

مدل سازی ریاضی سینتیک خشک شدن لایه نازک انگور سفید بی دانه (تامسون)

یوسف عباسپور کلان¹، علی محمدنیکبخت²، مجید رهنما³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

2- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

3- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ملائانی اهواز

پست الکترونیکی: y.abbaspour@yahoo.com

چکیده

در پژوهش حاضر ضمن بررسی رفتار خشک شدن لایه نازک انگور سفید بی دانه رقم ارومیه در خشک کن هوای-داغ، مناسب ترین مدل ریاضی برای توصیف منحنی فرآیند خشک شدن آن معرفی شد. آزمایش تجربی خشک کردن در 4 سطح دمای هوای خشک کننده، 40، 50، 60، 70 درجه سلسیوس و سرعت هوای 1/2 متر بر ثانیه انجام شد. داده‌های تجربی با 10 مدل نیمه تئوری و تجربی بر اساس آماره های ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برازش شد. با توجه به نتایج، دمای هوای خشک کننده روی سرعت خشک شدن انگور اثر معنی داری داشت و با افزایش دما، از 50 به 60 درجه سلسیوس زمان خشک شدن انگور حدود 59 درصد کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد که فرآیند خشک کردن در مرحله با نرخ نزولی انجام پذیرفت. با مقایسه مدل‌های مورد ارزیابی جهت تعیین بهترین برازش منحنی فرآیند خشک شدن لایه نازک انگور، مدل میدلی و همکاران با ($R^2=0/997859$)، ($\chi^2=0/0001679$) و (RMSE=0/010234) بهترین برازش را داشت. تأثیر دمای هوای خشک کن ده روی ضرایب و ثوابت این مدل نیز بررسی شد.

کلمات کلیدی: انگور سفید بی دانه، خشک کن هوای داغ، سینتیک خشک کردن، مدل ریاضی.

مقدمه

انگور (vitis vinifera) با تولید سالانه 65486 میلیون تن یکی از محصولات با تولید سالانه بالا در دنیا می باشد [Jairaj et al, 2009]. ایران از لحاظ تولید انگور با سطح زیر کشت 302 هزار هکتار با احتساب درختان پراکنده انگور و تولید 1/7 میلیون تن در سال 1387 [بی نام، 1389] مطابق آمار سازمان فائو در سال 2009 بعد از کشورهای ایتالیا، چین، ایالات متحده آمریکا، فرانسه، اسپانیا، ترکیه و شیلی در مقام هشتم جهان قرار داشته متأسفانه در سال 2010 میلادی به رتبه دهم جهان نزول کرد [FAO]. تاریخچه تولید کشمش از انگور بوسیله خشک کردن زیر نور آفتاب به سال 1490 میلادی در کشور یونان برمی گردد [Sharma et al, 2007]. تولید جهانی کشمش در سال 1995 حدود 1072 هزار تن می باشد [Pangavhane et al, 1999]. افزایش مشکل غذا در اکثر کشورهای در حال توسعه به سبب عدم توانایی آنها در محافظت و ذخیره مازاد غذا مهم تر از تولید کم در این کشورهاست [Jairaj et al, 2009]. خشک کردن محصولات کشاورزی همواره یکی از قدیمی ترین و بهترین روشهای ذخیره مواد غذایی بوده است [Yaldiz et al, 2001]. خشک کردن به عنوان یک

فرآیند حرارتی تحت شرایط کنترل شده برای کاهش رطوبت موجود در مواد غذایی به روش تبخیر تعریف می شود [Fellows, 2000].

| فهرست اعلائم و اصطلاحات: | | | |
|--------------------------|--|---------------|----------------------------------|
| A_s | مساحت سطح محصول (m^2) | a, b, c, n | ضرایب تجربی مدل های خشک کردن |
| K_m | ضریب انتقال جرم بخار آب ($kg.s^{-1}.m^{-2}$) | k, k_0, k_1 | ثابت های تجربی مدل های خشک کردن |
| P_v | فشار بخار در محصول ($N.m^{-2}$) | N | تعداد مشاهدات |
| P_{va} | فشار بخار هوای خشک کننده ($N.m^{-2}$) | P | تعداد ثابت ها در مدل |
| R_0 | ثابت جهانی گازها ($J.mol^{-1}.k^{-1}$) | MR | نسبت رطوبت |
| ψ_F | رطوبت نسبی روی سطح جسم | $MR_{exp,i}$ | آمین نسبت رطوبتی مشاهده شده |
| ψ_K | رطوبت نسبی واسطه خشک کردن (هوا) | $MR_{pre,i}$ | آمین نسبت رطوبتی پیش بینی شده |
| t | زمان خشک شدن (h) | M | محتوی رطوبت محصول (% dry basis) |
| T | دما هوای خشک کننده ($^{\circ}C$) | M_e | رطوبت تعادلی محصول (% dry basis) |
| T_{abs} | دما مطلق (K) | M_0 | رطوبت اولیه محصول (% dry basis) |

که باعث کاهش فعالیت آبی و در نتیجه کاهش رشد میکروارگانیسم ها و افزایش ماندگاری مواد غذایی می شود. محافظت انگور با تبدیل آن به کشمش یک روش پر سود برای کشورهای تولید کننده انگور می باشد [Doymaz et al, 2002] که انگور خشک شده (کشمش) همانند سایر محصولات کشاورزی خشک شده دارای ارزش اقتصادی بالایی می باشد.

انگور یکی از محصولات مهم و استراتژیک شهرستان ارومیه می باشد. سطح زیر کشت این محصول 24749/7 هکتار و تولید سالیانه آن 66028/6 تن می باشد [بی نام، 1389] و هر سال حدود 20 درصد محصول تولیدی به کشمش تبدیل می شود. کشاورزان تولید کننده انگور در ارومیه محصولات را به روش سنتی و در زیر نور آفتاب خشک می کنند و مزیتی که این روش دارد رایگان و در دسترس بودن انرژی خورشیدی است اما این روش معایبی نیز دارد که از جمله این موارد می توان به نزول درجه و کاهش کیفیت محصول نهایی و در گاهی موارد حمله آفات حشرات، پرندگان و دام به محصول پهن شده در جلو آفتاب اشاره کرد. از طرفی برخی از محصولات غذایی را نمی توان به روش سنتی و در زیر نور طبیعی خشک کرد چون برخی از خصوصیات متبوع خود را از دست می دهند و در مواردی خشک کردن نامناسب باعث فساد و خرابی محصول می شود. بنابراین لازم است که انگور به روش مدرن و تحت شرایط کنترل شده خشک شود تا کیفیت محصول نهایی بهبود یافته و سود بیشتری در نتیجه فروش عاید تولید کننده گردد. برای طراحی و ساخت دستگاه لازم است مطالعه ای روی سینتیک خشک کردن آن انجام گیرد. محققان زیادی سینتیک خشک کردن محصولات کشاورزی را جهت یافتن بهترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک کردن بررسی کردند که از آن جمله می توان به خشک کردن قطعات سیب زمینی [Akpınar et al, 2003]، لوبیاسبز [Doymaz, 2005]، فلفل قرمز [Akpınar et al, 2003]، زردآلو [MirzaeeGhaale et al, 1388]، انجیر [Babalıs et al, 2006]، کدوتنبلی [Doymaz, 2007]، گیلاس شیرین [Doymaz et al, 2011]، و رقه های گوجه فرنگی [Sacilik et al, 2006] اشاره کرد.

متولی و همکاران به منظور ارزیابی روند خشک شدن لایه نازک دانه های انار داده های آزمایشگاهی را با 10 مدل نیمه تئوری و تجربی برازش دادند. آزمایش ها در سه تیمار شاهد، پیش تیمار ماکروویو با 100 و 200 و

شش سطح دمای 45، 50، 55، 60، 65 و 70 درجه سلسیوس و سه سطح سرعت 0/5، 1 و 1/5 متر بر ثانیه انجام شد و مدل میدلی بهترین برآزش را با داده های آزمایشگاهی نشان داد. آنها همچنین از شبکه های عصبی نیز برای تخمین میزان رطوبت دانه انار استفاده کردند [Motevali et al, 2010].

زمردیان و مرادی (2010) مدل سازی ریاضی سینتیک خشک شدن لایه نازک زیره سبز را در یک خشک کن خورشیدی در دو حالت تا بش (مختلط و غیرمستقیم) و شرایط مختلف خشک کردن بررسی کردند و در نهایت اعلام نمودند مدل تقریب پخش برای تابش مختلط و مدل میدلی برای تابش غیرمستقیم بهترین برآزش را با داده های آزمایشگاهی نشان داده است [Zomorodian et al, 2010].

یلدیز و همکاران (2001) مدل ریاضی خشک شدن لایه نازک انگور سلطانه (تامسون بی دانه) را در یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم فعال بررسی کردند. آنها برای تخمین منحنی خشک شدن لایه نازک انگور سلطانه در خشک کن خورشیدی 8 مدل ریاضی خشک شدن لایه نازک را بر اساس ضرایب تبیین مقایسه کردند و در نهایت مدل دو المانه را با ضریب همبستگی (r) 0/979 به عنوان بهترین مدل برای برآزش با داده های آزمایشگاهی معرفی کردند [Yaldiz et al, 2001].

به طور کلی از سه نوع مدل جهت توصیف مشخصات خشک کردن به روش لایه نازک محصولات کشاورزی استفاده می شود: مدل تئوری، مدل نیمه تئوری و مدل تجربی. مدل تئوری خصوصیات خشک شدن و کاربردپذیری آن را در شرایط کاری مختلف توصیف می کند اما برخی فرضیات مربوط به شکل هندسی محصول، ضریب پخش رطوبت و رسانش منجر به بروز برخی خطاها در پیش بینی فرایند خشک شدن می شود [Cakmak et al, 2011]. مدل تجربی از اصول نظری خشک کردن صرف نظر می کند و یک تجزیه و تحلیل رگرسیونی بین میانگین میزان رطوبت دانه و زمان خشک شدن آن ارائه می کند. روش نیمه تئوری میانگینی از روش تجربی و تئوری است [Yaldiz et al, 2001]. اساس مدل های نیمه تئوری قانون دوم Fick می باشد و مدل ها بر روی نتایج آزمایش های صورت گرفته، گسترش می یابد [Cakmak et al, 2011]. مدل های Page, Midilli, Henderson و... که در جدول 1 آورده شده است، از این روش استخراج شده اند. برای انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که بتوان بر اساس آن سینتیک خشک شدن انگور سفید بی دانه را بدست آورد به یک سری ویژگی های فیزیکی و حرارتی آن نیاز است که می توان براساس آنها دستگاه خشک کن جدیدی با کارایی مناسب طراحی کرد. هدف از این پژوهش بررسی سینتیک خشک شدن انگور سفید بی دانه رقم ارومیه در خشک کن لایه نازک آزمایشگاهی و ارائه بهترین مدل ریاضی خشک شدن لایه نازک انگور می باشد.

مواد و روشها

نحوه تهیه و آماده سازی نمونه ها

محصول انگور رقم سفید بی دانه ارومیه از باغات شهرستان ارومیه، استان آذربایجان غربی تهیه گردید. محصول در طول آزمایش درون یخچال در دمای 4 درجه سلسیوس نگهداری شد. پیش از آزمایش خشک کردن دانه های انگور بصورت دستی از خوشه جدا شده و به مدت 2 ساعت داخل پاکت پلاستیکی در محیط آزمایشگاه قرار داده شد تا با دمای محیط به تعادل برسد. پس از آماده شدن خشک کن و تنظیم آن در دماها و سرعت مورد نظر خشک کن به مدت نیم ساعت روشن می شد تا به حالت مطلوب و پایدار برسد [Zomorodian et al, 2010, Motevali et al, 2010 and Akpinar et al, 2003].

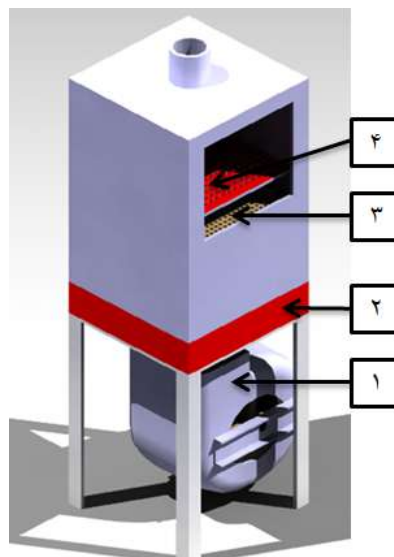
70 برای اندازه گیری محتوی رطوبت اولیه ی انگور، 3 نمونه 100 گرمی از محصول به روش آون خلاء در دمای 70 درجه سانتیگراد و فشار 250 میلی بار به مدت 6 ساعت خشک شدند [AOAC, 1990]. رطوبت اولیه بر پایه خشک از رابطه (1) محاسبه گردید.

$$M_{db} = \frac{W_o - W_d}{W_d} \quad (1)$$

که در آن، W_o و W_d به ترتیب جرم ماده خشک و جرم اولیه بر حسب گرم و M_{db} رطوبت نمونه بر پایه خشک می باشد [Ekechukwu, 1999].

روش خشک کردن با خشک کن آزمایشگاهی

به منظور پیدا کردن مناسب ترین مدل خشک شدن انگور سفید بی دانه ، روش خشک کردن لایه نازک انتخاب گردید. برای این منظور از یک خشک کن آزمایشگاهی لایه نازک استفاده شد. اجزاء اصلی خشک کن شامل یک دمنده گریز از مرکز برای تأمین جریان هوا، المنت های برقی (7 المنت جمعا به قدرت 7 KW) برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه خشک کن، سیستم کنترل (سرعت دمنده و دمای هوای خروجی) و محفظه خشک کن است. برای کنترل دمای عبوری از میکروکنترلر (PT 100) با دقت $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ، برای توزین نمونه ها از ترازوی دیجیتال مدل PTY A200 ساخت شرکت Shinko ژاپن با دقت $\pm 0.001 \text{ gr}$ و حداکثر وزن قابل اندازه گیری 200 gr و برای اندازه گیری سرعت جریان هوا از یک سرعت سنج دیجیتالی مدل 8355-M-GB ساخت شرکت Tsi ایالات متحده آمریکا با حساسیت $\pm 0.01 \text{ m/s}$ استفاده شد.



شکل 1. شماتیک خشک کن آزمایشگاهی: 1. فن گریز از مرکز 2. هیتر 3. خطی ساز جریان 4. سینی نمونه ها

آزمایش در 4 سطح دمایی 40، 50، 60 و 70 درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی 1/2 متر بر ثانیه انجام شد . پس از آماده شدن خشک کن و تنظیم آن در دماها و سرعت های مورد نظر، حبه های انگور در سینی توری آلومینیومی مربعی به ضلع 28 سانتی متر قرار داده شد. ضخامت دانه های انگور در هر آزمایش یک لایه و وزن هر

نمونه 100 گرم بود. با توجه به این که ثابت خشک شدن (K) در ابتدای آزمایش بزرگتر است و سپس به آهستگی کاهش می یابد [Sitkie, 1986]. برای بررسی بهتر سینتیک خشک شدن در طی فرآیند خشک شدن کاهش وزن نمونه ها در فواصل 30 دقیقه در 3 ساعت اول، 7 ساعت بعدی با فاصله 1 ساعت و بعد از آن با فاصله 2 ساعت انجام شد [Motevali et al, 2010].

مدل سازی ریاضی منحنی خشک شدن:

در بیشتر پژوهش ها، مدل سینتیک خشک کردن براساس شاخص رطوبت نسبی MR بیان می شود که علت آن کاهش پراکندگی و خوش فرم کردن داده ها است [Akpınar et al, 2003]. در طول آزمایش در جریان خشک کردن نمودار تغییرات رطوبت بر حسب زمان برای یک دمای ثابت هوای ورودی به محفظه خشک کن رسم می شود. منحنی که بدین ترتیب به دست می آید منحنی پیشروی خشک کردن نامیده می شود. در خشک کردن لایه نازک شکل منحنی را می توان با تقریب خوبی بوسیله مدل های ریاضی بیان نمود.

در مدل کردن خشک کردن به روش همرفتی فرض بر این است که نسبت حجم هوا به حجم محصول بی نهایت بزرگ است. بنابراین به جزء نوع و اندازه محصول، محتوای رطوبتی و دمای هوای خشک کننده اثر بقیه فاکتورهای موثر در نرخ خشک کردن ناچیز و قابل اغماض می باشد. با توجه به تئوری عمومی خشک کردن نرخ آب خارج شده از محصول با فاکتورهای همچون اختلاف فشارهای بخار بین هوای خشک کننده و سطح مرطوب، مساحت سطح محصول، ضریب انتقال جرم و سرعت هوای خشک کننده متناسب است [Ekechukwu, 1999 and Sitkie, 1986]

$$\frac{dM}{dt} = - \frac{P_V - P_{Va}}{(1/K_m A_s) R_0 T_{abs}} = - \frac{K_m A_s (P_V - P_{Va})}{R_0 T_{abs}} \quad (2)$$

عبارت $A_s (P_V - P_{Va})$ نیروی مؤثر خارجی ناشی از شرایط محیطی را نشان می دهد در حالی که عبارت $(1/K_m A_s)$ پارامتر مقاومتی محصول می باشد [Ekechukwu, 1999 and Sitkie, 1986]. فشار بخار جزئی را می توان بر حسب رطوبت نسبی بیان کرد [Ekechukwu, 1999].

$$\frac{dM}{dt} = -AP_s (\psi_F - \psi_K) \quad (3)$$

P_s فشار بخار اشباع در دمای معین هوا می باشد. تغییرات مقدار رطوبت در روی تکدمای جذب تقریباً خطی است و می توان نوشت [Sitkie, 1986].

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (4)$$

با جدا کردن متغیرها و انتگرال گیری از زمان در محدوده 0 و t و محتوای رطوبتی (M) در محدوده M_0 و M_e به معادله زیر می رسیم [Ekechukwu, 1999].

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (5)$$

طرف چپ معادله رطوبت نسبی (MR) را که مشخص کننده فرآیند خشک شدن است نشان می دهد. علامت منفی K نشان دهنده کاهش محتوای رطوبتی با زمان است که در ابتدای خشک کردن بزرگتر بوده و سپس به آهستگی کاهش پیدا می کند. هر قدر اثر کاهش k بیشتر باشد طول مدت خشک شدن طولانی تر خواهد بود [Sitkie, 1986]. اگر چه رطوبت نسبی بصورت رابطه (5) تعریف می شود. برای خشک شدن طولانی مدت M_e

نسبت به M_0 و M_t بقدری کوچک است که می توان از آن صرف نظر کرد. بنابراین $(M_t - M_e) / (M_0 - M_e)$ به $(M_t) / (M_0)$ ساده می شود [Motevali et al, 2010 and Zomorodian et al, 2010]. نرخ خشک شدن انگور نیز از رابطه زیر محاسبه شد [Akpinar et al, 2003 and Akpinar et al, 2003].

$$Drying Rate = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (6)$$

نسبت های رطوبتی به دست آمده طی آزمایشات مختلف به منظور بررسی و انتخاب مناسب ترین مدل برای سینتیک خشک شدن محصول با ده مدل از بین مدل های استاندارد ارائه شده در مقالات معتبر دنیا (جدول 1) برازش شدند.

جدول 1. مدل های ریاضی خشک شدن لایه نازک

| شماره مدل | نام مدل | معادله مدل | منبع |
|-----------|------------------|---|-----------------------------|
| 1 | نیوتن | $MR = \exp(-kt)$ | Mujumdar 1987 [16] |
| 2 | پیچ | $MR = \exp(-kt^n)$ | Akpinar, et al. 2003 [1] |
| 3 | پیچ اصلاح شده | $MR = \exp(-kt)^n$ | Yaldiz et al, 2001[20] |
| 4 | هندرسون و پابلیس | $MR = a \cdot \exp(-kt)$ | Henderson & pabis 1961 [12] |
| 5 | لگاریتمی | $MR = a \cdot \exp(-kt) + c$ | Yaldiz et al, 2001[20] |
| 6 | دوجمله ایی | $MR = a \cdot \exp(-kt) + c$ | Akpinar, et al. 2003 [2] |
| 7 | دوجمله ایی نمائی | $MR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$ | Akpinar, et al. 2003 [2] |
| 8 | وانگ و سینگ | $MR = 1 + at + bt^2$ | Yaldiz et al, 2001[20] |
| 9 | تقریب پخش | $MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$ | Yaldiz et al, 2001[20] |
| 10 | میدلی و همکاران | $MR = a \exp(-kt^n) + bt$ | Sacilik et al, 2006[18] |

محاسبه ضریب تعیین R^2 بیشینه یکی از ساده ترین ملاک ها برای تعیین بهترین مدل است که علاوه بر آن پارامترهای آماری نظیر کمترین مقدار مربع کای (χ^2) و ریشه می انگن مربعات خطا (RMSE) برای تعیین بهترین مدل انتخاب شدند که روابط آن ها به شرح زیر می باشد [Doymaz et al, 2011]:

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

نتایج و بحث

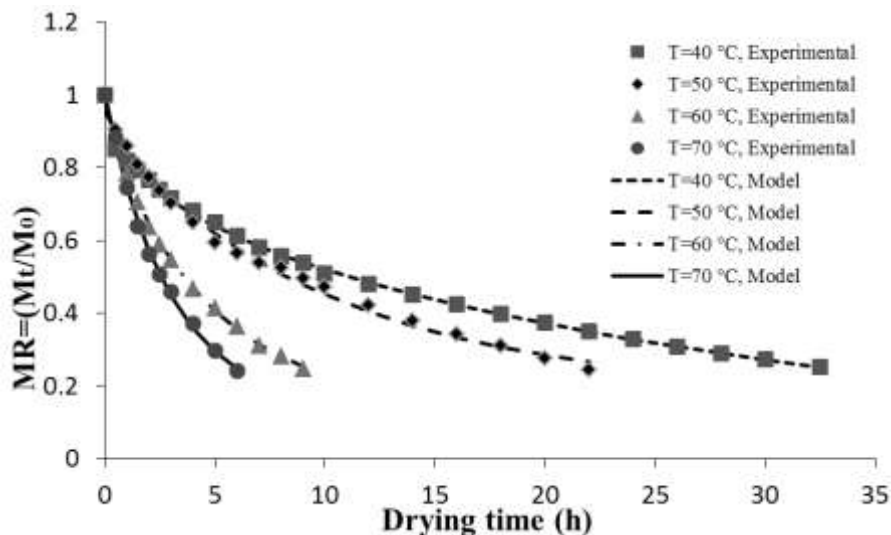
رطوبت اولیه محصول از میانگین سه تکرار 73/73 درصد بر پایه تر (2/81 بر پایه خشک) بدست آمد. که با نتایج ارائه شده حدود 71٪ تا 75٪ توسط ضرابی [ضرابی، 1377]، مقدار 2/6 تا 3/3 کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک توسط بلدیز و همکاران [Yaldiz et al, 2001] و مقدار 75٪ گزارش شده توسط الوارز و لکویس [Alvarez et al, 1986] قابل مقایسه است. محصول تا رطوبت نهایی 18٪ بر پایه تر خشک گردید [Doymaz, 2007]. محتوی رطوبتی انگور بطور پیوسته در طول دوره ی خشک شدن کاهش یافت. تغییرات جرم ناشی از کاهش رطوبت نمونه ها به محتوی رطوبتی بر پایه خشک تبدیل و ملاکی برای تعیین رطوبت آنی محصول در طول مدت زمان فرآیند خشک شدن بود و به محض اینکه وزن نمونه به وزن مربوط به رطوبت 18٪ می رسید فرآیند

خشک کردن متوقف می شود. رطوبت نسبی (MR) بصورت نسبت رطوبت نمونه ها در هر لحظه به رطوبت اولیه $MR = M / M_0$ بدست آمد. نسبت های رطوبتی به دست آمده طی آزمایشات مختلف به منظور بررسی و انتخاب مناسب ترین نرخ خشک شدن محصول با ده مدل از بین مدل های استاندارد رد ارائه شده در مقالات معتبر دنیا (جدول 2) برازش شدند. با توجه به جدول 2 و مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE مدل میدلی و همکاران در تخمین تغییرات رطوبت طی خشک شدن انگور سفید بی دانه بهترین برازش را داشت.

جدول 2. مقایسه دقت برازش مدل ها بر اساس متوسط شاخص های آماری در ده های مختلف

| Model N. | R^2 | χ^2 | RMSE |
|----------|----------|------------------------|-----------------|
| 1 | 0.983129 | 3.586×10^{-3} | 0.052995 |
| 2 | 0.997457 | 1.250×10^{-4} | 0.033060 |
| 3 | 0.983129 | 3.793×10^{-3} | 0.053034 |
| 4 | 0.976781 | 1.232×10^{-3} | 0.032092 |
| 5 | 0.991554 | 4.465×10^{-4} | 0.018037 |
| 6 | 0.976781 | 1.359×10^{-3} | 0.032092 |
| 7 | 0.985716 | 3.363×10^{-3} | 0.043135 |
| 8 | 0.974411 | 2.987×10^{-3} | 0.032 |
| 9 | 0.984668 | 3.570×10^{-3} | 0.04951 |
| 10 | 0.997859 | 1.679×10^{-4} | 0.010234 |

منحنی فرآیند خشک شدن براساس رطوبت نسبی در دمای مختلف برای داده های آزمایشگاهی و داده های حاصل از مدل میدلی و همکاران به عنوان بهترین مدل برای انگور سفید بی دانه رقم ارومیه در شکل 2 نشان داده شده است. مطابق شکل داده های آزمایشگاهی و داده های حاصل از مدل بسیار به هم نزدیک بوده بطوریکه منحنی حاصل از داده های آزمایشگاهی و داده های حاصل از مدل روی یکدیگر منطبق شدند. افزایش دما سرعت خروج رطوبت از حبه های انگور را افزایش داده و موجب روند کاهشی قابل ملاحظه ایی در منحنی های بدست آمده از تغییرات رطوبت نسبی به زمان می شود و یک رابطه معکوس بین دمای خشک شدن و زمان خشک کردن وجود دارد [Akpınar et al, 2003]. همچنین افزایش دما موجب افزایش شیب منحنی های بدست آمده می شود که نشان دهنده ی نرخ بالای خشک شدن می باشد. در ساعات اولیه خشک شدن کاهش رطوبت سریع تر است [Yaldiz et al, 2001]. ولی در ساعات بعدی به سبب اینکه رطوبت باید از قسمت های داخلی انگور به سطح بیرونی برسد و سپس تبخیر گردد کاهش رطوبت کند می شود. زمان رسیدن به محتوی رطوبت نهایی 18٪ از محتوی رطوبت اولیه برای دماهای مختلف هوای خشک کننده بین 6 تا 32/5 ساعت بدست آمد.

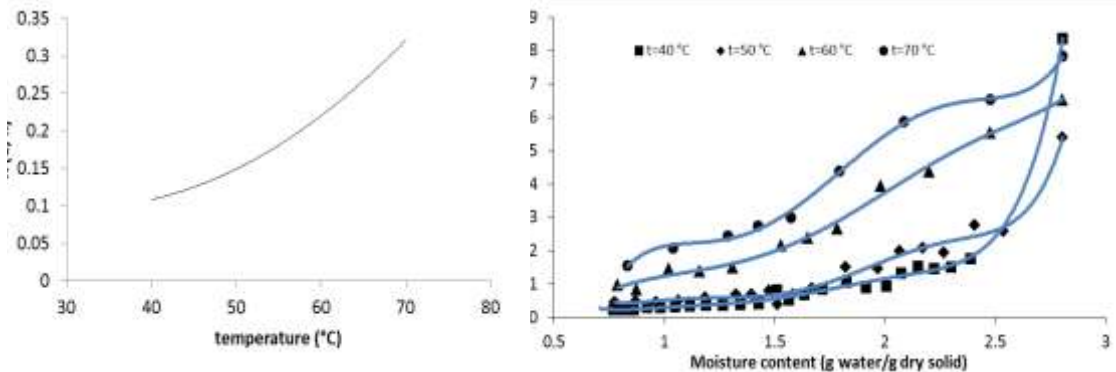


شکل 2. منحنی پیشروی خشک شدن لایه نازک انگور سفید بی‌دانه در سرعت هوای ثابت 1/2 متر بر ثانیه و دماهای مختلف برای داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل میدلی و همکاران

نرخ خشک شدن انگور از رابطه 6 محاسبه شد. منحنی تغییرات نرخ خشک شدن به محتوی رطوبتی در (شکل 3. الف) نشان داده شده است. فرآیند خشک کردن انگور در نرخ نزولی انجام شد و خشک کردن با نرخ ثابت دره بیچ یک از منحنی‌های خشک شدن انگور مشاهده نشد. مشاهدات محققان قبلی نیز این پدیده را برای انگور تأیید می‌کند [Pangavhane et al, 1999 and Yaldiz et al, 2001]. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دما نرخ خشک شدن نیز افزایش می‌یابد. این افزایش به سبب افزایش پتانسیل انتقال حرارت بین هوا و انگور است که گرمای نهان تبخیر لازم برای تبخیر آب از انگور را تأمین می‌کند. تأثیر دما بر نرخ خشک شدن توسط محققین مختلف نیز گزارش شده است [Akpınar et al, 2003, Akpınar et al, 2003, Pangavhane et al, 1999]. نرخ خشک شدن همچنین به مقدار محتوی رطوبتی محصول بستگی دارد، هر چه محتوی رطوبتی زیادتر باشد، فرآیند خشک شدن با نرخ بزرگتری انجام می‌شود [Akpınar et al, 2003 and Yaldiz et al, 2001]. وقتی که محتوی رطوبتی محصول کمتر از محتوی رطوبت بحرانی باشد، نرخ انتقال رطوبت از داخل محصول کمتر از نرخ انتقال بخار آب به هوای اطراف خواهد شد و در نتیجه از فشار جزئی بخار بالای سطح ماده نیز کاسته شده و نرخ خشک شدن نسبت به زمان به آهستگی کاهش می‌یابد [Fellows, 2000] چون نرخ انتقال جرم داخلی (مقاومت داخلی برای انتقال رطوبت) به سطح محصول که بستگی به تغییرات غلظت رطوبت دارد و عامل کنترل کننده فرآیند خشک شدن است کاهش می‌یابد. از طرفی در خشک کردن انگور پوشش مومی موجود روی پوست میوه نیز در کنترل فرآیند خشک شدن دخیل است [Doymaz, et al, 2011 and Doymaz, et al, 2002]

وقتی هوا گرم می‌شود می‌تواند بخار آب بیشتری را با خود حمل کند به عبارت دیگر رطوبت نسبی آن کاهش می‌یابد بنابراین محصولات با هوای گرمتر بهتر خشک می‌شوند. خشک شدن در مرحله با نرخ نزولی، اگر هوای خشک کننده با حرارت ثابت اعمال شود، دمای سطح محصول تا رسیدن به دمای حباب خشک هوای خشک کننده افزایش می‌یابد [Fellows, 2000] به همین دلیل بیشتر آسیب‌های حرارتی محصول در مرحله با نرخ نزولی اتفاق می‌افتد لذا برای کنترل حدود آسیب‌های حرارتی باید دمای هوا و در نتیجه نرخ خشک شدن کنترل شود در همین ارتباط دویماز و پالا (2002) گزارش کردند در دمای 80 درجه سلسیوس نرخ خشک شدن نسبت

به دماهای 50، 60 و 70 درجه سلسیوس خیلی بزرگتر است و آنها علت این امر را تخریب پوست حبه های انگور در این دما اعلام کردند [Doymaz, et al, 2002].



الف ب

شکل 3. الف. منحنی نرخ خشک انگور در سرعت هوای ثابت 1/2 متر بر ثانیه ب. منحنی تغییرات ضریب نرخ خشک شدن بر حسب دما

ثابت نرخ خشک شدن $K (h^{-1})$ و ضرایب a, b, c, n (بی بعد) برای مدل های ارائه شده در جدول 1 برای هر دماهای مختلف با استفاده از آنالیز رگرسیون غیر خطی محاسبه گردید. نتایج آنالیز رگرسیون غیر خطی و آنالیز های آماری انجام شدن روی مدل میدلی و همکاران برای دماهای 40، 50، 60 و 70 درجه سلسیوس در جدول 3 نشان داده شده است. با توجه به (شکل 3.ب) با افزایش دما ثابت نرخ خشک شدن k افزایش می یابد. افزایش ثابت خشک شدن با افزایش دما توسط محققین مختلف نیز گزارش شده است [Akpınar et al, 2003 and Pangavhane et al, 1999].

جدول 3. مقادیر ثوابت و ضریب مدل میدلی و همکاران به تفکیک دمای هوای خشک کننده

| R^2 | n | b | a | $k(h^{-1})$ | زمان خشک شدن | دما (درجه سلسیوس) |
|----------|----------|----------|----------|-------------|--------------|-------------------|
| 0/999019 | 0/511642 | -0/00246 | 0/994447 | 0/1853 | 32/5 | 40 |
| 0/995315 | 0/845824 | 0/00357 | 0/957652 | 0/1189 | 22 | 50 |
| 0/999202 | 0/841075 | 0/00571 | 0/998602 | 0/2507 | 9 | 60 |
| 0/9979 | 0/945413 | 0/01062 | 1/006488 | 0/3112 | 6 | 70 |

نتایج برازش داده ها نشان داد که مدل میدلی و همکاران می تواند رفتار خشک شدن انگور سفید بی دانه را توصیف کند اما تاثیر دمای هوای خشک کننده را نشان نمی دهد بنابراین مقادیر ثوابت مدل میدلی در مقابل دم ای هوای خشک کننده با استفاده از آنالیز رگرسیون غیر خطی بررسی شد و در نهایت ترکیب های با بالاترین ضریب تبیین در مدل نهایی استفاده شد. با توجه به نتایج آنالیز رگرسیون، مدل پذیرفته شده، ثوابت و ضرایب که تاثیر دمای هوای خشک کننده را در مدل دخیل می کنند بصورت زیر می باشد:

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

$$a = -2E - 0.0032T^2 - 0.1753T + 4.1353$$

$$R^2 = 1$$

$$k = 0.0002T^2 - 0.0095T + 0.2469$$

$$R^2 = 0.9268$$

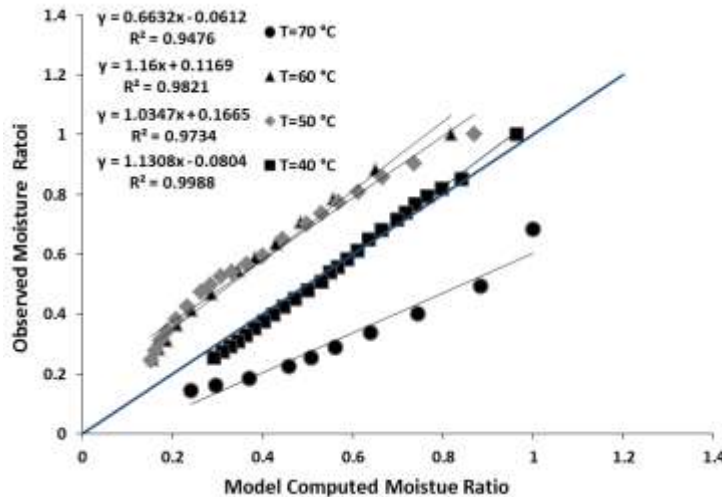
$$n = -0.0006T^2 + 0.0748T - 1.5612$$

$$R^2 = 0.9121$$

$$b = 0.0222 \ln(T) - 0.0824$$

$$R^2 = 0.9764$$

این مدل می توان رطوبت نسبی (MR) انگور سفید بی دانه در هر لحظه در طول فرآیند خشک کردن با دقت بالا تخمین بزند. برای ارزیابی مدل ارائه شده رطوبت نسبی محاسبه شده تحت شرایط معین خشک شدن با داده های حاصل از آزمایش مقایسه شدند (شکل 4).



شکل 4. مقایسه نسبت های رطوبتی بدست آمده از آزمایش و پیش بینی شده توسط مدل

منابع

- بی نام. (1389). نتایج طرح آمارگیری نمونه ایی محصولات باغی «سال 1387». وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه ریزی و اقتصادی، دفتر آمار و فناوری اطلاعات.
- ضرابی، م. (1377). تعیین و بررسی پارامترهای طراحی در خشک کردن انگور. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس. 155ص.
- Akpinar, E. K., Bicer, Y., & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59, 99-104.
- Akpinar, E., Midilli, A., Bicer, Y. (2003). Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Convection and Management*, 44, 1689-1705.
- Alvarez, p. & Leques, p. (1986). A semi-theoretical model for the drying of Thompson seedless grapes. *Drying technology*, 4(1), 1-17.
- AOAC (1990). Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- Babalıs, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., & Belessiotis, V. G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, 75, 205- 214.
- Cakmak, G., & Yildiz, C. (2011). The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and bioproducts processing*, 89, 103-108.
- Doymaz, I. (2005). Drying behavior of green beans. *Journal of Food Engineering*, 69, 161-165.

- Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 243-248.
- Doymaz, I., & Ismail, O. (2011). Drying characteristics of sweet cherry. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 31-38.
- Doymaz, I., & Pala, M. (2002). The effect of dipping pretreatment on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 52, 413-417.
- Ekechukwu, O.V. (1999). Review of solar-energy drying system I: an overview of drying principles and theory. *Energy Conversion & Management*, 40, 593-613.
- Fellows, P. (2000). *Food processing technology: principles and practice*. Second edition. Published by CRC press.
- FAO Statistics Division. Available at <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- Henderson, S. M. & Pabis, S. (1961). Grain drying theory .I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169-174.
- Jairaj, K. S., Singh, S. P., & Srikant, K. (2009). A review of solar dryers developed for grape drying. *Solar Energy*, 83, 1698-1712.
- MirzaeeGhaale, E., Rafiee, S., Keyhani, A., Emam-jomeh, Z., & Tahere Geravand, A. (1388). Modeling of thin layer drying of apricot. *EJFPP.*, vol. 1 (2), 139-150. (in fari)
- Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., Kazemi, M., Nikbakht, A. M. (2010). Drying of Pomegranate Arils: comparison of prediction from mathematical models and neural networks. *International Journal of Food Engineering*, (volume 6, issue 3, Article 15).
- Mujumdar, A. s. (1987). *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker.
- Murthy, M.V.R. 2009. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (4), 835-844.
- Pangavhane, D. R., Sawhney, R. L., & Sarvahandia, P. N. (1999). Effect of various dipping pretreatment on drying kinetics of Thompson seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 39, 211-216.
- Sacilik, K., Keskin, R. & Elicin, A. K. (2006). Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73, 231-238.
- Sharma, A.K. & Adulse, P.G., (2007). *Raisin production in India*. NRC for Grapes, Pune.
- Sitkie, G. (1986). *Mechanics of agricultural materials*. Technology & Engineering, 487 pages.
- Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.
- Zomorodian, A., & Moradi, M. (2010). Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for cuminum cyminum. *J. Agr. Sci. Tech.* (Vol. 12, pp. 401-408).