



اثر فرآیند آبیگری اسمزی بر منحنی همدمای دفع رطوبت و دمای گذار شیشه‌ای میوه

کیوی

مرتضی صادقی^{۱*}، میناالسادات برگ‌گل^۲، سیداحمد میره‌ای^۳، میلاد فتحی^۴

^۱ دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۳ استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۴ استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*ایمیل نویسنده مسئول: Email: sadeghimor@cc.iut.ac.ir

چکیده

هم‌دمای جذب و دفع رطوبت در محاسبه تغییرات مقدار رطوبت مواد در حین انبارداری، شرایط ترمودینامیکی و تصمیم‌گیری در رابطه با واکنش‌های شیمیایی و آنزیمی نامطلوب کاربرد فراوان دارند. از طرف دیگر، دمای گذار شیشه‌ای (T_g) به عنوان یک ابزار پر قدرت برای درک خاصیت حرکت‌پذیری آب در غذا و کنترل زمان مجاز نگهداری محصول اهمیت دارد. منحنی‌های هم‌دمای دفع رطوبت میوه کیوی برای نمونه تازه و نمونه تیمار شده بهینه در هفت سطح فعالیت آبی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس تعیین شده و مناسب‌ترین مدل از بین مدل‌های تجربی مرسوم بر مبنای بالاترین ضریب همبستگی، کوچک‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا و کم‌ترین مدول میانگین انحراف نسبی انتخاب شد. مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی‌های هم‌دمای دفع رطوبت نمونه‌های کیوی تازه و تیمار بهینه مدل‌های گب و پلگ شناخته شدند. دمای گذار شیشه‌ای نمونه‌های تازه و تیمار بهینه با استفاده از دستگاه DSC تعیین شد. نتایج مدل‌سازی دمای گذار شیشه‌ای نیز نشان داد که مدل بروستاو و همکاران بهترین پیش‌بینی را از روند تغییرات دمای گذار شیشه‌ای نمونه‌های کیوی تازه و تیمار بهینه با محتوای رطوبتی تعادلی دارد. در مدل‌سازی دمای گذار شیشه‌ای به عنوان تابعی از فعالیت آبی مدل روس و مدل خالوفی و همکاران برآزش قابل قبولی به داده‌های آزمایشی نشان دادند.

واژگان کلیدی: آبیگری اسمزی، آنالیز حرارتی، فعالیت آبی، مدل‌سازی.

مقدمه

میوه کیوی با نام علمی *Actinidia Deliciosa* سرشار از ویتامین‌های مختلف می‌باشد. به دلیل فسادپذیری سریع و کوتاه بودن عمر آن از یک سو و بالاتر بردن ارزش افزوده آن از طریق کاربرد در صنایع غذایی از سوی دیگر، فرآوری آن از اهمیت



خاصی برخوردار است. در این راستا، خشک کردن محصولات کشاورزی و میوه‌جات از دیرباز همواره یکی از روش‌های افزایش عمر نگهداری و جلوگیری از فساد آنها بوده است. از جمله روش‌های خشک کردن روش هوای داغ، روش آفتابی سنتی، خشک کردن خورشیدی، آون، ماکروویو و آبیگری اسمزی می‌باشند.

آبیگری اسمزی، خارج کردن قسمتی از آب موجود در بافت ماده غذایی توسط غوطه‌ور کردن آن درون یک محلول هایپرتونیک (ساکارید، کلرید سدیم، سوربیتول، گلیسرول و ...) می‌باشد. طی این فرآیند، سه جریان انتقال جرم صورت می‌گیرد: جریان آب از ماده غذایی به محلول اسمزی، جریان مواد حل‌شده در محلول اسمزی به ماده غذایی و جریان مواد حل‌شده ماده غذایی به محلول است (مانند اسید، ویتامین، شکر و ...). از جمله روش‌های تسریع در انتقال جرم در خشک کردن به روش اسمزی، پیش تیمارهای خلأ نوسانی، فشار پالسی و امواج فراصوت می‌باشند (Nowacka *et al.*, 2014; McClements, 1995).

کنترل محتوای رطوبتی طی فرآوری محصولات کشاورزی، یک روش قدیمی برای نگهداری آنها می‌باشد. فعالیت آبی^۱ (a_w) و دمای گذار شیشه‌ای (T_g) ابزار مهمی برای پیش‌بینی آب موجود در غذاها و حالت فیزیکی غذاهای جامد است (Roos Y. H., 1993). برای پی بردن به این دو ویژگی نیاز به استخراج دیاگرام حالت^۲ مواد می‌باشد. دیاگرام حالت، نقشه حالت‌های مختلف فیزیکی ماده غذایی به صورت تابعی از دما و محتوای رطوبتی است (Rahman, 2006). هم‌دمای جذب و دفع رطوبت در مدل‌سازی فرآیندهای خشک کردن، تخمین قابلیت عمر ماندگاری^۳ مواد غذایی، محاسبه تغییرات رطوبت مواد در حین انبارداری و یا خشک کردن، تأثیر تغییرات رطوبت نسبی و تصمیم‌گیری در رابطه با واکنش‌های شیمیایی و آنزیمی نامطلوب کاربرد فراوان دارند (رحیمی، ۱۳۸۸). از طرف دیگر ثابت شده است که فعالیت آبی برای ارزیابی زمان مجاز نگهداری بعضی محصولات کافی نیست (رحیمی، ۱۳۸۸) و نیاز است تا دمای گذار شیشه‌ای به عنوان یک ابزار پر قدرت برای فهمیدن خاصیت حرکت‌پذیری آب در غذا و کنترل زمان مجاز نگهداری محصول تعیین شود (Ahmed *et al.*, 2005).

طی تحقیقی، هم‌دمای جذب رطوبت و دمای گذار شیشه‌ای سیب و گلابی به روش آبیگری اسمزی در محدوده‌ی دمای ۳۰ تا ۶۰ درجه‌ی سلسیوس مورد مطالعه قرار گرفت (Djendoubi Mrad *et al.*, 2013). نتایج نشان داد که در یک فعالیت آبی معین با افزایش دما درصد رطوبت تعادلی کاهش یافت. در این تحقیق مدل گب در محدوده دمای مذکور تطابق خوبی با داده‌های آزمایشی نشان داد. در تحقیقی دیگر اثر پیش تیمار فراصوت با قدرت‌های ۳۶۰، ۶۰۰ و ۹۶۰ وات، در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، بر دمای گذار شیشه‌ای گلابی خشک‌شده به روش انجمادی مطالعه شد (Islam *et al.*, 2014). پلات‌های دمایی به چهار بخش ناحیه شیشه‌ای، ناحیه گذار، ناحیه لاستیکی و ناحیه نهایی با هدف تحلیل تغییر خواص آنها با فراصوت تقسیم‌بندی شدند. نمونه‌های پیش تیمار شده با فراصوت یک نیم‌رخ بافت بهتر و ساختار متخلخل‌تر در مقایسه با گروه شاهد نشان دادند.

¹. Water activity

². State diagram

³. Shelf life



هدف از انجام این تحقیق تعیین منحنی‌های همدمای دفع نمونه‌های میوه کیوی آبیگری شده به روش اسمزی و مدل‌سازی آن می‌باشد. همچنین، اثر پیش تیمار فراصوت و فرآیند آبیگری اسمزی بر دمای گذار شیشه‌ای کیوی و مدل‌سازی آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

آبیگری اسمزی

در ابتدا نمونه‌های کیوی (رقم هایوارد) با درجه رسیدگی و اندازه یکنواخت از بازار محلی تهیه و تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۳ درجه‌ی سلسیوس در یخچال نگهداری شد. پس از شستشو و جداسازی پوست، برش‌هایی با ضخامت ۸ میلی‌متر از آن‌ها تهیه گردید. برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها نیز از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. برای اعمال امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار نمونه‌ها به مدت ۲۵/۳۳ دقیقه در حمام فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و توان ۱۳۰ کیلووات با نسبت وزنی ۱۵ به ۱ (وزن آب مقطر به وزن نمونه) تحت اثر امواج قرار گرفتند. اعمال امواج فراصوت به شیوه غیر مستقیم و با استفاده از دستگاه مولد امواج فراصوت صورت گرفت. محلول اسمزی ترکیبی از شکر خوراکی تصفیه شده و آب مقطر بود. برای آبیگری اسمزی نمونه‌ها در محلول ساکاروز با غلظت ۴۹/۸۸ درجه‌ی بریکس به مدت ۹۹/۰۹ دقیقه غوطه‌ور شدند. لازم به توضیح است که شرایط اعمال امواج فراصوت و آبیگری اسمزی مذکور به عنوان شرایط بهینه تعیین شده از آزمایش‌های قبل که در آن‌ها زمان اعمال امواج فراصوت، غلظت محلول اسمزی و زمان غوطه‌وری به عنوان متغیرهای مستقل بوده‌اند، به دست آمده است (برگ‌گل، ۱۳۹۵). در طول انجام آزمایش، دما بیشتر از ۲ درجه سلسیوس تغییر نمی‌کرد. پس از اعمال پیش تیمار فراصوت، نمونه‌ها در محلول اسمزی تشریح شده با نسبت وزنی ۱۵ به ۱ (وزن محلول اسمزی به وزن نمونه) غوطه‌ور می‌شدند. نسبت وزنی محلول به میوه برابر با ۱۵ به ۱ به منظور جلوگیری از تغییر غلظت محلول انتخاب شد (Nowacka et al., 2014). تمام آزمایش‌ها حداقل در دو تکرار انجام گرفت. دمای محیط انجام آزمایش‌ها برابر با 18 ± 2 درجه‌ی سلسیوس بود.

منحنی‌های همدمای دفع رطوبت

منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت محصولات کشاورزی و غذایی بیانگر وضعیتی هستند که در آن ماده با محیط اطراف خود به تعادل رسیده است. این منحنی‌ها کاربرد فراوانی در کنترل فرآیند خشک کردن، انبارداری محصولات و پیش‌بینی رفتار رطوبتی محصول دارند. از نمک‌های اشباع برای مطالعه منحنی‌های جذبی و دفعی محصولات و همچنین در مواردی که نیاز به ثابت بودن رطوبت نسبی است، استفاده فراوانی شده است. برای تأمین شرایط رطوبتی مختلف، نمونه‌ها در مجاورت نمک‌های اشباع قرار داده می‌شوند (عرار گاطع، ۱۳۹۰). در این پژوهش از نمک‌های محصول مرکب^۱ آلمان برای تعیین منحنی‌های هم‌دمای

^۱. Merck

دفع رطوبت کیوی استفاده شد. محدوده‌ی رطوبت نسبی با استفاده از نمک‌های $Mg(NO_3)_2$, $MgCl_2$, CH_3COOK , $LiCl$, P_2O_5 ، $NaNO_2$ و K_2CO_3 بین صفر تا ۰/۶۵۵ بود. مقدار محلول نمکی که در هر یک از دسیکاتورها استفاده شد، به اندازه یک سوم حجم دسیکاتور بود (عرار گاطع، ۱۳۹۰).

متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری رطوبت تعادلی، روش‌های وزن‌سنجی، رطوبت‌سنجی و فشارسنجی می‌باشند که در میان روش‌های نامبرده، روش وزن‌سنجی علی‌رغم زمان‌بر بودن آن به دلیل سادگی، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و دقت بالا کاربرد گسترده‌تری دارد. در این پژوهش از روش وزن‌سنجی ایستا مطابق با دستورالعمل COST90 برای تعیین منحنی هم‌دمای دفع رطوبت کیوی استفاده شد (Vazquez, 1999). بدین منظور از نمونه‌های کیوی، برش‌های مثلی با ضخامت ۸ میلی‌متر که معرف نمونه کیوی کامل باشد، تهیه شد. برش‌های مثلی کیوی درون دسیکاتورهای محتوی هفت نوع محلول نمک اشباع با رطوبت نسبی تعادلی مشخص قرار داده شدند. برای سریع‌تر خارج شدن رطوبت از نمونه، دسیکاتورها تحت خلأ قرار گرفتند. برای ثابت نگه‌داشتن دمای آزمایش، دسیکاتورها درون انکوباتور مجهز به گرم‌کن و یخچال Aria Teb در دمای ۲۰ درجه‌ی سلسیوس قرار داده شدند.

توزین نمونه‌ها با فواصل زمانی سه روز انجام گرفت و چنانچه اختلاف دو توزین کمتر از ± 0.01 گرم بود، آزمایش پایان می‌یافت. در نهایت رطوبت تعادلی نمونه‌ها بر اساس وزن نهایی (بر پایه خشک) از رابطه ۱ به دست آمد.

$$X_e = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100 \quad (1)$$

که X_e درصد رطوبت تعادلی نمونه‌ها بر مبنای خشک، m_w وزن نمونه‌های تر (گرم)، m_d وزن نمونه‌های خشک (گرم) می‌باشند. نمونه‌های کیوی مورد آزمایش پس از حدود ۳ الی ۴ هفته به تعادل رسیدند. آزمایش‌ها در دو تکرار انجام شدند. برای مطالعه رفتار تعادلی میوه کیوی و مدل‌سازی هم‌دمای دفع رطوبت آن از مدل‌هایی چون گب، بت، هالسی، هندرسون، اسوین، کوری، پلگ، اندرسون و کاهن استفاده شد که معادلات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مدل‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی هم‌دمای دفع میوه کیوی

پارامترهای مدل	معادله اصلی	نام مدل
C, K و W_m	$w = \frac{w_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w)(1 - K a_w + C \cdot K \cdot a_w)}$	گب
C و W_m	$w = \frac{w_m C a_w}{(1 - a_w)(1 - a_w + C a_w)}$	بت
A و B	$w = \left[\frac{-A}{(T \cdot L n a_w)} \right]^{\frac{1}{B}}$	هالسی

A و B	$w = \left(\frac{\ln(1-a_w)}{-A} \right)^{\frac{1}{B}}$	هندرسون
A و B	$w = A \left[\frac{a_w}{(1-a_w)} \right]^B$	اسوین
C و K	$w = e^{(K+Ca_w)}$	کوری
n_1, n_2, K_1 و K_2	$w = K_1 a_w^{n_1} - K_2 a_w^{n_2}$	پلگ
A, B و C	$w = \frac{ABCa_w}{(1-K.a_w)(1-Ka_w+C.K.a_w)}$	اندرسون
A و B	$w = \left(\frac{A}{\ln a_w} \right) + B$	کاهن

از نرم‌افزار SPSS Statistics 17.0 برای آنالیز رگرسیون غیرخطی داده‌های تجربی، تحلیل نتایج و تعیین ضرایب مدل‌های ریاضی استفاده شد. برای مناسب بودن برازش علاوه بر ضریب همبستگی (R^2) از دو شاخص دیگر مدول میانگین انحراف نسبی^۱ و ریشه میانگین مربعات خطا^۲ استفاده شد. برای بهترین برازش، بیشترین مقدار ضریب همبستگی و کمترین مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و مدول میانگین انحراف نسبی لازم می‌باشد (Lomauro et al., 1985).

آنالیز حرارتی نمونه‌های کیوی

به منظور مطالعه‌ی اثر فرآیند آبیگری اسمزی بر دمای گذار شیشه‌ای میوه کیوی آنالیز حرارتی نمونه‌ها انجام شد. آنالیز حرارتی برای نمونه‌ی تازه و تیمار بهینه شده، در ۷ سطح فعالیت آبی انجام شد. از نمونه‌های به تعادل رسیده در معرض محلول‌های اشباع نمک، برای انجام آنالیز حرارتی استفاده شد. انجام آنالیز حرارتی مطابق دستورالعمل استاندارد ISIRI 8144 انجام گرفت. تمام آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه انرژی‌سنج روبشی افتراقی مدل DSC 821e (ساخت شرکت METTLER TOLEDO از کشور سوئیس) در مرکز آزمایشگاه‌های تحقیقاتی، صنعتی و کالیبراسیون هواپیماسازی ایران صورت گرفت.

برای پیش‌بینی T_g از طریق مدل‌سازی دمای گذار شیشه‌ای ترکیبات دو جزئی بی‌شکل^۳ از مدل‌های نیمه تجربی و تئوری ارائه شده در جدول ۲ استفاده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها مدل بدون پارامتر مدل فاکس می‌باشد. مدل‌های ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS Statistics 17.0 به داده‌های آزمایشگاهی برازش شدند و بهترین مدل بر مبنای بیشترین ضریب R^2 ، کوچک‌ترین مقدار ریشه‌ی میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و کوچک‌ترین مقدار مدول میانگین انحراف نسبی (P) به دست آمد.

جدول ۲- مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی دمای گذار شیشه‌ای ترکیبات بی‌شکل دو جزئی

1. Mean relative percentage deviation modulus
2. Root mean square error
3. Amorphous binary mixture

نام مدل	معادله اصلی	پارامترهای مدل
گوردون - تیلور	$T_{gm} = \frac{\Phi_1 T_{g1} + K_{GT} (1 - \Phi_1) T_{g2}}{\Phi_1 + K_{GT} (1 - \Phi_1)}$	K_{GT}
فاکس ^۱	$\frac{1}{T_{gm}} = \frac{\Phi_1}{T_{g1}} + \frac{1 - \Phi_1}{T_{g2}}$	-
جنکل - هئوش ^۲	$T_{gm} = \Phi_1 T_{g1} + (1 - \Phi_1) T_{g2} + b (T_{g2} - T_{g1}) \cdot \Phi_1 \cdot (1 - \Phi_1)$	b
کوئی ^۳	$T_{gm} = \frac{\Phi_1 T_{g1} + k_{KW} (1 - \Phi_1) T_{g2}}{\Phi_1 + k_{KW} (1 - \Phi_1)} + q \cdot \Phi_1 \cdot (1 - \Phi_1)$	k_{KW} و q
بروستاو ^۴ و همکاران	$T_{gm} = \Phi_1 T_{g1} + (1 - \Phi_1) T_{g2} + \Phi_1 (1 - \Phi_1) [a_0 + a_1 (2\Phi_1 - 1) + a_2 (2\Phi_1 - 1)^2]$	a_0, a_1 و a_2

که ϕ کسر جرمی جزء اول ترکیب مورد مطالعه (معمولاً مقدار بیشتر)، T_{gi} دمای گذار شیشه‌ای جزء i ام ترکیب (درجه‌ی سلسیوس) و

T_{gm} دمای گذار شیشه‌ای ترکیب (درجه سلسیوس) است.

به علاوه، رابطه بین دمای گذار شیشه‌ای و فعالیت آبی با استفاده از معادله خطی ارائه شده توسط روس (رابطه ۲) (Roos Y.)

(H., 1993) و همچنین با استفاده از معادله توسعه یافته توسط خالوفی^۵ و همکاران (رابطه ۳) پیش‌بینی شد.

$$T_g = Y a_w + Z \quad (2)$$

که T_g دمای گذار شیشه‌ای (درجه‌ی سلسیوس)، a_w فعالیت آبی و Y و Z مقادیر ثابت مدل هستند.

$$T_g = \frac{A a_w^2 + B a_w + T_{g(s)}}{\alpha a_w^2 + \beta a_w + 1} \quad (3)$$

که $T_{g(s)}$ دمای گذار شیشه‌ای جامد بدون آب^۶ (درجه‌ی سلسیوس)، a_w فعالیت آبی و A, B, α و β مقادیر ثابت مدل هستند که خود

از روابط ۴ تا ۷ به دست می‌آیند:

$$A = T_{g(s)} (K)^2 (1 - C) \quad (4)$$

$$B = K (T_{g(s)} (C - 2) + C W_m T_{g(s)} K) \quad (5)$$

$$\alpha = K^2 (1 - C) \quad (6)$$

$$\beta = K (C - 2 + C W_m K) \quad (7)$$

در این روابط، W_m, K و C ضرایب مدل گب برای مدل‌سازی منحنی هم‌دمای جذب و دفع رطوبت هستند.

⁴. Fox

⁵. Jenckel-Heusch

⁶. Kwie

⁷. Brostow

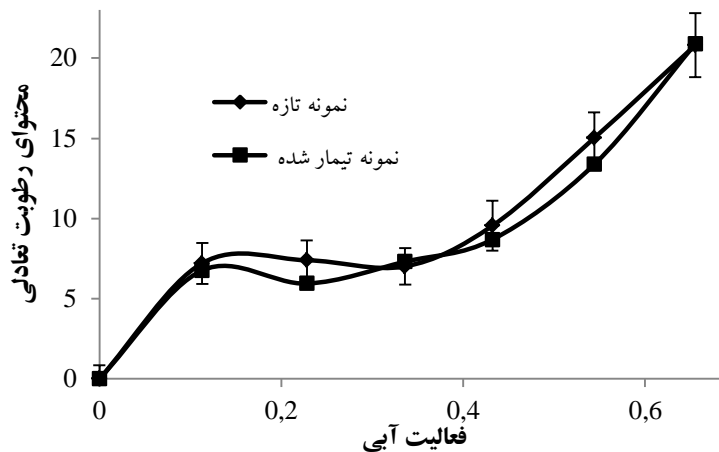
¹. Khalloufi

². Anhydrous solid

بحث و نتیجه گیری

منحنی‌های همدمای دفع رطوبت و مدل سازی آن

منحنی‌های همدمای دفع رطوبت نمونه‌های کیوی (میوه تازه و نمونه حاصل از تیمار بهینه) در دمای ۲۰ درجه‌ی سلسیوس به شیوه تبیین شده در قسمت مواد و روش‌ها به دست آمدند. شکل ۱ این منحنی‌ها را نشان می‌دهد (میله‌های عمودی در شکل بیانگر انحراف معیار هستند).



شکل ۱- منحنی همدمای دفع رطوبت نمونه کیوی تازه و تیمار بهینه شده در دمای ۲۰ درجه‌ی سلسیوس (مقادیر بیانگر میانگین \pm یک انحراف معیار هستند).

همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های همدمای دفع به دست آمده همانند دیگر مواد غذایی (مانند توت‌فرنگی (Moraga *et al.*, 2004) و شاه‌توت (Maskan and Göğüş, 1998) به صورت سیگموئید (S شکل) و بر اساس طبقه‌بندی BET از نوع دوم می‌باشند (Moraga *et al.*, 2006; Alhamdan and Hassan, 1999). منحنی‌ها نشان می‌دهند که در دمای ثابت با افزایش فعالیت آبی، محتوای رطوبت تعادلی افزایش می‌یابد که به دلیل تمایل مواد غذایی به کاهش فشار بخار در هنگام کاهش رطوبت نسبی می‌باشد (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004). افزایش فعالیت آبی منجر به افزایش واکنش‌های شیمیایی و میکروبی می‌گردد که نتیجه‌ی آن کاهش کیفیت ماده غذایی و مدت ماندگاری آن می‌شود.

به منظور انتخاب مدل مناسب برای تبیین رفتار دفع رطوبت نمونه کیوی تازه و تیمار شده بهینه، پارامترهای موجود در مدل‌های مختلف از طریق برازش به داده‌های آزمایشگاهی به دست آمدند. همچنین ریشه میانگین مربعات خطای آزمایش، مدول میانگین انحراف نسبی و ضریب همبستگی محاسبه شدند که نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج مدل‌سازی منحنی‌های همدمای دفع رطوبت نمونه کیوی تازه و تیمار بهینه شده

نام مدل	پارامترهای مدل	نمونه تازه	نمونه تیمار بهینه
گب	X_m	۰/۰۵۲	۰/۰۴۶



۱۳۱۳۸/۶۷۸	۱۵۸۳۰/۶۴۹	C	
۱/۱۹۰	۱/۱۴۶	K	
۰/۹۸۸	۰/۹۷۸	R^2	
۰/۰۰۷	۰/۰۰۹	$RMSE$	
۶/۳۹۸	۸/۳۹۶	$P\%$	
۴/۰۵۸	۰/۰۶۹	X_m	
۲۱/۸۱۹	۱۰/۳۰۷	C	
۰/۹۴۷	۰/۹۳۷	R^2	بت
۴/۰۵۸	۵/۴۱۲	$RMSE$	
۴۵/۲۰۵	۵۳/۳۸۵	$P\%$	
۴/۳۴۵	۳/۷۸۰	K_1	
-۷۰/۴۰۳	-۵۶/۷۷۷	K_2	
-۷۰/۴۰۳	-۰/۲۹۹	n_1	
۳/۴۶۶	۲/۸۸۶	n_2	پلگ
۰/۹۹۸	۰/۹۹۰	R^2	
۰/۱۸۸	۰/۴۸۲	$RMSE$	
۱/۷۸۸	۴/۳۶۶	$P\%$	
۹/۰۳۶	۱۲/۹۱۳	A	
۱/۰۲۲	۱/۱۳۷	B	
۰/۹۳۰	۰/۹۲۲	R^2	هالسی
۱/۳۸۰	۱/۳۲۵	$RMSE$	
۱۰/۹۶۵	۱۲/۷۳۵	$P\%$	
-۷/۹۲۳	-۷/۷۵۲	C	
۰/۹۲۱	۱/۷۹۹	K	
۰/۹۳۷	۰/۹۳۶	R^2	کاهن
۱/۲۲۰	۱/۲۰۰	$RMSE$	
۱۱/۳۹۱	۱۱/۳۸۱	$P\%$	
۱۲/۷۳۴	۱۳/۵۰۳	A	
۰/۶۶۲	۰/۵۸۸	B	
۰/۹۲۴	۰/۹۲۴	R^2	اسوین
۱/۶۷۶	۱/۶۹۱	$RMSE$	
۱۴/۷۷۸	۱۵/۷۴۲	$P\%$	
۱۸/۰۱۱	۱۸/۳۱۷	A	
۰/۸۷۹	۰/۷۷۱	B	
۰/۸۹۷	۰/۸۹۹	R^2	هندرسون
۱/۹۵۱	۱/۹۴۸	$RMSE$	
۱۷/۴۷۰	۱۸/۱۱۹	$P\%$	
۹/۸۳۷	۱۰/۵۰۶	A	
۲/۱۰۱	۲/۷۰۶	B	
۰/۸۲۶	۰/۷۵۷	C	
۰/۸۸۸	۰/۸۷۷	R^2	اندرسون
۲/۰۳۵	۲/۱۵۳	$RMSE$	
۱۸/۰۴۸	۱۹/۹۲۸	$P\%$	
۲/۵۴۱	۲/۹۵۲	C	
۱/۲۸۸	۱/۰۹۱	K	کوری

۰/۸۷۵	۰/۹۱۳	R^2
۱/۹۸۳	۱/۸۱۲	RMSE
۱۳/۶۲۴	۱۳/۱۳۲	P%

بر اساس نتایج به دست آمده مناسب‌ترین مدل با بیشترین ضریب تعیین، کمترین ریشه میانگین مربعات خطا و کوچک‌ترین مدول میانگین انحراف نسبی مدل‌های گب و پلگ می‌باشند.

موراگو^۱ و همکاران نیز منحنی هم‌دمای دفع و جذب کیوی را تعیین کردند. آن‌ها مدل‌های مرسوم گب و بت را به داده‌های آزمایش برآزش کردند. نتایج نشان داد که مدل گب مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی هم‌دمای دفع کیوی بود (Moraga *et al.*, 2006). همچنین بهترین مدل برای پیش‌بینی هم‌دمای دفع زردآلو مدل پلگ معرفی شده است (Djendoubi Mrad *et al.*, 2013). سیامالادری^۲ و همکاران منحنی‌های هم‌دمای دفع تمشک را به دست آوردند و با استفاده از مدل گب و بت مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد که از مدل گب مطابقت بهتری بر داده‌های آزمایشگاهی داشت (Syamaladevi *et al.*, 2010).

نتایج آنالیز حرارتی

دمای گذار شیشه‌ای مواد غذایی به طور معمول با استفاده از دستگاه DSC و یا دستگاه آنالیز مکانیکی - حرارتی اندازه‌گیری می‌شود. روش تعیین این دما به طور دقیق تعریف نشده است (Bhandari and Howes, 1999). همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دمای گذار شیشه‌ای به صورت وسیعی متغیر است و وابسته به فاکتورهایی چون نحوه‌ی تهیه نمونه، اندازه آن، سرعت گرم کردن و خنک کردن نمونه، مدت ماندگاری نمونه، محتوای رطوبتی نمونه و غیره می‌باشد.

نتایج آنالیز حرارتی نمونه‌ها نشان داد که گذار شیشه‌ای به صورت آنی (پیک تند) رخ نداده، بلکه در یک محدوده دمایی اتفاق افتاده است. رخ ندادن دمای گذار شیشه‌ای در یک محدوده‌ی دمایی را می‌توان ناشی از پراکندگی وسیع زمان‌های آسایش یا رخ دادن گذارهای ناشناخته‌ی مختلف در ترکیب دانست. زمانی که گذار شیشه‌ای به صورت نسبی در یک محدوده‌ی وسیع دمایی رخ دهد، مرسوم است که گذارها به صورت نقطه‌های شروع (T_{gi}) و میانی (T_{gm}) گزارش شوند. در جدول ۴ دمای گذار شیشه‌ای شروع و میانی نمونه‌های کیوی با محتوای رطوبتی مختلف ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر دمای گذار شیشه‌ای شروع و میانی نمونه‌های کیوی تازه و تیمار بهینه

دمای گذار شیشه‌ای نمونه کیوی تیمار شده (درجه سلسیوس)		دمای گذار شیشه‌ای نمونه کیوی تازه (درجه سلسیوس)		فعالیت آبی
T_{gm}	T_{gi}	T_{gm}	T_{gi}	
-۱۵/۷۶	-۲۱/۲۰	-۱۲/۴۸	-۱۸/۹۴	۰

^۱. Moraga

^۲. Syamaladeri



۰/۱۱۳	-۲۱/۴۵	-۱۴/۷۴	-۲۲/۲۸	-۱۶/۲۴
۰/۲۲۸	-۲۲/۹۸	-۱۸/۱۷	-۲۴/۹۴	-۱۸/۳۲
۰/۳۳۶	-۲۴/۳۸	-۱۷/۵۴	-۲۵/۵۵	-۱۷/۴۸
۰/۴۳۲	-۲۴/۱۷	-۱۹/۵۱	-۲۶/۲۳	-۲۰/۳۳
۰/۵۴۴	-۴۳/۲۳	-۳۷/۰۶	-۵۰/۲۵	-۴۷/۱۴
۰/۶۵۵	-۵۱/۴۶	-۴۱/۸۱	-۵۴/۵۶	-۵۰/۹۳

مطابق نتایج، با افزایش فعالیت آبی، مقدار T_g کاهش پیدا کرد، به طوری که در کمترین فعالیت آبی بیشینه دمای گذار شیشه‌ای به دست آمد. این کاهش دمای گذار شیشه‌ای، به دلیل اثر شکل‌دهندگی آب بر اجزای بدون شکل ترکیب ماده غذایی است (Rahman, 2006). آب، یک شکل دهنده خوب با دمای گذار شیشه‌ای بین ۱۳۵- تا ۱۳۹- درجه‌ی سلسیوس است و برای بسیاری از مواد، با محتوای رطوبتی بالاتر دمای گذار شیشه‌ای کمتر می‌شود (Roos Yrjö H., 1987). همچنین مقایسه دمای گذار شیشه‌ای نمونه کیوی تازه و نمونه تیمار بهینه شده نشان می‌دهد که اعمال پیش تیمار فراصوت و آبیگری اسمزی موجب کاهش دمای گذار شیشه‌ای شده است.

نتایج مدل‌سازی دمای گذار شیشه‌ای با استفاده از مدل‌های نیمه تجربی و تئوری مختلف در جدول ۴ آورده شده است. بر اساس نتایج مدل بروستاو و همکاران دارای بهترین روند تغییرات دمای گذار شیشه‌ای نمونه‌های کیوی با محتوای رطوبتی تعادلی می‌باشد. همچنین مقادیر به دست آمده از پارامترهای مدل گوردون - تیلور با پارامترهای دیگر محققان نزدیکی بیشتری دارد. جوزانی و همکاران نیز داده‌های آنالیز حرارتی نمونه‌های گوشت خرما را با استفاده از معادله گوردون - تیلور مورد مطالعه قرار دادند و مقادیر K_{GT} و $T_g(s)$ حاصل از مدل‌سازی را به ترتیب برابر با ۹/۶ درجه‌ی سلسیوس و ۲/۶ گزارش کردند (Guizani et al., 2010). موراگا و همکاران نیز مدل گوردون - تیلور را برای نمونه‌های کیوی مورد مطالعه قرار دادند و مقادیر K_{GT} و $T_g(s)$ به دست آمده از مدل‌سازی به ترتیب برابر با ۴۰/۳ درجه‌ی سلسیوس و ۴/۸۸ گزارش دادند (Moraga et al., 2006).

جدول ۴- نتایج مدل‌سازی دمای گذار شیشه‌ای نمونه کیوی تازه و تیمار بهینه شده بر اساس ترکیب دو جزئی

نام مدل	پارامترهای مدل	نمونه تازه	نمونه تیمار بهینه
	$T_g(s)$	۷/۲۶۱	۱۵/۹۸۵
	K_{GT}	۲/۶۸۶	۴/۲۳۸
گوردون - تیلور	R^2	۰/۹۵۵	۰/۹۰۹
	$RMSE$	۲/۲۵۱	۴/۳۰۸
	P	۷/۹۷۷	۱۴/۱۷۹
جانکل - هوش	$T_g(s)$	۳/۹۵۱	۶/۵۲۸

۱/۴۸۹	۰/۹۵۷	b	
/۸۹۷	۰/۹۵۲	R^2	
۳/۸۶۴	۶/۲۵۱	$RMSE$	
۱۲/۱۳۲	۱۱/۸۵۰	P	
<hr/>			
-۱۴۲/۲۴۷	-۵۷/۰۷۰	$T_g(s)$	
۱۸۴۷۸/۶۲۱	۶۴۹۸/۳۲۴	a_0	
-۵۲۷۸۶/۶۲۸	-۱۸۸۴۲/۵۷۱	a_1	
۳۸۹۸۵/۴۵۸	۱۴۰۸۹/۳۲۵	a_2	بروستاو و همکاران
۰/۹۹۹	۰/۹۷۶	R^2	
۰/۵۱۴	۱/۶۶۱	$RMSE$	
۱/۳۴	۵/۱۸۰	P	
<hr/>			
۳۸/۲۶۰	۲۱/۹۷۴	$T_g(s)$	
۸/۷۱۴	۶/۰۳۶	K	
۱۴۲/۳۸۲	۱۵۹/۰۷۸	q	
۰/۹۱۷	۰/۹۶۰	R^2	کوئی
۴/۱۱۶	۲/۱۳۰	$RMSE$	
۱۳/۸۵۷	۸/۱۰۷	P	
<hr/>			
-۵/۹۰۹	-۰/۲۷۶	$T_g(s)$	
۰/۷۵۱	۰/۹۱۷	R^2	
۶/۸۹۶	۳/۰۷۹	$RMSE$	فاکس
۱۹/۲۸۰	۸/۱۸۰	P	

جدول ۵ نتایج مدل‌سازی دمای گذار شیشه‌ای به عنوان تابعی از فعالیت آبی نمونه‌های کیوی تازه و تیمار شده را با استفاده از مدل‌های روس، خالوفی و همکاران نشان می‌دهد. مطابق انتظار با افزایش فعالیت آبی محصول، مقدار دمای گذار شیشه‌ای یک روند کاهشی به صورت خطی را دنبال می‌کند. بر اساس نتایج حاصل، مدل روس و مدل خالوفی و همکاران توانستند تغییر دمای گذار شیشه‌ای کیوی را با فعالیت آبی پیش‌بینی نمایند. صادقی و همکاران در مدل‌سازی دمای گذار شیشه‌ای پودر خرما به عنوان تابعی از فعالیت آبی دریافتند که مدل روس به خوبی بیانگر روند تغییرات دمای گذار شیشه‌ای می‌باشد (Sadeghi *et al.*, 2016).

جدول ۵- نتایج مدل‌سازی دمای گذار شیشه‌ای نمونه کیوی تازه و تیمار بهینه شده به عنوان تابع فعالیت آبی

نام مدل	پارامترهای مدل	نمونه تازه	نمونه تیمار بهینه
	Y	-۴۴/۱۴۳	-۵۵/۶۸۴
روس	Z	-۸/۴۹۰	-۸/۲۴۰
	R^2	۰/۸۰۴	۰/۷۱۲
	$T_g(s)$	-۱۳/۴۹۱	-۱۷/۰۳۴
	A	-۵۳/۵۹۷	-۱۳۸/۹۶۶
	B	-۱۱۹/۷۰۵	۱۵/۶۱۴
خالوفی و همکاران	α	۵۱/۷۷۴	۱۵/۲۲۴
	β	-۵۲/۲۵۱	-۱۵/۳۱۲
	R^2	۰/۹۲۷	۰/۸۹۸

نتیجه گیری کلی

منحنی های همدمای تعادلی کاربرد فراوانی در صنایع غذایی و کشاورزی دارند و می توانند در فعالیت هایی نظیر خشک کردن، انبارمانی و بسته بندی مورد استفاده قرار گیرند. منحنی های همدمای دفع به دست آمده از میوه کیوی همانند دیگر محصولات به صورت S شکل و از نوع دوم در طبقه بندی BET قرار داشت. نتایج نشان داد که مناسب ترین مدل ها برای پیش بینی منحنی های همدمای دفع رطوبت کیوی مدل های گب و پلگ می باشند. همچنین، اثر آبیگری اسمزی بر منحنی های همدمای دفع کیوی به گونه ای بود که منحنی همدمای نمونه تیمار بهینه شده در پایین منحنی نمونه تازه قرار داشت که دلیل آن ایجاد میکرو کانال هایی است که مقدار دفع رطوبت بیشتری را سبب می شود.

نتایج نشان داد با افزایش محتوای رطوبتی تعادلی، مقدار T_g کاهش پیدا کرد و بیشترین مقدار دمای گذار شیشه ای در کمترین فعالیت آبی حاصل شد. بر اساس نتایج مدل بروستاو و همکاران دارای بهترین روند تغییرات دمای گذار شیشه ای نمونه های کیوی با محتوای رطوبتی تعادلی بود. همچنین مقادیر به دست آمده از پارامترهای مدل گوردون - تیلور با پارامترهای دیگر محققان نزدیکی بیشتری داشت.

منابع

برگ گل، م. س.، ۱۳۹۵. مطالعه فرآیند آبیگری اسمزی ورقه های کیوی با اعمال پیش تیمار فراصوت و مدل سازی آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.



عرار گاطع، ا.، ۱۳۹۰. اثر روش خشک کردن بر برخی از خواص کیفی و ترمودینامیکی خرماي رقم استعمران و پودر حاصل از آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

Ahmed J., H. S. Ramaswamy and A. R. Khan. 2005. Effect of water activity on glass transitions of date pastes. *Journal of Food Engineering* 66: 253-258.

Al-Muhtaseb A. H., W. A. M. McMinn and T. R. A. Magee. 2004. Water sorption isotherms of starch powders :Part 1: mathematical description of experimental data. *Journal of Food Engineering* 61: 297-307.

Alhamdan A. M. and B. H. Hassan. 1999. Water sorption isotherms of date pastes as influenced by date cultivar and storage temperature. *Journal of Food Engineering* 39: 301-306.

Bhandari B. R. and T. Howes. 1999. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering* 40: 71-79.

Djendoubi Mrad N., C. Bonazzi, F. Courtois, N. Kechaou and N. Boudhrioua Mihoubi. 2013. Moisture desorption isotherms and glass transition temperatures of osmo-dehydrated apple and pear. *Food and Bioproducts Processing* 91: 121-128.

Guizani N., G. S. Al-Saidi, M. S. Rahman, S. Bornaz and A. A. Al-Alawi. 2010. State diagram of dates: Glass transition, freezing curve and maximal-freeze-concentration condition. *Journal of Food Engineering* 99: 92-97.

Hassini L., E. Bettaieb, H. Desmorieux, S. S. Torres and A. Touil. 2015. Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. *Industrial Crops and Products* 67: 457-465.

Islam M. N., M. Zhang, H. Liu and C. Xinfeng. 2014. Effects of ultrasound on glass transition temperature of freeze-dried pear (*Pyrus pyrifolia*) using DMA thermal analysis. *Food and Bioproducts Processing*.

Kalogeras I. M. 2010. Description and molecular interpretations of anomalous compositional dependences of the glass transition temperatures in binary organic mixtures. *Thermochimica Acta* 509: 135-146.

Lomauro C. J., A. S. Bakshi and T. P. Labuza. 1985. Moisture transfer properties of dry and semimoist foods. *Journal of Food Science* 50: 397-400.

Maskan M. and F. Göğüş. 1998. Sorption isotherms and drying characteristics of mulberry (*Morus alba*). *Journal of Food Engineering* 37: 437-449.

- McClements D. J. 1995. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends in Food Science & Technology* 6: 293-299.
- Moraga G., N. Martínez-Navarrete and A. Chiralt. 2006. Water sorption isotherms and phase transitions in kiwifruit. *Journal of Food Engineering* 72: 147-156.
- Moraga G., N. Martínez-Navarrete and A. Chiralt. 2004. Water sorption isotherms and glass transition in strawberries: influence of pretreatment. *Journal of Food Engineering* 62: 315-321.
- Nowacka M., U. Tylewicz, L. Laghi, M. Dalla Rosa and D. Witrowa-Rajchert. 2014. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chemistry* 144: 18-25.
- Rahman M. S. 2006. State diagram of foods: Its potential use in food processing and product stability. *Trends in Food Science & Technology* 17: 129-141.
- Roos Y. H. 1987. Effect of moisture on the thermal behavior of strawberries studied using differential scanning calorimetry. *Journal of Food Science* 52: 146-149.
- Roos Y. H. 1993. Water activity and physical state effects on amorphous food stability. *Journal of food processing and preservation*. 16: 433-447.
- Sadeghi M. and E. Mehryar, J. Razavi and S. A. Mireei. 2016. Moisture sorption isotherm and glass transition temperature of date powder in terms of various model systems: Glass transition temperature of date powder. *Journal of Food Process Engineering* 39: 61-68.
- Syamaladevi R. M., S. S. Sablani, J. Tang, J. Powers and B. G. Swanson. 2010. Water sorption and glass transition temperatures in red raspberry (*Rubus idaeus*). *Thermochimica Acta* 503–504: 90-96.
- Vazquez G. C., F., moreira,R. and Carballo,L. 1999. Adsorption isotherms of Muscatels and Aledo grape, and influence of pretreatment on muscatel isotherm. *Journal of Food Engineering* 39: 409-414.

