

مدل سازی عددی انتقال رطوبت طی خشک کردن خرماى رقم برحی

سمیه بهفر^{a*}، ناصر همدمی^b، غلامحسین اسدی^c^a دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی - علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران^b استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان^c استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۲/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۸/۱/۲۵

چکیده

مقدمه: با توجه به تأثیر خشک کردن بر خواص فیزیکوشیمیایی و کیفی محصول، با استفاده از مدل سازی عددی انتقال رطوبت، می توان سینتیک تغییرات رطوبت طی خشک کردن را پیش بینی و برای رسیدن به محصولی با کیفیت مطلوب کنترل نمود. در این تحقیق میوه خرما به عنوان یکی از محصولات کشاورزی مهم در ایران، در طی خشک کردن مورد مطالعه قرار داده شد.

مواد و روش ها: خرما رقم برحی با استفاده از جریان هوای گرم با سرعت هوای ۱/۵ m/s در دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰°C در خشک کن قفسه ای خشک گردید. برای توصیف انتقال رطوبت دو بعدی داخل خرما طی خشک کردن، از مدل مکانیسمی توسعه داده شده بر مبنای حل عددی قانون دوم فیک با روش explicit در نرم افزار Matlab استفاده گردید.

یافته ها: مقایسه داده های تجربی سینتیک خشک کردن با نتایج تئوریک پیش بینی شده توسط مدل، نشان داد که همبستگی مناسبی ($r=0.99$) مابین آن ها وجود دارد. نتایج نشان داد که مدل توسعه داده شده قادر است اولاً پروفیل های رطوبت در داخل خرما و ثانیاً میزان کاهش رطوبت محصول را طی فرآیند خشک کردن پیش بینی نماید.

نتیجه گیری: مدل عددی توسعه یافته قادر است پدیده انتقال رطوبت در درون میوه خرما را طی فرآیند خشک کردن پیش بینی نموده و بدین ترتیب امکان کنترل فرایند و تولید محصولی با کیفیت بالا فراهم می آید.

واژه های کلیدی: انتقال رطوبت، خرما، خشک کردن، رقم برحی، مدل سازی

مقدمه

خرما یکی از محصولات مهم کشاورزی و یکی از منابع عمده تحصیل ارز برای کشور می باشد. میوه خرما^۱ از نظر گیاه‌شناسی یک میوه سته از خانواده پالم^۲ می باشد که از هسته، میان بر (مزوکارپ) گوشتی و پوست میوه (برون بر یا اپی کارپ) تشکیل شده است. میوه خرما یک منبع غنی از کربوهیدرات‌ها (عمدتاً شامل قندهای ساده و فیبر)، ویتامین‌ها و عناصری مانند فسفر، آهن، پتاسیم و کلسیم است (Barreveld, 1993).

مراحل برداشت خرما شامل مرحله خلال (خارک)، رطب و تمار می باشد. در مرحله خلال، میوه از نظر فیزیولوژیکی رسیده، سخت و شکننده با رطوبت ۸۵-۵۰ درصد (بر مبنای وزن مرطوب) است. رنگ آن زرد کم رنگ یا قرمز است. میوه خرما در این مرحله قابلیت فساد بالایی دارد. برخی یکی از بهترین ارقام خرما برای برداشت و عرضه به بازار در مرحله خلال می باشد. خارک این رقم دارای میزان نسبتاً بالایی قند و تانن کم می باشد، در نتیجه طعم گس نداشته و بیشتر مورد مصرف مردم مناطق خرما خیز قرار می گیرد. در مرحله رطب رنگ میوه خرما، قهوه‌ای کم رنگ و رطوبت آن ۴۵-۳۰ درصد است. در مرحله تمار، رنگ آن کهربایی تا قهوه‌ای تیره، با رطوبت ۲۵-۱۰ درصد (بر مبنای وزن مرطوب) و بافت نرم تا سفت و خشک می باشد. میوه در این مرحله قابلیت نگهداری به مدت طولانی را دارا می باشد. میوه‌هایی که در مرحله تمار برداشت می شوند، به دلیل رطوبت پایین، فسادپذیری آن‌ها کاهش یافته و شرایط مناسبی برای رشد میکروارگانیسم‌ها وجود ندارد (اکبری، ۱۳۸۵). رقم برخی در مرحله خلال دارای ۶۴ درصد رطوبت، ۱۷ درصد قند احیاکننده و ۶۲ درصد ساکارز می باشد (سرائی، ۱۳۷۵).

میزان رطوبت خرما در مراحل مختلف رشد متفاوت است. میزان رطوبت برای ورود به مرحله خودماندگاری حدود ۲۴ درصد بر مبنای وزن مرطوب است. ماندگاری خرما، به دلیل فعالیت آبی بالای آن در مرحله خلال، محدود است. در نتیجه، خشک کردن خرما برای افزایش ماندگاری آن می تواند مفید باشد. خشک کردن عبارت از حذف بخشی از آب

موجود در محصول تحت شرایط کنترل شده (دما و سرعت جریان هوای گرم) می باشد. خشک کردن در دماهای بالا موجب از بین رفتن قارچ‌ها، باکتری‌ها و سایر آفات از جمله حشرات شده و با کاهش رطوبت، مانع تخمیر، ترش شدن و شکرک‌زدگی آن می شود (سرائی، ۱۳۷۵).

در تحقیق Falade و همکاران تأثیر دمای هوای خشک کن و وارپته بر فرآیند خشک کردن و جذب مجدد آب خرما بررسی شد. بر اساس این تحقیق خشک کردن خرما در مرحله سرعت نزولی انجام می شود (Falade & Abbo, 2007).

کیفیت ماده غذایی طی خشک کردن می تواند به وسیله دامنه وسیعی از عوامل مانند دما، رطوبت نسبی، سرعت خشک کردن و ویژگی های ماده خشک شونده همانند ضریب انتقال جرم موثر درونی (دیفوزیویته موثر D_{eff}) تحت تأثیر قرار گیرد. توسعه ابزاری برای شبیه‌سازی پدیده‌های انتقال (حرارت و جرم) به‌عنوان تابعی از عوامل بیرونی و درونی طی خشک کردن مواد غذایی، پیش‌بینی رفتار محصول خشک، کنترل بهتر فرآیند و رسیدن به کیفیت بالای محصول را امکان پذیر می سازد. یک روش مفید برای درک پدیده‌های درگیر طی فرآیندهای متفاوت اعمال شده روی مواد غذایی و پیش‌بینی رفتار ماده تحت حالت‌های مختلف، مدل سازی است (اشرف جهانی، ۱۳۸۱). مطالعه معدود کارهای منتشر شده در زمینه خشک کردن خرما نشان می دهد که پژوهش جامعی در این زمینه صورت نگرفته است. با توجه به جایگاه مهم خرما در اقتصاد کشور و تحقیقات ناچیز انجام شده بر روی خشک کردن آن، بررسی سینتیک خشک کردن خرما و تعیین ضریب دیفوزیون آن می تواند ما را در پیش‌بینی مواردی مانند زمان لازم برای کاهش رطوبت تا میزان رطوبت مورد نظر و انتخاب دمای مناسب هوا برای تولید محصولی با کیفیت کمک نماید.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق خارک خرماي وارپته برحي، در شهریور ماه ۱۳۸۷ از نخلستانی در منطقه آبادان تهیه گردید. نمونه‌ها پس از انتقال تا زمان مصرف در سردخانه ۲۰- درجه سانتی‌گراد در کارگاه صنایع

- اندازه‌گیری میزان رطوبت

برای اندازه‌گیری میزان رطوبت، مقدار مشخصی نمونه در آونی با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفت (A.O.A.C., 1990). این آزمایش در مورد نمونه‌های اولیه قبل از خشک کردن و نمونه‌هایی که در طی خشک کردن در فواصل زمانی معین برداشت شده بودند در سه تکرار انجام شد.

- مدل سازی ریاضی

- توسعه مدل

در این تحقیق مدلی ریاضی برای انتقال دو بعدی رطوبت طی فرآیند خشک کردن خرما با استفاده از حل عددی قانون دوم Fick با استفاده از روش finite difference (بر مبنای شمای explicit) بر روی نرم افزار MATLAB توسعه داده شد. برای توسعه مدل، فرض شده است که شکل هندسی خرما به صورت دو استوانه متحدالمرکز با ابعاد مختلف برای هسته و گوشت خرما می‌باشد. مقدار رطوبت در سرتاسر نمونه قبل از خشک کردن یکنواخت و برابر با مقدار ثابتی است. به محض قرار گرفتن نمونه داخل خشک‌کن، تبخیر در دو سطح بالا و پایین نمونه رخ می‌دهد که شدت آن توسط ضریب تبادل جرم (k_g) و گرادیان فشار جزئی بخار آب مابین سطح نمونه و هوای گرم خشک‌کن کنترل می‌گردد. به دنبال تبخیر در سطح، انتقال دو بعدی نا پایای رطوبت در داخل نمونه از مرکز به سمت سطح خرما رخ می‌دهد و آب از داخل به طرف سطح در شرایط ایزوترمال منتشر می‌شود (Falade & Abbo, 2007; Ozisik, 1985).

سیستم معادلات مورد استفاده برای توصیف انتقال رطوبت عبارت است از:

الف) معادله اصلی

(۱)

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) + D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right)$$

که در این رابطه W مقدار رطوبت مطلق نمونه و D ضریب نفوذ آب می‌باشد.

ب) شرایط مرزی

غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان نگهداری شدند. حدود یک ساعت قبل از انجام فرآیند خشک کردن، نمونه‌های خرما از سردخانه خارج شده و پس از رفع انجماد با مایکروفر، در خشک‌کن قرار داده شدند. برای این که تمامی نمونه‌ها تا زمان خشک کردن به صورت یکنواخت باقی بماند، نمونه‌ها منجمد شدند و برای این که در هنگام یخ زدایی توزیع دمایی یکنواخت باشد، از مایکروویو برای این منظور استفاده شد.

- خشک کردن نمونه‌های خرما به صورت لایه نازک در خشک‌کن قفسه‌ای

آزمایشات خشک کردن با استفاده از یک خشک‌کن قفسه‌ای مجهز به کنترل‌کننده‌های دما و سرعت جریان هوا انجام گرفت. هوای محیط توسط یک فن مکیده شده و بعد از عبور از روی المنت‌های الکتریکی به داخل کانال خشک‌کن دمیده شد. خشک کردن نمونه‌های خرما به صورت با پوسته و بدون پوسته در دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان هوای ۱/۵ متر بر ثانیه تا رسیدن به مقدار رطوبت ۲۵ درصد (بر اساس وزن مرطوب) در سه تکرار انجام شد. خرماهای کامل برای خشک شدن به صورت لایه نازک بر روی یک ورق آلومینیومی روی سینی خشک‌کن که بطور مستقیم به یک ترازوی مرتبط به رایانه متصل بود قرار داده شده و وزن سینی حاوی خرماها طی خشک کردن در رایانه ثبت می‌شد. به این ترتیب وزن نمونه در طی خشک کردن به طور مداوم قابل ثبت بود جریان هوای گرم به طور موازی با سطح نمونه‌ها دمیده می‌شد. هم‌زمان بخش دیگری از نمونه‌های خرما برای تامین نمونه‌های لازم برای آزمایشات کیفی مورد نظر در طی خشک کردن به صورت لایه نازک بر روی سینی دیگری بدون اتصال به ترازو در درون خشک‌کن قرار می‌گرفتند. خرماهای نمونه‌برداری شده در فواصل زمانی معین از سینی مذکور در کیسه‌های پلی اتیلنی غیر قابل نفوذ به رطوبت تا زمان انجام آزمایشات نگهداری می‌شدند. قبل از قرار گرفتن نمونه‌ها در خشک‌کن، دما و سرعت جریان هوای مورد نظر در خشک‌کن اعمال می‌گردید.

$$z = 0 \Rightarrow \frac{\partial W(r, 0, t)}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

$$r = 0 \Rightarrow \frac{\partial W(0, z, t)}{\partial r} = 0 \quad (15)$$

ج) شرایط اولیه

$$W(r, z, 0) = W_0 \quad (16)$$

علائم و اختصارات:

W : مقدار رطوبت مطلق (کیلوگرم ماده خشک

کیلوگرم آب)

D : ضریب نفوذ رطوبت (ثانیه/مترمربع)

H : ارتفاع (متر)

t : شعاع (متر)

Ea : انرژی اکتیواسیون (وابسته به خصوصیات

شیمیایی ماده) (مول/ژول)

R : ثابت عمومی گازها (مول . درجه کلوین/ژول)

(R = 8/314510)

T : دما (درجه کلوین)

K_m : ضریب انتقال جرم در سطح (ثانیه/متر)

K_g : ضریب انتقال جرم در سطح

(پاسکال.مترمربع.ثانیه)/کیلوگرم)

t : زمان (ثانیه)

X : جزء جرمی (کیلوگرم محصول/کیلوگرم

ρ : دانسیته (مترمکعب/کیلوگرم)

P : فشار جزئی بخار آب (پاسکال)

v : ویسکوزیته سینماتیک (ثانیه/مترمربع)

L : ابعاد سطح (متر)

اندیس ها:

d : خرما

st : هسته

DM : ماده خشک

P : محصول (DM + s + w)

w : آب

a : محیط

s : سطح

sat : اشباع

$$z = \frac{H_{st}}{2} \Rightarrow -D_{st} \frac{\partial W(r, H_{st}/2, t)}{\partial z} = -D_d \frac{\partial W(r, H_{st}/2, t)}{\partial z} \quad (2)$$

$$z = \frac{H_d}{2} \Rightarrow -D_d \rho_{app,s} \frac{\partial W(r, H_d/2, t)}{\partial z} = k_g (P_s(T_s) - P_a(T_a)) \quad (3)$$

$$r = r_{st} \Rightarrow -D_{st} \frac{\partial W(r_{st}, z, t)}{\partial r} = -D_d \frac{\partial W(r_{st}, z, t)}{\partial r} \quad (4)$$

$$r = r_d \Rightarrow -D_d \rho_{app} \frac{\partial W(r_d, z, t)}{\partial r} = k_g (P_s(T_s) - P_a(T_a)) \quad (5)$$

$$D_d = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{RT} \right) \quad (6)$$

$$D_{st} = 1e^{-12} \quad (7)$$

$$P_s(T_s) = a_w P_{sat}(T_s) \quad (8)$$

$$P_a(T_a) = RH_a P_{sat}(T_a) \quad (9)$$

$$k_g = \rho_{air} \frac{M_w}{M_{air} P_{atm}} k_m \quad (10)$$

k_m با استفاده از روش اعداد بدون بعد بر مبنای رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Sh_x = 0.332 Sc^{1/3} Re_x^{1/2} \quad (11)$$

$$Sh_x = \frac{K_m x}{D} \quad (12)$$

$$Sc = \frac{v}{D} \quad (13)$$

جایی که $D = 0.0000159 \frac{m^2}{s}$ و v ویسکوزیته سینماتیک هوای گرم می باشد.

خشک کردن خرما در دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به رطوبت ۲۵٪ (بر اساس وزن مرطوب) انجام شد، منحنی سینتیک افت رطوبت بر اساس نرخ رطوبت در دماهای مختلف رسم گردید. نمودارهای ۱ و ۲ سینتیک افت رطوبت طی خشک کردن خرما با و بدون پوسته در دماهای مختلف را نشان می‌دهند.

نمودارهای ۳ و ۴ شدت افت رطوبت از خرما را طی خشک کردن آن با و بدون پوسته به عنوان تابعی از زمان و نمودارهای ۵ و ۶ به عنوان تابعی از رطوبت نشان می‌دهند.

- تایید مدل عددی توسعه داده شده

چنانچه در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد برای توصیف انتقال دو بعدی رطوبت طی فرآیند خشک کردن خرما در خشک‌کن قفسه‌ای، از مدل توسعه داده شده با استفاده از حل عددی قانون دوم فیک بر مبنای روش تفاضل محدود بر روی نرم‌افزار مطلب استفاده گردید. برای توصیف انتقال رطوبت در شرایط مرزی، از روابط مربوط به محاسبه ضریب انتقال حرارت در یک جریان همرفت طبیعی بر روی استوانه استفاده شد. برای تایید مدل از مقایسه مقادیر

مدل ریاضی توسعه داده شده قادر است بر مبنای ورودی‌های مدل (خصوصیات هوای گرم خشک‌کن، ابعاد اولیه محصول، خواص فیزیکی محصول، دما و رطوبت اولیه نمونه، تعداد گره‌ها در فاصله شعاعی و محوری نمونه، زمان کل خشک‌کردن)، مقادیر رطوبت مطلق نمونه را به عنوان تابعی از زمان و مکان، میزان فعالیت آبی در سطح نمونه، تغییرات رطوبت در قسمت‌های سطحی در جهت محوری و شعاعی به عنوان تابعی از مکان و افت کلی رطوبت طی خشک‌کردن را برآورد نماید

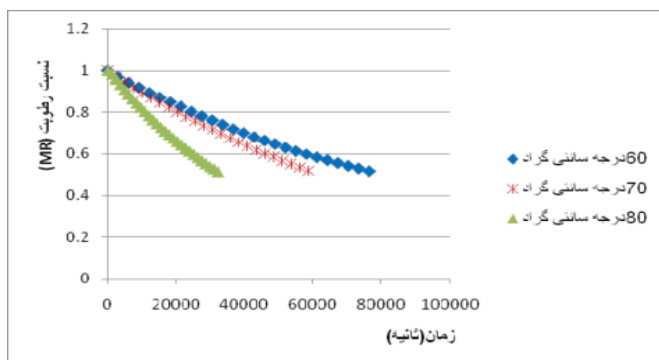
- تایید مدل

تایید مدل عددی توسعه داده شده به وسیله مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل تئوریک با داده‌های آزمایشگاهی (سینتیک افت رطوبت) طی فرآیند خشک کردن انجام گرفت

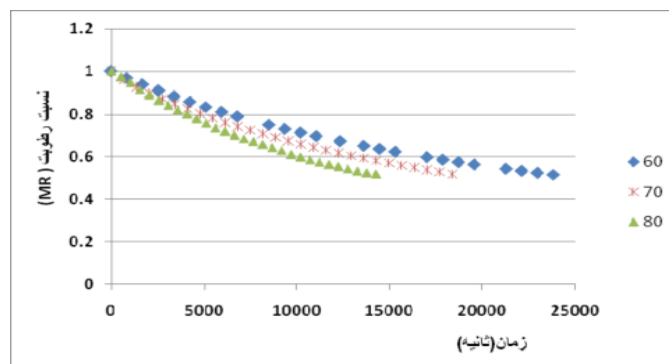
یافته‌ها

- منحنی‌های خشک‌کردن

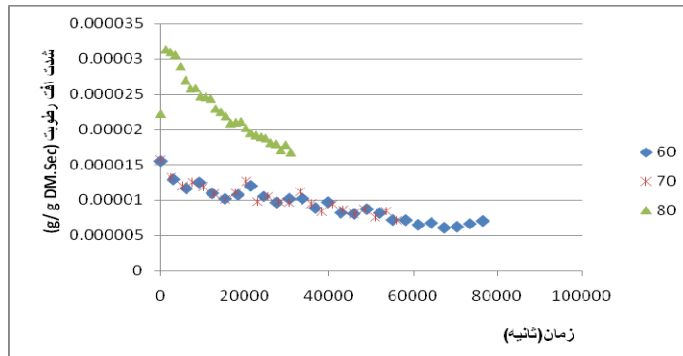
پس از این که تمامی مراحل آزمایشات مربوط به



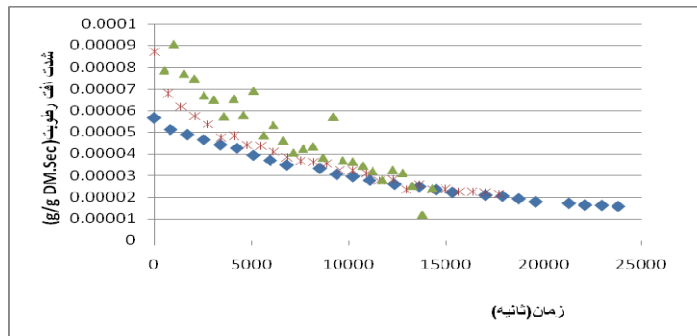
نمودار ۱- سینتیک افت رطوبت طی خشک کردن خرما با پوسته در دماهای مختلف



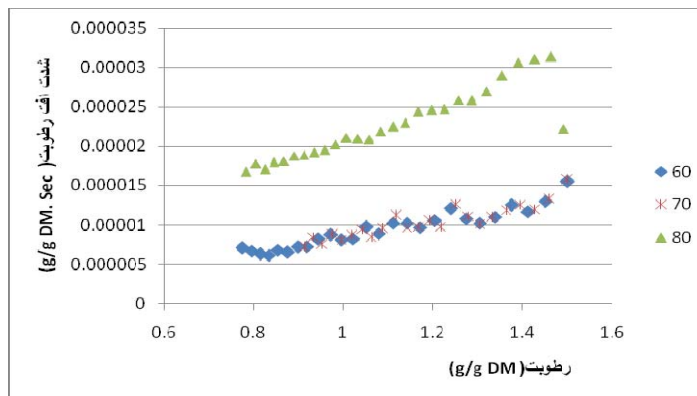
نمودار ۲- سینتیک افت رطوبت طی خشک کردن خرما بدون پوسته در دماهای مختلف



نمودار ۳- شدت افت رطوبت طی خشک کردن خرما با پوسته به عنوان تابعی از زمان



نمودار ۴- شدت افت رطوبت طی خشک کردن خرما بدون پوسته به عنوان تابعی از زمان



نمودار ۵- شدت افت رطوبت طی خشک کردن خرما با پوسته به عنوان تابعی از رطوبت

رطوبت در قسمت مرکزی و $W(1,M)$ پروفیل رطوبت در سطح شعاعی و $W(N,1)$ پروفیل رطوبت در سطح محوری خرما می‌باشد.

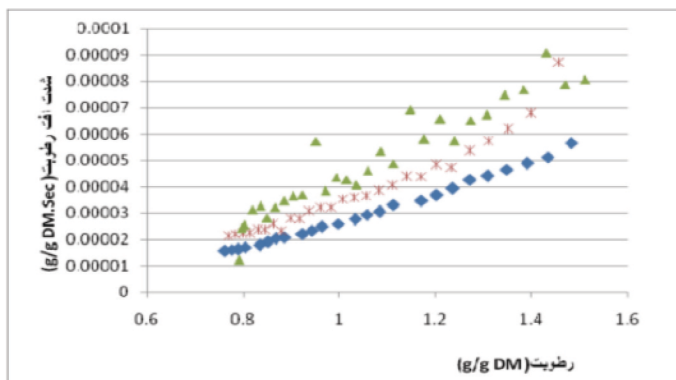
تغییرات فعالیت آبی در چند نقطه متفاوت از سطح خرما طی خشک کردن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در نمودار ۱۰ نشان داده شده است. $a_w(N,5)$ فعالیت آبی در سطح شعاعی، $a_w(N,M)$ فعالیت آبی در سطح محوری و $a_w(N,1)$ فعالیت آبی در محل تلاقی سطح محوری و شعاعی می‌باشد.

کاهش وزن تجربی و پیش‌بینی شده به وسیله مدل عددی بر مبنای ورودی‌های موجود در جدول ۱ استفاده گردید.

مقایسه مقادیر افت وزن تجربی و پیش‌بینی شده به وسیله مدل طی خشک کردن نمونه‌های خرما با پوسته در نمودارهای ۷ و ۸ نشان داده شده است.

نتایج مستخرج از مدل تایید شده

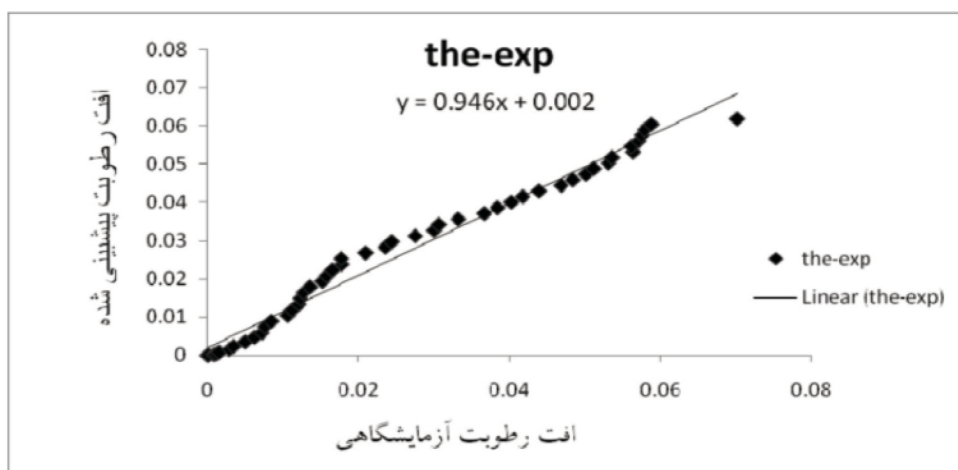
نمودار ۹ پروفیل‌های رطوبت مطلق در ۳ نقطه متفاوت خرما طی خشک کردن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. $W(1,1)$ پروفیل



نمودار ۶- شدت افت رطوبت طی خشک کردن خرما بدون پوسته به عنوان تابعی از رطوبت

جدول ۱- ورودی‌های مدل (طبق شرایط آزمایشگاهی)

۳۱۳/۱۵	دمای سطح (درجه کلون)	۲۱۵۰	زمان خشک کردن (ثانیه)
۱/۵	سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه)	۱/۸۵۷	رطوبت اولیه (کیلوگرم ماده خشک/کیلوگرم آب)
۱۵	تعداد گره‌های شعاعی	۰/۰۱۳۴	شعاع (متر)
۱۸	تعداد گره‌های محوری	۰/۰۳۴۴	ارتفاع خرما (متر)
۰/۳۳۰	وزن خرما (کیلوگرم)	۰/۰۰۴۱	شعاع هسته (متر)
۱۱۵۱	دانسیته خرما (متر مکعب/کیلوگرم)	۰/۰۱۸۴	ارتفاع هسته (متر)
۳۱۳/۱۵	حجم خرماها (متر مکعب)	۳۱۳/۱۵	دمای هوای خشک کن (درجه کلون)
	دانسیته/وزن		

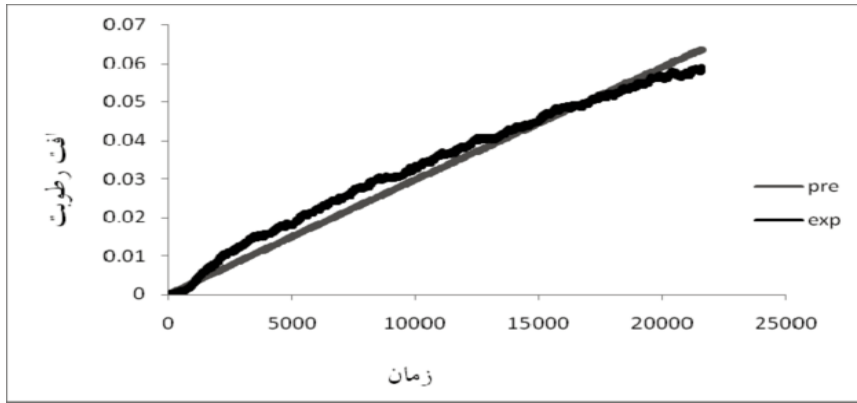


نمودار ۷- مقایسه مقادیر افت وزن تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل طی خشک کردن در دمای 70°C

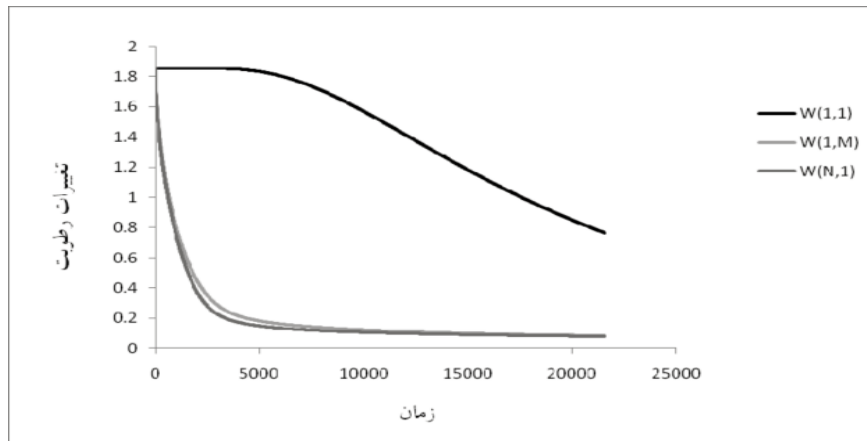
بحث

خشک کردن غالباً در دوره سرعت نزولی اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش دمای خشک کردن، شدت افت رطوبت و شیب خط دوره سرعت نزولی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، مدت زمان لازم برای خشک کردن خرما جهت رسیدن به رطوبت مشخصی، با افزایش دمای هوای

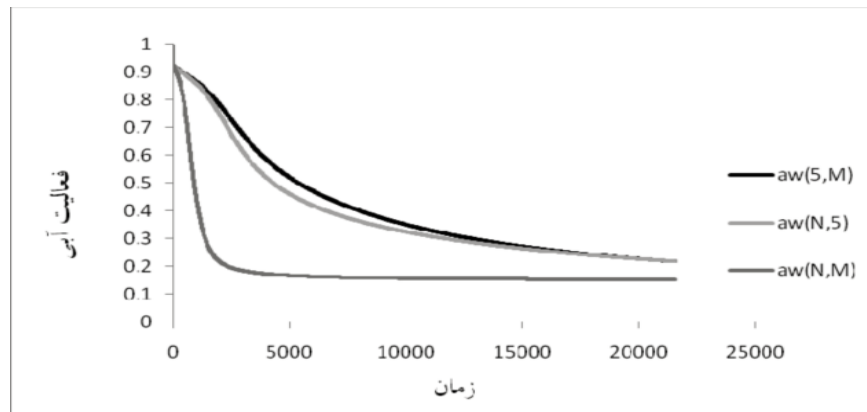
در نمودارهای ۱ و ۲ مشاهده می‌شود که مقدار رطوبت خرما به طور مداوم طی خشک کردن کاهش می‌یابد. مدت زمان لازم برای رسیدن به یک مقدار یکسان در دماهای بالاتر، کوتاه‌تر است. همچنین در منحنی سینتیک افت رطوبت، فقط دوره سرعت نزولی وجود دارد و خشک کردن صرفنظر از شرایط



نمودار ۸- میزان افت رطوبت پیش‌بینی شده و تجربی به عنوان تابعی از زمان طی خشک کردن در دمای 70°C



نمودار ۹- پروفیل‌های رطوبت مطلق طی خشک کردن در ۳ نقطه متفاوت خرما



نمودار ۱۰- تغییرات فعالیت آبی در چند نقطه متفاوت از سطح خرما طی خشک کردن

بر اساس نتایج ارائه شده در نمودارهای ۳ تا ۶ زمان خشک کردن خرما با افزایش دمای هوای خشک کردن کاهش می‌یابد، با افزایش دما کاهش سریع نسبت رطوبت رخ می‌دهد و خشک شدن خرما فقط در دوره سرعت نزولی صورت می‌گیرد. این نتیجه نشان می‌دهد که دیفوزیون مکانیسم فیزیکی حاکم بر جابه‌جایی رطوبت در خرما است (Amellal & Benamara, 2008; Falade & Abbo, 2007; Kechaou & Maalej, 2000).

خشک کن کاهش می‌یابد. Amellal و همکاران، Falade و همکاران و Kechaou و همکاران نیز به نتایج مشابهی دست یافتند (Amellal & Benamara, 2008; Falade & Abbo, 2007; Kechaou & Maalej, 2000) دمای هوای خشک کن مهم‌ترین عامل مؤثر بر سرعت خشک کردن است و با افزایش آن، می‌توان سرعت خشک کردن را افزایش داد (Yaldiz et al., 2001; Yousef-Ali et al., 2001).

منابع

- اکبری، ع. (۱۳۸۵). مطالعه مقایسه ای خشک کردن گوجه فرنگی با روش های سنتی و خورشیدی با همرفت طبیعی. پایان نامه کارشناسی ارشد صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- اشرف جهانی، آ. (۱۳۸۱). خرما میوه زندگی، نشر علوم کشاورزی، ۱۴۷ صفحه.
- سرائی، ج. (۱۳۷۵). خرما- فرایند و عمل آوری- تولید فرآورده های جنبی. انتشارات بارثاوا، ۹۶ صفحه.
- A.O.A.C. (1990). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemist. No. 934. 06. AOAC, Arlington, VA, USA.
- Amellal, H. & Benamara, S. (2008). Vacuum drying of common date pulp cubes. *Drying Technology*, 26, 378- 382.
- Barreveld, W. H. (1993). Date palm products. *FAO Agriculture Services .Bulletin No.101*.
- Falade, K. O. & Abbo, E. S. (2007). Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera L.*) fruits. *Food Eng*, 79, 724- 730.
- Kechaou, N. & Maalej, M. (2000). A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves. *Drying Technology*, 18 (4), 1109- 1125.
- Ozisik, M. N. (1985). Heat Transfer, A Basic Approach. *McGraw-Hill Book Company*, New York.
- Wang, H. G., Dyakowski, T., Senior, P., Raghavan, R. S. & Yang, W. Q. (2007). Modelling of batch fluidised bed drying of pharmaceutical granules. *Chem. Eng*, 62, 1524-1535.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.
- Yousef-Ali, S. H. M., Desmons, J. Y. & Abene, A. (2001). Determination of the average coefficient of internal moisture transfer during the drying of a thin bed of potato slices. *Food Eng*, 48, 95-101.

تفاوت در نرخ رطوبت و سرعت خشک شدن در حالت بدون پوسته و با پوسته ممکن است به دلیل مقاومت پوسته در مقابل خروج رطوبت و انتقال حرارت باشد.

بررسی انجام شده در بخش تایید مدل عدد توسعه داده شده نشان می دهد که هر چه شیب معادله خط به سمت ۱ و عرض از مبدا آن به سمت صفر میل کند، نشان دهنده انطباق بهتر مابین نتایج اندازه گیری شده و پیش بینی شده می باشد. لذا همان گونه که مشاهده می شود، همبستگی خوبی بین مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده ($r=0.99$, $RMSE=0.002$) وجود دارد.

از نمودار ۹ می توان دریافت که مقدار رطوبت در سطح که مستقیماً در تماس با هوای گرم است، به سرعت افت می کند در حالی که به دلیل پایین بودن ضریب نفوذ رطوبت محصول و فاصله از سطح، کاهش رطوبت در نواحی داخلی و مرکز کندتر انجام می شود.

در نمودار ۱۰ همان گونه که مشاهده می شود، با کاهش مقدار رطوبت در سطح میزان فعالیت آبی کاهش می یابد. بر اساس منحنی های جذب و دفع ایزوترمال، فعالیت آبی تابعی از میزان رطوبت می باشد و با کاهش میزان رطوبت فعالیت آبی کاهش می یابد.

نتیجه گیری

در این مطالعه، مدل سازی انتقال رطوبت دو بعدی داخل خرما طی خشک کردن با استفاده از حل عددی قانون دوم فیک با روش explicit در نرم افزار Matlab انجام شد. مقایسه داده های تجربی سینتیک خشک کردن با نتایج تئوریک پیش بینی شده توسط مدل، نشان داد که همبستگی خوبی ($r=0.99$) مابین آن ها وجود دارد. با استفاده از مدل توسعه داده شده، که قادر است پروفیل های رطوبت در داخل خرما و میزان افت رطوبت محصول را طی خشک کردن پیش بینی نماید، می توان فرایند خشک کردن خرما را برای رسیدن به محصولی با کیفیت مناسب کنترل نمود. مدل توسعه داده شده قابلیت استفاده در فرایند خشک کردن انواع ارقام خرما را دارا می باشد.

Mathematical Modeling of Moisture Transport of Date Palm (*V. Barhee*) during Drying

S. Behfar ^{a*}, N. Hamdami ^b, Gh. H. Asadi ^c

^a M. Sc. Student of Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

^b Assistant Professor of the Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

^c Assistant Professor of the Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 25 February 2009

Accepted: 14 April 2009

9

Abstract

Introduction: Drying influences physicochemical and quality characteristics of products. In this research, date palm, as an important, Iranian agricultural crop, has been studied during drying process.

Materials and Methods: Date palms (*V. Barhee*) in khalal stage, with and without skin, were dried as single layer at the different air temperatures of 60, 70 and 80 °C and air velocity of 1.5 m/s in a cabinet dryer. A numerical model was developed to simulate two-directional moisture transfer during single layer drying of dates in the base of Fick's second law of diffusion by finite difference method on MATLAB software .

Results: The predicted water loss content was validated by comparison with the experimental values ($r > 0.99$). The results indicated that this model, firstly, describes well the mechanisms of moisture diffusion in a two-dimensional transfer during drying of date palms and, secondly, it is appropriate to be applied for prediction of moisture profiles and water loss during drying.

Conclusion: The numerical, developed may be used to predict the moisture transport phenomena of date palm during drying, in order to control the process and produce high quality products.

Keywords: Barhi Variety, Date Palm, Drying, Modeling, Moisture Transport.