطلوب آب و هوایی، افزایش مدت انبارداری مواد غذایی و محصولات کشاورزی (Cakmak and Yıldız, 2011).

خشک کردن به صورت تابش مادون قرمز، به عنوان یک روش بالقوه برای به دست آوردن مواد غذایی از جمله حبوبات، سبزیجات، توت و سایر میوه ها با کیفیت بالا می باشد. انرژی تابش مادون قرمز بدون گرم کردن هوای اطراف به سطح محصول منتقل می شود. با برخورد تابش به محصول به داخل آن نفوذ کرده و حرارت آن را منتقل می کند (Khir et al., 2011).

مدل سازی ریاضی انتقال جرم و تغییرات کیفیت یک ابزار بسیار مهم و مفید برای کنترل فرآیند در طی خشک شدن است. مدل های تجربی یا نیمه تجربی، نسبت رطوبت و تغییرات کیفیت به طور گسترده برای محصولات کشاورزی استفاده می شود. پژوهشگران بسیاری برای پیش بینی نسبت رطوبت و تغییرات کیفی در محصولات دیگر استفاده کرده اند مانند: (Shi et al., 2008; Artnaseaw et al., 2010; Ponkham et al., 2012; Amiri Chayjan and Kaveh, 2013).

هدف از این پژوهش بررسی خشک کردن لایه نازک توت با استفاده از تابش مادون قرمز در درجه حرارت های ۴۰، ۵۵ و ۷۰°C در سرعت هوای ۰/۴ متر بر ثانیه و توان های تابش ۵۰۰، ۱۰۰۰ وات می باشد. همچنین مدل سازی ریاضی منحنی های خشک کردن ارائه می شود و مقدار ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی فعال سازی برای توت محاسبه می شود.

مواد و روش ها

توت تازه از بازار خریداری شد و برای انجام آزمایش ها در یخچال با دمای ۱±۳°C نگهداری شد. اندازه ی نمونه ها یکسان و هم اندازه انتخاب شدند. توت های نارس و خراب به صورت دستی جدا شدند. رطوبت اولیه توت با استفاده از آون به دست آمد. حدود ۴۰ گرم از نمونه را در آون در دمای ۱±۷۰°C به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. رطوبت اولیه توت ۲/۴۳ بر پایه خشک به دست آمد.

در این پژوهش از یک خشک کن مادون قرمز- جابجایی که در آن از یک سرعت هوا (۰/۴ متر بر ثانیه)، دو توان تابش (۵۰۰ و ۱۰۰۰ وات) و سه سطح دمای (۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سلسیوس) استفاده شد. خشک کن مادون قرمز جابجایی از دو قسمت، یعنی یک محفظه خشک کردن شامل تابشگرهای مادون قرمز و یک واحد تامین هوای گرم تشکیل شده است. برای انجام آزمایش ها، دما و رطوبت نسبی محیط به ترتیب بین ۲۷-۳۲ درجه سلسیوس و ۲۴-۳۳ درصد اندازه گیری شد.

مدل سازی ریاضی منحنی خشک کردن

نسبت رطوبت (MR) توت در طول فرایند خشک کردن با استفاده از معادله زیر محاسبه می شد:

$$MR = \frac{(W_t - W_e)}{(W_0 - W_e)} \quad (1)$$

به ترتیب رطوبت محصول در زمان t ، محتویات رطوبتی تعادلی و رطوبت اولیه محصول می باشد.

برای مدل کردن ریاضی خشک شدن توت سفید از مدل های ریاضی لایه نازک استفاده شد (جدول ۱). برای انتخاب

بهترین مدل برای شرح دادن رفتار لایه نازک خشک شدن میوه توت از معیارهای ضریب همبستگی (R^2)، مربعات کاهش یافته

(χ^2) و خطای ریشه میانگین مربعات (RSME) استفاده شد.

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

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

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

$MR_{pre,i}$ و $MR_{exp,i}$ به ترتیب نسبت رطوبت های آزمایشگاهی و نسبت رطوبت های پیش بینی شده می باشند. z ، تعداد

مشاهدات در آزمایشها و N تعداد ثابت ها در مدل های خشک کردن می باشد (Mota et al., 2010).

جدول ۱- مدل های لایه نازک مورد استفاده برای خشک کردن میوه توت سفید

مدل	معادلات	مراجع
Demir et al.	$MR = a \exp(-kt)^n + b$	Demir et al. (2007)
Midilli et al.	$MR = 1 + at + bt^2$	Midilli et al. (2002)
logestic	$MR = a / (1 + b \exp(kt))$	Cihan et al. (2007)
Two-Term	$MR = a \exp(k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Amiri Chayjan and kaveh (2013)

$a, b, c, k, k_0, k_1, n,$



قانون دوم فیک که توسط کرانک برای شرایط لایه نازک در محصولات کروی ارائه شد با نادیده گرفتن اثرات دما و مجموع گرادیان فشار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک‌کردن را توصیف می‌کند (Crank, 1975). با فرض اینکه در فرآیند خشک‌کردن، پخش رطوبتی موثر ثابت و شعاعی است می‌توان مقدار آن را از معادله زیر محاسبه نمود:

$$\frac{(W_t - W_e)}{(W_0 - W_e)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{b_n^2} \exp\left[-D_{eff} \frac{b_n^2 t}{r^2}\right] \quad (5)$$

که در آن n تعداد جملات معادله (۱، ۲، ۳، ...)، t زمان خشک‌شدن (S)، r شعاع هندسی بنه (m)، D_{eff} ضریب پخش رطوبت موثر (m^2/s). وقتی t افزایش می‌یابد، تمام جملات به غیر از جمله اول، صفر می‌شوند در نتیجه خواهیم داشت (Mota et al., 2010).

$$MR = \frac{4}{b_n^2} \exp\left[-D_{eff} t \frac{b_1^2}{r^2}\right] \quad (6)$$

بعد از ساده شدن، معادله بالا را می‌توان به صورت خطی نوشت. با اعمال لگاریتم از طرفین معادله می‌توان آن را به صورت خطی درآورد.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{4}{b_n^2}\right) + \exp\left[-D_{eff} \frac{b_1^2}{r^2}\right] t \quad (7)$$

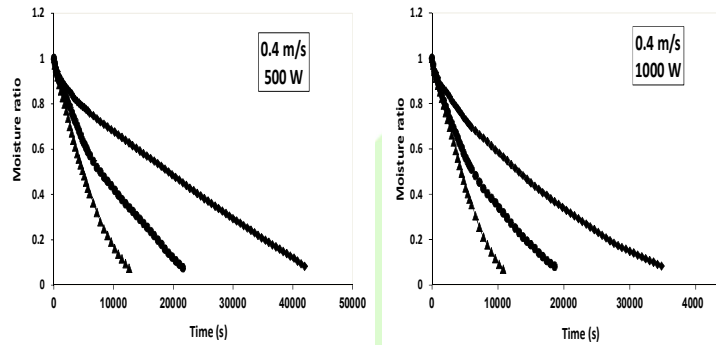
با رسم $\ln(MR)$ نسبت به زمان، خطی با شیب K_0 به دست می‌آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t ، ضریب پخش رطوبت موثر را می‌توان از رابطه ۸ به دست آورد.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R_g T}\right] \quad (8)$$

نتایج و بحث

در شکل (۱) تاثیر افزایش دما بر زمان خشک‌کردن توت در روش تابش مادون قرمز نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، در سرعت جریان هوای 0.4 m/s و توان تابش 500 W ، با افزایش دمای هوا از 40°C به 70°C ، زمان خشک‌کردن محصول از حدود 700 دقیقه به حدود 210 دقیقه کاهش یافت. یعنی با افزایش دما، زمان خشک‌شدن (از 580 دقیقه به 180 دقیقه برای توان تابش 1000 W) کاهش یافت. با افزایش دما، زمان خشک‌کردن به علت افزایش گرادیان حرارتی در داخل جسم و در نتیجه

افزایش سرعت تبخیر رطوبت محصول کاهش یافت. این امر به دلیل افزایش دمای محفظه خشک‌کن است که انتقال جرم را سریعتر انجام می‌دهد و باعث کاهش زمان خشک‌کردن می‌شود (Ponkham *et al.*, 2012).



شکل ۱- نمودار نسبت رطوبت در مقابل زمان برای دما و توان‌های مختلف خشک‌کردن میوه توت سفید

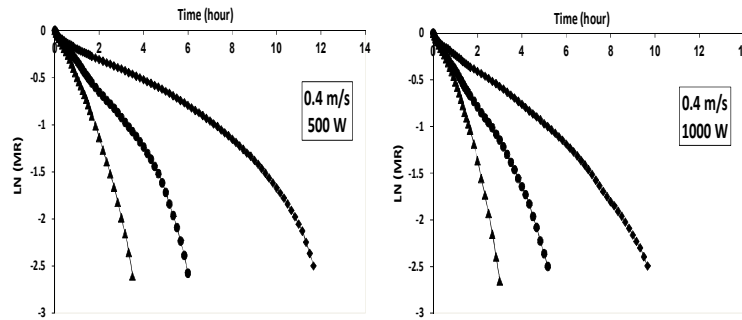
رطوبت میوه توت برای خشک‌کن مادون‌قرمز در شروع خشک شدن (d.b.) ۲/۴۳ بود. پس از بدست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در توان‌های تابش مادون‌قرمز، دماها و سرعت‌های مختلف خشک‌کردن به روش خشک‌شدن مادون‌قرمز، چهار مدل (دمیر و همکاران، میدلی و همکاران، وانگ و سینگ و لجستیک) موجود در جدول (۱) بر منحنی‌های خشک‌شدن حاصل از داده‌های آزمایشی برازش داده شدند. سپس مدل‌های خشک‌شدن لایه نازک مختلف با توجه به مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE ارزیابی شدند و مدل بهتر بر اساس مقادیر بیشتر R^2 و مقادیر کمتر χ^2 و RMSE انتخاب شد. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ارائه شده، نشان داد که تقریباً همه‌ی مدل‌ها مناسبند، اما در کل مدل Midilli *et al.* فرآیند خشک‌شدن لایه نازک توت را در روش مادون‌قرمز، با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها، پیش‌بینی کرد. ضرایب و شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های موجود در جدول (۲) برای روش خشک‌شدن با خشک‌کن مادون‌قرمز به تفکیک آورده شده است.



جدول ۲- نتایج آماری مدل‌های خشک کردن میوه بنه

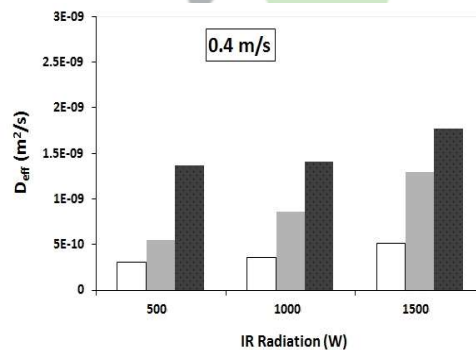
Model	Temperature (°C)- Microwave power (W)	R^2	χ^2	RMSE
		0.4 m/s	0.4 m/s	0.4 m/s
Demir <i>et al.</i>	۴۰-۵۰۰	۰/۹۹۶۸	۰/۰۱۷	۰/۱۲
	۵۵-۵۰۰	۰/۹۹۷۰	۰/۰۱۰۲	۰/۰۹۶۶
	۷۰-۵۰۰	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۱	۰/۰۳۹۷
	۴۰-۱۰۰۰	۰/۹۹۸۳	۰/۰۰۸۵	۰/۰۸۹۵
	۵۵-۱۰۰۰	۰/۹۹۸۶	۰/۰۰۴۰	۰/۰۶۰
	۷۰-۱۰۰۰	۰/۹۹۷۸	۰/۰۰۵	۰/۰۶
Midili <i>et al.</i>	۴۰-۵۰۰	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰	۰/۰۲۵۸
	۵۵-۵۰۰	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۴۴	۰/۰۶۳۵
	۷۰-۵۰۰	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۰۷	۰/۰۲۴۸
	۴۰-۱۰۰۰	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۱	۰/۰۳۶۳
	۵۵-۱۰۰۰	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۳۶۸
	۷۰-۱۰۰۰	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۱	۰/۰۳۹۴
Logestic	۴۰-۵۰۰	۰/۹۹۲۰	۰/۰۴۴۴	۰/۲۰
	۵۵-۵۰۰	۰/۹۹۵۲	۰/۰۱۶	۰/۱۲۴۳
	۷۰-۵۰۰	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۱۳	۰/۰۳
	۴۰-۱۰۰۰	۰/۹۹۶۰	۰/۰۲۰۱	۰/۱۳۸۷
	۵۵-۱۰۰۰	۰/۹۹۷۸	۰/۰۰۷۱	۰/۰۸۰۶
	۷۰-۱۰۰۰	۰/۹۹۹۳	۰/۰۰۱۴	۰/۰۳۵۴
Two- term	۴۰-۵۰۰	۰/۹۹۷۶	۰/۰۱۲۴	۰/۱۰۸۶
	۵۵-۵۰۰	۰/۹۹۴۰	۰/۰۲۰۷	۰/۱۳۷۷
	۷۰-۵۰۰	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۴۲
	۴۰-۱۰۰۰	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۶۶	۰/۰۷۸۸
	۵۵-۱۰۰۰	/۹۹۷۰	۰/۰۰۹۴	۰/۰۹۲۳
	۷۰-۱۰۰۰	۰/۹۹۷۶	۰/۰۰۵۱	۰/۰۶۶۴

شکل (۲) نمودار Ln(MR) را نسبت به زمان (ساعت) در شرایط مختلف دما و سرعت هوا و همچنین توان مادون قرمز نشان می‌دهد. محاسبات نشان داد که رابطه مستقیمی بین ضریب پخش رطوبت موثر با دما و سرعت هوای عبوری از محفظه خشک‌کن وجود داشت. با توجه به شکل (۳)، در سرعت ثابت هوا در محفظه خشک‌کن، میزان ضریب پخش رطوبت موثر با افزایش دمای هوا و افزایش توان تابش، افزایش یافت. پایین‌ترین دما، سرعت هوا و توان مادون قرمز سبب کمترین ضریب پخش رطوبت موثر شده و بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر در بالاترین دما و سرعت هوا و بیشترین توان مادون قرمز اتفاق افتاد.



شکل ۲- نمودار $\ln(MR)$ در برابر زمان (ساعت)

همانگونه که از شکل (۳) ملاحظه می‌گردد، در روش مادون‌قرمز با افزایش دما، توان تابش و سرعت هوا در فرآیند خشک‌شدن توت، ضریب پخش رطوبت موثر یک روند افزایشی دارد که تاثیر دما در این امر بارزتر است. دلیل وقوع این مسئله تاثیر بارز دما و سرعت هوا در ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر و افزایش ضریب مذکور می‌باشد. افزایش شدت تابش باعث افزایش گرادیان حرارتی لایه سطحی محصول و لایه‌ی زیرین آن شده و سرعت جریان رطوبت داخل محصول را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج، بیشترین میزان ضریب پخش رطوبت موثر به میزان $1/40 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ در دمای هوای 70°C و توان تابش 1000 W به دست آمد. همچنین کمترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر به میزان $2/96 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ در دمای هوای 40°C و توان تابش 500 W به دست آمد. نتایج مشابهی برای محصولات کشاورزی مانند بنه (Amiri Chayjan and Kaveh, 2013) و توت سیاه (Shi *et al.*, 2008) به دست آمد.



شکل ۳- نمودار ضریب پخش رطوبت موثر در دماها (40°C ، 55°C و 70°C) و توان های متفاوت

نتیجه گیری

رفتار خشک کردن توت سفید در خشک کن آزمایشگاهی مادون قرمز- جابجایی در دماهای $۴۰،۵۵$ و ۷۰ °C، سرعت $۰/۴$ m/s و توان مادون قرمز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ وات بررسی شد. دمای هوای ورودی و تون مادون قرمز عوامل مهمی در محاسبه زمان خشک شدن و میزان ضریب نفوذ موثر رطوبت در خشک شدن توت سفید بودند. همچنین برای پیش بینی رطوبت توت از چهار مدل ریاضی استفاده شد که نتایج نشان داد مدل Midilli *et al* بهترین مدل برای پیش بینی بود. همچنین مقادیری برای ضریب پخش رطوبت موثر پیدا شد که بیشترین مقدار آن $۱/۴۰ \times ۱۰^{-۹}$ m²/s و کمترین مقدار $۲/۹۶ \times ۱۰^{-۱۰}$ m²/s به دست آمد. بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر در دمای هوای ۷۰ °C و توان تابش ۱۰۰۰ W به دست آمد و کمترین مقدار در دمای هوای ۴۰ °C و توان تابش ۵۰۰ W به دست آمد.

منابع

- 1- Amiri Chayjan, R., and M. Kaveh. 2013. Physical parameters and kinetic modeling of fix and fluid bed drying of terebinth seeds. J. Food Proces Preservation, doi:10.1111/jfpp.12092. (in press)
- 2- Artnaseaw, A., S. Theerakulpisut, and C. Benjapiyaporn. 2010. Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying. Food and Bioproducts Processing 88 (2-3): 105-114.
- 3- Cakmak, G. and C. Yildi . 2011. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. Food and Bioproducts Processing, 89: 103-108.
- 4- Cihan A, K. Kahveci and O. Hacıhafızoglu. 2007. Modeling of intermittent drying of thin layer rough rice. Journal of Food Engineering 79: 293-298.
- 5- Crank, J., 1975. Mathematics of diffusion (2nd ed.) London: Oxford University Press.
- 6- Demir V, T. Gunhan and A. K. Yagcioglu. 2007. Mathematical modeling of convection drying of green table olives. Biosystems Engineering 98: 47-53.
- 7- Ercisli, S., and E. Orhan. 2007. Chemical composition of white (Morus alba), red (Morus rubra) and black (Morus nigra mulberry fruits. Food Chemistry 103(4): 1380-1384.
- 8- Huang, L., D. Wu, H. Jin, J. Zhang, Y. He, and C. Lou. 2011. Internal quality determination of fruit with bump surface using visible and near infrared spectroscopy and chemometrics: A case study with mulberry fruit. Biosystems Engineering 109: 377-384.
- 9- Khir, R., Z. Pan, A. Salim, B.R. Hartsough, and S. Mohamed. 2011. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. LWT - Food Science and Technology 44: 1126-1132.
- 10- Midilli, A., H. Kucuk, and Z. Yapar. 2002. A new model for single-layer drying. Drying Technology 20: 1503-1513.



- 11- Mota, C.L., C. Luciano, A. Dias, M.J. Barroca, and R.P.F. Guiné. 2010. Convective drying of onion: Kinetics and nutritional Evaluation. food and bioproducts processing 88: 115-123.
- 12- Ponkham, K., N. Meeso, S. Soponronnarit, and S. Siriamornpun. 2012. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. food and bioproducts processing 90: 155-164.
- 13- Junling, J.S., P. Zhangli, H.M. Tara, W. Delilah, E. Hirschberg, and D. Olson. 2008. Drying and quality characteristics of fresh and sugar infused blueberries with infrared radiation heating. Food Science and Technology, 41: 1962-1972.





Drying characteristics of mulberry using infrared dryer – convection dryer

Mohammad Kaveh^{1*}, Reza Amiri Chayjan² and Sasan Khayati¹

1. MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan
2. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan

In this study, thin layer drying of mulberry drying in an infrared- dryer was investigated experimentally. Product drying temperatures of 40, 55 and 70 °C and at a air velocity of 0.4 m/s and infrared power 500 and 1000 W will do. To select a suitable drying curve, experimental data were fitted to four models of thin layer drying. Among the mathematical models investigated, the model Midilli et al. The best model describing the thin layer drying behavior of berries with the highest correlation coefficient (R^2) and lowest value chi-square (χ^2) and root mean square error (RMSE) was selected. Effective moisture diffusivity of trials for thin layer drying of mulberry also showed that the air temperature 70°C and infrared power 1000 W most effective moisture diffusivity.

Keyword: Mulberry, Drying, Infrared dryer, hin layer model, moisture diffusivity