

تعیین منحنی‌های هم‌دمای دفعی رطوبت در دماهای خشک کردن پسته^۱

حمید رضا گازر و علیرضا بصیری^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۸۲/۹/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۳/۹/۱۰

چکیده

پسته یکی از مهمترین محصولات باغی کشور است که ارزش اقتصادی بالا دارد و صادرات آن بر اهمیت فرآوری و بسته بندی این محصول می‌افزاید. یکی از مراحل مهم در فرآوری پسته، خشک کردن و رساندن رطوبت محصول به محدوده مجاز ۴ تا ۶ درصد (بر پایه وزن خشک) مناسب برای انبارمانی است. برای طراحی بهینه سیستم خشک‌کن، نیاز به آگاهی از رفتار محصول در شرایط مختلف رطوبتی و دمایی در محیط است که با استفاده از منحنی‌های هم‌دما میسر خواهد شد. در این تحقیق، برای به دست آوردن رطوبت تعادلی پسته در دماهای خشک کردن، برای دو رقم از پسته‌های خندان ایران به نام‌های کله قوچی و فندق، منحنی‌های هم‌دما در دمای دفعی در دماهای ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. برای این منظور از روش استاتیک و محلول نمک‌های اشباع ذکر شده در دستور العمل COST-90 استفاده شد. پس از آن داده‌ها با مدل‌های GAB، هندرسون، اسمیت، هالسی و ازوین برازش و ضرایب مربوطه تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو رقم با افزایش دما مقدار رطوبت تعادلی کاهش می‌یابد. همچنین در بین مدل‌های به کار رفته در تحقیق، مدل‌های GAB و اسمیت نسبت به سایر مدل‌ها دارای بهترین برازش بودند. علاوه بر آن، نتایج نشان داد که با افزایش دما مقدار رطوبت تک لایه در پسته کاهش می‌یابد. همچنین، معادله رگرسیون تغییرات رطوبت تک لایه با تغییرات دما در محدوده دمایی ذکر شده برای هر دو رقم به دست آمد.

واژه‌های کلیدی

پسته، رطوبت تعادلی، رطوبت تک لایه، منحنی‌های هم‌دمایی

۱- برگرفته از پایان نامه دکتری با عنوان: بررسی و ارزیابی پارامترهای مؤثر در طراحی خشک‌کن پسته ایرانی.

واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

۲- به ترتیب استادیار پژوهش مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. کرج، صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۸۴۵

الکترونیکی: hgazor@yahoo.com و استادیار علوم و صنایع غذایی، پژوهشکده صنایع شیمیایی، سازمان

پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

مقدمه

نگهداری شد. تحقیق با روش استاتیک، مطابق دستورالعمل COST-90 در محدوده فعالیت آبی ۰/۱۱ تا ۰/۹۵ اجرا شد. دماهای آزمایش ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. در آن تحقیق برای برآزش داده‌های به دست آمده در حالت جذب و دفع رطوبت پسته از مدل GAB استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که مدل مذکور برآزش بسیار خوبی در محدوده فعالیت آبی مورد آزمون دارد. برای مدل مذکور مدول میانگین انحراف نسبی^۴ بین ۱ تا ۲/۸ درصد گزارش شد.

————سکن و کاراتاس————
(Maskan & Karatas, 1997) روی منحنی‌های هم‌دمای پسته کامل خندان شده رقم کرمان در سه دمای ۱۰، ۲۰، و ۳۰ درجه سانتی‌گراد تحقیق کردند. تحقیق آنها با روش استاتیک و فعالیت آبی مورد نظر، در دامنه ۰/۰۷-۰/۹۲ بود. در پژوهش مذکور از معادلات BET، GAB، اسمیت، هندرسون، چانگ-فاست، ازوین و هالسی جهت برآزش داده‌ها استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که در هر سه دمای آزمایش بین دو منحنی به دست آمده جذب و دفع رطوبت در پسته اختلاف وجود دارد. این اختلاف یا پدیده پسماند با افزایش دما کم می‌شود. از میان مدل‌های برآزش شده برای حالت جذب، مدل GAB و در حالت دفع بهترین برآزش مربوط به مدل هندرسون گزارش شد.

آیرانسی و دالگیسی و دالگیسی————
(Ayranci & Dalgic, 1992) در دماهای ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد روی منحنی هم‌دمای جذبی پسته رقم تربیتوس (که یکی از ارقام بومی

منحنی‌های هم‌دما^۱ بیانگر نقاطی هستند که در آنها ماده با محیط اطراف خود به تعادل رطوبتی رسیده است. در صنایع غذایی و کشاورزی این منحنی‌ها کاربرد فراوانی دارند و می‌توانند در فعالیت‌هایی نظیر خشک کردن، انبارداری، و بسته‌بندی استفاده شوند. به دلیل وجود پسماند^۲ در روند تشکیل منحنی‌های جذب و دفع، این دو منحنی با یکدیگر اختلاف دارند و هر کدام باید در محدوده کاربرد خود استفاده شود. برای وضعیت انبارداری، از منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت و در فرایندهایی نظیر خشک کردن (که مواد به محیط اطراف رطوبت می‌دهند) غالباً از منحنی‌های هم‌دمای دفع رطوبت استفاده می‌شود [۳]. مقدار رطوبت تعادلی در مواد معمولاً با دو روش ایستا (استاتیک) و پویا (دینامیک) تعیین می‌شود. نکته مهم در این روش‌ها این است که دما و رطوبت هوای پیرامون ماده ثابت باشد. سرعت عمل روش پویا در تعیین مقدار رطوبت تعادلی بیشتر است ولی روش استاتیک برای این منظور دقت بیشتری دارد [۱۴].

————وتیس و زارامبوتیس————
(Yanniotis & Zaramboutis, 1996) روی منحنی‌های هم‌دمای مغز و پوست سخت یکی از رقم‌های پسته یونان به نام اگیناس^۳ تحقیق کردند. پسته مذکور دارای ۵۰ تا ۵۵ درصد مغز است و پوست سخت آن نیز ۴۰ تا ۵۰ درصد وزن دانه را در بر می‌گیرد. پسته مورد آزمایش در آفتاب خشک و قبل از آزمایش به مدت ۳ تا ۶ ماه در دمای اتاق

1- Isotherm curves

2- Hysteresis

3- Aeginas

4- Mean Relative Percentage Deviation Modulus (MRPD)

دماهای ۱۵، ۲۵، ۳۵، و ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای پودر پسته و دماهای ۱۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد برای مغز پسته و پسته کامل به دست آمد. جهت ارائه مدل مناسب برای توضیح رفتار تعادلی پسته مدل‌های GAB، BET، ازوین، اسمیت، هالسی و هندرسون بررسی شد. نتایج نشان داد که داده‌های آزمایش در هر دو حالت جذب و دفع رطوبت با مدل اسمیت دارای بهترین برازش برای پسته کامل، مغز پسته، و پودر پسته بود [۷].

قوزی و همکاران (Güzey et al., 2001) روی منحنی‌های هم‌دمای جذب رطوبت فندق کال و فندق برشته شده در دماهای مختلف تحقیق کردند. تحقیق آنها به روش استاتیک و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج نشان داد که مدل GAB دارای برازش مناسبی با داده‌های آزمایش است. مقدار رطوبت تک لایه در این مدل برای فندق کال ۰/۱۶ و برای فندق برشته شده ۰/۱۰ تا ۰/۱۶ به دست آمد. آدام و همکاران (Adam et al., 2000) در تحقیقی هم‌دماهای جذبی و دفعی پياز را با روش استاتیک و مطابق با دستورالعمل COST-90 بررسی کردند. آنها از دماهای آزمایش ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و از محلول‌های نمک اشباع برای تأمین فعالیت آبی در محدوده ۰/۱۱ تا ۰/۹۴ استفاده کردند. نتایج نشان داد که منحنی سیگموئید (S شکل) است و با افزایش دما میزان رطوبت تعادلی در پياز کاهش می‌یابد.

لوپز و همکاران (Lopez et al., 2000) در تحقیقی هم‌دماهای جذبی مربوط به سبزی‌های خشک شده را

ترکیه است، تحقیق کردند. این رقم مصرف خوراکی دارد و از آن برای استخراج روغن نیز استفاده می‌شود. برای تعیین هم‌دمایی جذبی از روش استاتیک استفاده شد. داده‌ها با مدل GAB برازش شدند. نتایج تحقیق نشان داد که مدل به کار رفته دارای برازش مناسبی با داده‌های آزمایش است. همچنین در این تحقیق نتیجه‌گیری شد که با افزایش فعالیت آبی مقدار رطوبت تعادلی در پسته بیشتر می‌شود.

کاراتاس و باتالبی (Karatas & Battalbey, 1991) در پژوهشی دیگر منحنی‌های هم‌دمای جذبی و دفعی پسته رقم غازی آنتپ^۱ ترکیه را به دست آوردند. در آن پژوهش نقاط هم‌دمای جذب و دفع رطوبت در مغز، دانه پسته با پوست نرم خارجی^۲، و دانه بدون پوست نرم خارجی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و دامنه فعالیت آبی ۰/۱۵ تا ۱ (رطوبت نسبی هوا ۱۵ تا ۱۰۰ درصد) به دست آمد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که وجود پوست‌های سخت و نرم بیرونی باعث بروز پدیده پسماند در منحنی‌های جذب و دفع رطوبت در پسته می‌شود. در ضمن، به دلیل وجود پوست‌های نرم و سخت پسماند به وجود آمده در حالتی که پسته دارای هر دو پوست سخت و نرم خارجی باشد، بیشتر از دو حالت دیگر است و برای مغز پسته دارای حداقل مقدار خود است.

جعفریان در تحقیق خود داده‌های هم‌دمای پسته رقم امیری را مطابق با روش استاتیک و دستورالعمل COST-90 بررسی کرد. در آن تحقیق منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت در

منطقه زرنده ساوه (که قبلاً بدون استفاده از خشک کن و به صورت طبیعی در مدت ۴ روز خشک شده بودند) به مدت ۲۸ تا ۳۵ روز در معرض هوای محفظه‌ای مرطوب (بیش از ۹۵ درصد رطوبت) و دمای ۲۴ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا به حالت تعادل رطوبت با محیط اطراف خود برسند. پسته‌های مورد آزمایش با ترازوی دیجیتال و با دقت ± 0.01 گرم توزین شدند. برای جلوگیری از کپک‌زدگی پسته‌ها و رشد قارچ‌ها، در طول آزمایش از تولوئن^۲ و لوله‌های موئین استفاده شد. این لوله‌ها به جدار داخلی محفظه چسبانیده می‌شدند [۵، ۱۲ و ۱۴]. پسته فندقی پس از گذشت چهار هفته و پسته کله قوچی پس از حدود پنج هفته به تعادل رطوبتی با محیط اطراف خود رسید؛ اختلاف افزایش وزن در آنها کمتر از ۰/۰۵ گرم بود. پس از آن از پسته‌های مورد آزمایش نمونه‌گیری و با استفاده از آون خلأ در مدت ۶ تا ۸ ساعت در فشار ۹۰۰- میلی‌بار و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد رطوبت موجود در آنها به روش وزنی تعیین شد [۸ و ۱۲]. این رطوبت برای پسته کله قوچی ۳۷/۶۰ و برای پسته فندقی ۳۴/۵۱ درصد بر پایه وزن خشک به دست آمد. نمک‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع آزمایشگاهی و از تولیدات شرکت مرک^۳ آلمان بودند. محلول اشباع این نمک‌ها در دماهای مختلف رطوبت‌های نسبی متفاوتی را در هوای پیرامون خود ایجاد می‌کند. فعالیت آبی نمک‌های ذکر شده در محدوده ۰/۱۰۲۳ تا ۰/۸۱۷۴ برای محدوده دمایی ۴۵ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از مراجع معتبر (جدول شماره ۱) ارائه شده است [۴ و ۱۰].

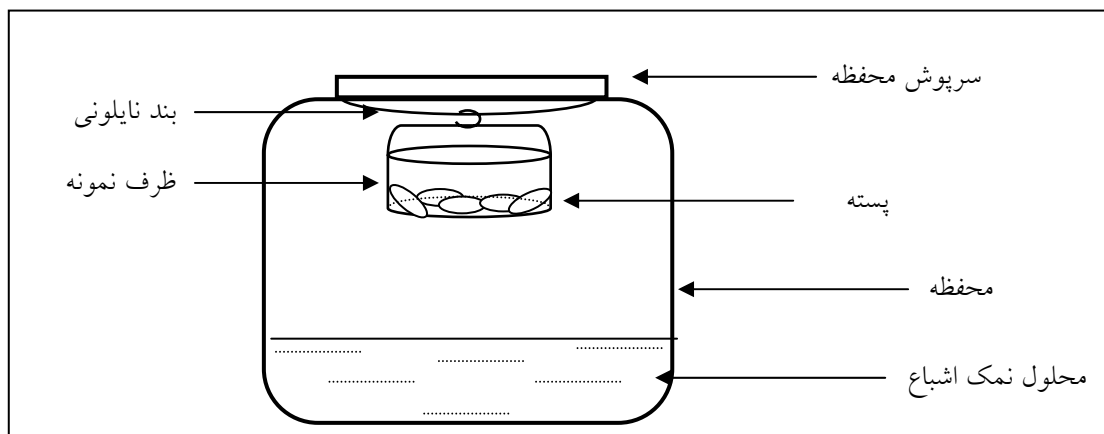
بررسی کردند. دماهای آزمایش ۲۵، ۴۰، ۶۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد بود. در آزمایش‌ها از محلول اسید سولفوریک و روش استاتیک در محدوده فعالیت آبی صفر تا ۰/۹ استفاده شد. نتایج نشان داد که از بین مدل‌های برازش شده، مدل‌های GAB و هالسی بهترین برازش و حداقل میانگین مربعات خطا (MSE) را داشتند.

آگاهی از مقدار رطوبت تعادلی پسته به بهبود فرایند خشک شدن محصول کمک و از اتلاف وقت و انرژی در این امر جلوگیری می‌کند. تعیین مقدار رطوبت نهایی موجود در پسته بستگی زیادی به دما و رطوبت نسبی هوای پیرامون دارد و با آنها تغییر می‌کند. به منظور بهینه‌سازی فرایند خشک کردن پسته، هدف از این تحقیق به دست آوردن رطوبت‌های تعادلی و منحنی‌های هم‌دمایی در محدوده دمایی خشک کردن پسته (۴۵ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد) بود که با استفاده از آنها حداکثر مقدار خشک شدگی دو رقم از پسته‌های ایران، کله قوچی و فندقی، در شرایط مختلف دما و رطوبت محیط برای اولین بار به دست آمد.

مواد و روش‌ها

برای دو رقم پسته (کله قوچی و فندقی) در دماهای متداول خشک شدن پسته، یعنی ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد، منحنی هم‌دمای دفعی به دست آمد. برای تعیین این منحنی‌ها از روش استاتیک (وزن سنجی) مطابق با دستورالعمل اندازه‌گیری فعالیت آبی مواد غذایی (COST-90) استفاده شد [۱۶].

ابتدا پسته‌های برداشت شده از باغ‌های پسته



شکل شماره ۱- ظرف محلول نمک اشباع به همراه نمونه آزمایش

نمونه‌های آزمایش درون ظروف کوچک شیشه‌ای به قطر ۴ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر گذاشته شدند و به صورت معلق داخل ظروف شیشه‌ای حاوی محلول‌های نمک اشباع، با قطر میانی ۱۴ و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر، قرار داده شدند. سپس وزن ۴ تا ۵ عدد پسته مورد آزمایش موجود در ظروف شیشه‌ای (با قطر ۴ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر با ترازوی دیجیتالی و دقت ± 0.001 گرم به دست آمد. ظروف نمونه‌گیر حاوی پسته با قلاب و نخ نایلونی به قطر ۸ میلی‌متر، در فضای داخل ظروف شیشه‌ای محلول نمک‌های اشباع با قطر میانی ۱۴ و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر به صورت معلق قرار داده شد (شکل شماره ۱). بعد از گذاشتن سرپوش، ظروف حاوی محلول‌های اشباع نمک و پسته‌های آزمایش با استفاده از یک آون با دقت ± 0.5 درجه سانتی‌گراد در دماهای آزمایش قرار داده شد. برای ایجاد جریان هوای گرم و یکنواخت بودن دمای داخل دستگاه از یک فن کوچک درون آون استفاده شد. عملیات توزین سه روز بعد و به

برای آماده سازی محلول‌های اشباع نمک از کتاب راهنمای پری استفاده شد [۱۳]. برای حصول اطمینان از اشباع بودن محلول‌های نمک در دماهای آزمایش، آماده سازی محلول‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. پس از اطمینان از اشباع بودن نمک‌ها که با تجمع بلورهای نمک در ته ظرف‌ها مشخص بود، سرپوش آنها به طور کامل بسته و برای کنترل اشباع بودن، به مدت ۶ ساعت در یک آون با بالاترین دمای آزمایش یعنی ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند که در پایان زمان ذکر شده وجود بلورهای نمک در ته ظرف نشان می‌داد که محلول در حالت اشباع است. در غیر این صورت به محلول مجدداً نمک اضافه و چرخه بالا تکرار می‌شد تا محلول مورد آزمایش به حالت اشباع درآید. پس از آماده شدن محلول نمک اشباع، مقدار ۱۵۰ میلی‌لیتر از هر محلول در ظروف آزمایش ریخته شد.

هر نمونه آزمایش از ۴ تا ۵ عدد از هر رقم پسته با وزنی در حدود ۵ تا ۷ گرم تشکیل می‌شد.

صورت روزانه انجام شد. تا زمانی ادامه داشت که اختلاف دو توزین متوالی به کمتر از ۰/۰۰۵ گرم می‌رسید. پس از به تعادل رسیدن رطوبت پسته‌ها با محیط اطراف خود، رطوبت نهایی (رطوبت تعادلی) هر نمونه با روش ذکر شده تعیین گردید. آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد و پس از به دست آمدن رطوبت تعادلی نمونه‌ها در هر کدام از رطوبت‌های نسبی ایجاد شده، برای برازش داده‌ها از روش رگرسیون خطی استفاده شد و با استفاده از نرم افزارهای Statistica 5.1 و Excel 97 Microsoft، مدل‌های مشروحه زیر با داده‌ها برازش داده شدند [۳ و ۵].

$$M_e = \frac{CKM_m A_w}{(1 - KA_w)(1 - KA_w + CK A_w)} \quad (1) \quad \text{مدل گاب (GAB):}$$

$$M_e = A \left(\frac{A_w}{1 - A_w} \right)^B \quad (2) \quad \text{مدل ازوین (OSWIN):}$$

$$M_e = A - B \ln(1 - A_w) \quad (3) \quad \text{مدل اسمیت (SMITH):}$$

$$(1 - A_w) = \exp(1 - ATM_e^B) \quad (4) \quad \text{مدل هندرسون (HENDERSON):}$$

$$M_e = (-A / \ln A_w)^B \quad (5) \quad \text{مدل هالسی (HALSEY):}$$

در معادلات بالا:

A_w = فعالیت آبی ، M_e = رطوبت تعادلی (بر مبنای درصد وزن خشک) ، M_m = رطوبت تک لایه^۱ (بر مبنای درصد وزن خشک) ، T = دما (K) ، و A, B, C, K = ثابت‌های معادلات است.

جدول شماره ۱- فعالیت آبی نمک‌های مورد استفاده در دماهای آزمایش

مرجع	فعالیت آبی (A_w)	دما (درجه سانتی‌گراد)	نام نمک	شماره
(Greenspan, 1977)	۰/۱۱۱۶	۴۵		۱
(Greenspan, 1977)	۰/۱۰۹۵	۶۰	کلرید لیتیوم	
(Greenspan, 1977)	۰/۱۰۶۴	۷۵	(LiCl)	
(Greenspan, 1977)	۰/۱۰۲۳	۹۰		
(Labuza et al., 1985)	۰/۱۹۸۰	۴۵		۲
(Labuza et al., 1985)	۰/۱۷۵۰	۶۰	استات پتاسیم	
(Labuza et al., 1985)	۰/۱۵۴۰	۷۵	(CH ₃ COOK)	
(Labuza et al., 1985)	۰/۱۴۱۰	۹۰		

۱- رطوبت تک لایه، رطوبتی است که در ماده باقی می‌ماند و از برخورد منحنی هم‌دما با محور عمودی به دست می‌آید [۳].

ادامه جدول شماره ۱

مرجع	فعالیت آبی (A_w)	دما (درجه سانتی‌گراد)	نام نمک	\hat{r}_i
(Greenspan, 1977)	۰/۳۱۱۰	۴۵		
(Greenspan, 1977)	۰/۲۹۲۶	۶۰	کلرید منیزیم	۳
(Greenspan, 1977)	۰/۲۶۹۴	۷۵	($MgCl_2$)	
(Greenspan, 1977)	۰/۲۴۱۲	۹۰		
(Labuza et al., 1985)	۰/۴۳۰۰	۴۵		
(Labuza et al., 1985)	۰/۴۲۱۲	۶۰	کربنات پتاسیم	۴
(Labuza et al., 1985)	۰/۴۱۳۴	۷۵	(K_2CO_3)	
(Labuza et al., 1985)	۰/۴۰۶۳	۹۰		
(Greenspan, 1977)	۰/۶۹۹۹	۴۵		
(Greenspan, 1977)	۰/۶۷۳۵	۶۰	نیترات سدیم	۵
(Greenspan, 1977)	۰/۶۵۵۶	۷۵	($NaNO_3$)	
(Greenspan, 1977)	۰/۶۵۰۰	۹۰		
(Greenspan, 1977)	۰/۷۴۵۲	۴۵		
(Greenspan, 1977)	۰/۷۴۵۰	۶۰	کلرید سدیم	۶
(Greenspan, 1977)	۰/۷۵۵۸	۷۵	($NaCl$)	
(Greenspan, 1977)	۰/۷۴۳۰	۹۰		
(Greenspan, 1977)	۰/۸۱۷۴	۴۵		
(Greenspan, 1977)	۰/۸۰۲۵	۶۰	کلرید پتاسیم	۷
(Greenspan, 1977)	۰/۷۹۱۷	۷۵	(KCl)	
(Greenspan, 1977)	۰/۷۸۵۰	۹۰		

برای ارزیابی برازش مدل‌های ذکر شده با داده‌های آزمایش، علاوه بر ضریب تعیین (R^2)، از دو شاخص SEE^1 و $MRPD$ به شرح زیر استفاده شد. هر دو مقدار برای بهترین برازش باید حداقل باشد. اگر مقدار $MRPD$ کمتر از ۵ درصد باشد برازش عالی و اگر از ۱۰ درصد بزرگتر باشد برازش ضعیف است [۱۵ و ۱۲].

1- Standard Error of Estimate (SEE)

قبولی با داده‌های آزمایش دارند و می‌توان از آنها برای تخمین مقدار رطوبت تعادلی پسته در محدوده دماها و رطوبت‌های نسبی آزمون شده به هنگام فرایند خشک کردن استفاده کرد. در مجموع برای هر دو رقم، مدل‌های GAB و اسمیت در مقایسه با مدل‌های دیگر برازش بهتری دارند و هر دو مدل دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر MRPD (پایین‌تر از ۵) و SEE هستند. در مقایسه بین دو مدل مذکور، مدل GAB دارای برازش بهتری با داده‌ها بود ولی به دلیل کم بودن تعداد پارامترها در مدل اسمیت و سهولت آن در کاربرد و نیز نبود اختلاف قابل توجه در شاخص‌های ارزیابی هر دو مدل، بهتر است در تخمین رطوبت تعادلی پسته از مدل اسمیت استفاده شود. جعفریان (۱۳۷۸) نیز برای دماهای پایین‌تر از ۵۰ درجه سانتی‌گراد بهترین مدل برازش شده با داده‌های آزمایش را مدل اسمیت گزارش کرد. به عنوان نمونه مقایسه برازش مدل‌های GAB و اسمیت با داده‌های آزمایش پسته‌های کله قوچی و فندقی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، در شکل‌های شماره ۲ و ۳ ارائه شده است.

$$SEE = \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{(M_{predicted} - M_{observed})^2}{d.f.}}$$

$$d.f. = N - n \quad (6)$$

$$MRPD = \frac{100}{N} \sum \left| \frac{M_{predicted} - M_{observed}}{M_{observed}} \right| \quad (7)$$

در معادلات بالا:

$M_{predicted}$ = رطوبت به دست آمده از مدل (بر مبنای وزن خشک)،

$M_{observed}$ = رطوبت تعادلی به دست آمده از آزمایش (بر مبنای وزن خشک)،

N = تعداد مشاهدات برای هر مدل،

n = تعداد ثابت‌های مدل، و

$d.f.$ = درجه آزادی است.

نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها، مدل‌های مورد استفاده در تحقیق با داده‌های آزمایش برازش شدند که نتایج به دست آمده در جدول‌های شماره ۲ و ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مدل‌های مورد استفاده در تحقیق، در بیشتر موارد برازش قابل

جدول شماره ۲- نتایج برازش مدل‌های تحقیق با داده‌های پسته کله قوچی

SEE	MRPD	R ²	ثابت‌های مدل‌ها					دمای آزمایش		مدل
			M _m	K	C	B	A	درجه (سانتیگراد)		
۰/۱۸۹	۳/۴۲۸	۰/۹۹۹	-	-	-	۷/۸۰۸	۰/۴۵۰	۴۵	اسمیت	
۰/۳۵۳	۲/۹۹۶	۰/۹۹۳	-	-	-	۶/۴۸۷	۰/۷۳۷	۶۰	(Smith)	
۰/۱۸۱	۳/۲۱۷	۰/۹۹۸	-	-	-	۵/۵۹۱	۰/۲۳۳	۷۵		
۰/۱۱۸	۴/۹۸۲	۰/۹۹۸	-	-	-	۴/۵۱۰	۰/۳۵۱	۹۰		
۰/۴۷۴	۵/۵۹۴	۰/۹۹۴	-	-	-	۰/۱۷۴	۰/۰۰۰۲۶	۴۵	هندرسون	
۰/۴۷۹	۶/۶۰۶	۰/۹۹۱	-	-	-	۱/۳۰۱	۰/۰۰۰۲۳	۶۰	(Henderson)	
۰/۲۲۹	۴/۶۷۸	۰/۹۹۷	-	-	-	۱/۱۱۴	۰/۰۰۰۴۰	۷۵		
۰/۱۵۳	۴/۲۶۷	۰/۹۹۶	-	-	-	۱/۱۸۷	۰/۰۰۰۴۲	۹۰		
۰/۲۵۷	۲/۹۹۲	۰/۹۹۸	-	-	-	۰/۶۳۷	۵/۵۳۸	۴۵	ازوین	
۰/۳۳۶	۳/۰۵۳	۰/۹۹۸	-	-	-	۰/۵۸۲	۵/۰۸۵	۶۰	(Oswin)	
۰/۲۹۱	۳/۶۹۶	۰/۹۹۶	-	-	-	۰/۶۸۲	۳/۸۲۳	۷۵		
۰/۲۲۲	۵/۱۷۹	۰/۹۹۴	-	-	-	۰/۶۴۷	۳/۳۱۱	۹۰		
۰/۸۵۵	۸/۹۸۸	۰/۹۸۳	-	-	-	۱/۰۷۸	۳/۹۰۵	۴۵	هالسی	
۰/۶۰۰	۷/۰۶۳	۰/۹۸۷	-	-	-	۱/۱۵۹	۴/۰۷۴	۶۰	(Halsey)	
۰/۶۸۰	۱۱/۳۸۹	۰/۹۷۷	-	-	-	۰/۹۸۳	۲/۳۰۰	۷۵		
۰/۵۳۵	۱۱/۰۶۹	۰/۹۷۴	-	-	-	۱/۰۲۴	۲/۰۹۵	۹۰		
۰/۱۶۲	۳/۲۲۱	۰/۹۹۹	۴/۳۵۲	۰/۸۸۱	۳/۵۱۱	-	-	۴۵	گاب	
۰/۳۷۳	۳/۴۲۹	۰/۹۹۷	۳/۴۵۹	۰/۸۹۵	۵/۴۳۰	-	-	۶۰	(GAB)	
۰/۱۸۴	۴/۱۵۴	۰/۹۹۹	۳/۳۳۱	۰/۸۶۳	۲/۹۴۳	-	-	۷۵		
۰/۱۱۷	۳/۹۳	۰/۹۹۹	۲/۸۱۸	۰/۸۴۵	۳/۴۶۹	-	-	۹۰		

جدول شماره ۳- نتایج برازش مدل‌های تحقیق با داده‌های پسته فندقی

SEE	MRPD	R ²	ثابت‌های مدل‌ها					دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	مدل
			M _m	K	C	B	A		
۰/۱۹۸	۲/۲۷۴	۰/۹۹۸	-	-	-	۶/۴۴۵	۰/۹۲۴	۴۵	اسمیت
۰/۲۹۳	۴/۰۳۵	۰/۹۹۴	-	-	-	۵/۸۳۹	۰/۶۸۳	۶۰	(Smith)
۰/۲۵۱	۵/۱۵۳	۰/۹۹۵	-	-	-	۵/۱۶۳	۰/۱۵۵	۷۵	
۰/۱۹۹	۳/۴۰۰	۰/۹۹۴	-	-	-	۴/۰۱۰	۰/۳۶۵	۹۰	
۰/۵۶۹	۶/۳۸۵	۰/۹۸۸	-	-	-	۱/۳۶۷	۰/۰۰۰۲۰	۴۵	هندرسون
۰/۶۰۷	۸/۰۱۷	۰/۹۸۵	-	-	-	۱/۳۴۶	۰/۰۰۰۲۴	۶۰	(Henderson)
۰/۳۶۹	۵/۹۱۱	۰/۹۹۵	-	-	-	۱/۱۲۶	۰/۰۰۰۴۴	۷۵	
۰/۲۹۴	۵/۴۸۰	۰/۹۹۵	-	-	-	۱/۲۵۸	۰/۰۰۰۴۳	۹۰	
۰/۰۸۷	۱/۶۰۴	۰/۹۹۹	-	-	-	۰/۵۴۹	۵/۲۹۶	۴۵	ازوین
۰/۲۲۰	۳/۲۱۹	۰/۹۹۸	-	-	-	۰/۵۶۴	۴/۶۲۱	۶۰	(Oswin)
۰/۱۶۳	۳/۴۱۷	۰/۹۹۸	-	-	-	۰/۶۷۶	۳/۴۷۵	۷۵	
۰/۱۸۸	۲/۹۸۰	۰/۹۹۸	-	-	-	۰/۶۱۲	۳/۰۳۰	۹۰	
۰/۴۲۷	۵/۰۰۷	۰/۹۹۳	-	-	-	۱/۲۴۶	۴/۹۲۴	۴۵	هالسی
۰/۲۸۸	۴/۳۱۰	۰/۹۹۵	-	-	-	۱/۱۹۱	۳/۸۳۱	۶۰	(Halsey)
۰/۴۶۰	۷/۹۲۹	۰/۹۸۴	-	-	-	۰/۹۹۰	۲/۱۱۱	۷۵	
۰/۳۷۴	۷/۴۹۰	۰/۹۸۶	-	-	-	۱/۰۷۸	۲/۰۳۳	۹۰	
۰/۰۸۰	۱/۷۸۶	۰/۹۹۹	۳/۳۱۷	۰/۹۰۷	۷/۲۲۴	-	-	۴۵	گاب
۰/۱۴۹	۲/۵۲۱	۰/۹۹۹	۲/۶۹۹	۰/۹۴۰	۷/۷۱۳	-	-	۶۰	(GAB)
۰/۱۶۹	۳/۰۳۸	۰/۹۹۹	۲/۳۹۵	۰/۹۳۶	۳/۹۲۵	-	-	۷۵	
۰/۲۰۴	۲/۸۹۰	۰/۹۹۸	۲/۱۰۱	۰/۹۰۲	۴/۸۵۶	-	-	۹۰	

افزایش رطوبت تعادلی می‌شود. این تغییرات در فعالیت‌های آبی بالاتر از ۰/۴۰ بیشتر مشهود است. به عنوان نمونه، تغییرات رطوبت تعادلی ناشی از افزایش رطوبت نسبی هوا، برای دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. با نگاهی اجمالی به نمودار می‌توان دریافت که تغییرات رطوبت تعادلی در پسته فندقی در سطوحی پایین‌تر از پسته کله قوچی است که دلیل آن اختلاف در رقم و خواص هر یک از آنهاست.

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول شماره ۴، مشاهده می‌شود که در هر دو رقم پسته استفاده از دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد در فعالیت‌های آبی بالاتر از ۰/۶۹ موجب می‌شود پسته به طور مناسب خشک نشود. از این رو برای خشک کردن مناسب پسته در رطوبت‌های نسبی ۶۵ تا ۷۰ درصد، دمای خشک‌کن را باید به بیش از ۷۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داد؛ با افزایش دما به ۹۰ درجه سانتی‌گراد، می‌توان پسته را در رطوبت نسبی حدود ۷۰ درصد تا نزدیک به ۵ درصد خشک کرد. همچنین از این جدول مشاهده می‌شود که در رطوبت‌های بیشتر از ۷۵ درصد حتی دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد هم قادر به خشک کردن مناسب پسته نخواهد بود. از این داده‌ها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در مناطقی که رطوبت نسبی هوا بین ۶۰ تا ۷۵ درصد است، برای خشک کردن پسته نمی‌توان از روش آفتابی یا دماهای پایین‌تر از ۷۵ درجه سانتی‌گراد در خشک‌کن استفاده کرد زیرا رطوبت محصول به محدوده مجاز برای نگهداری (۴ تا ۶ درصد بر پایه خشک) نمی‌رسد و به هنگام انبارداری احتمال بروز فساد در آن وجود دارد [۸].

نتایج به دست آمده از جداول بالا نشان داد که مدل هندرسون در پسته کله قوچی نسبت به پسته فندقی دارای کارایی بهتری است. همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو رقم ضعیف‌ترین برآزش در دماهای مختلف آزمایش مربوط به مدل هالسی است. علاوه بر آن، نتایج حاصل از دو جدول مذکور نشان می‌دهد که در مدل GAB، مقدار رطوبت تک لایه (M_m) در هر دو رقم پسته با افزایش دما کاهش پیدا می‌کند. این تغییر در تحقیق ایگلسیاس-شریف (Iglesias & Chirife, 1982) گزارش شده است و لوپز و همکاران (Lopez et al., 2000) نیز آن را تأیید کرده‌اند.

با استفاده از روش رگرسیون خطی، معادله تغییرات رطوبت تک لایه (بر مبنای درصد وزن خشک) در اثر تغییرات دما (درجه سانتی‌گراد) برای هر دو رقم پسته در محدوده دمای ۴۵ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد به شرح زیر به دست آمد.

برای پسته کله قوچی

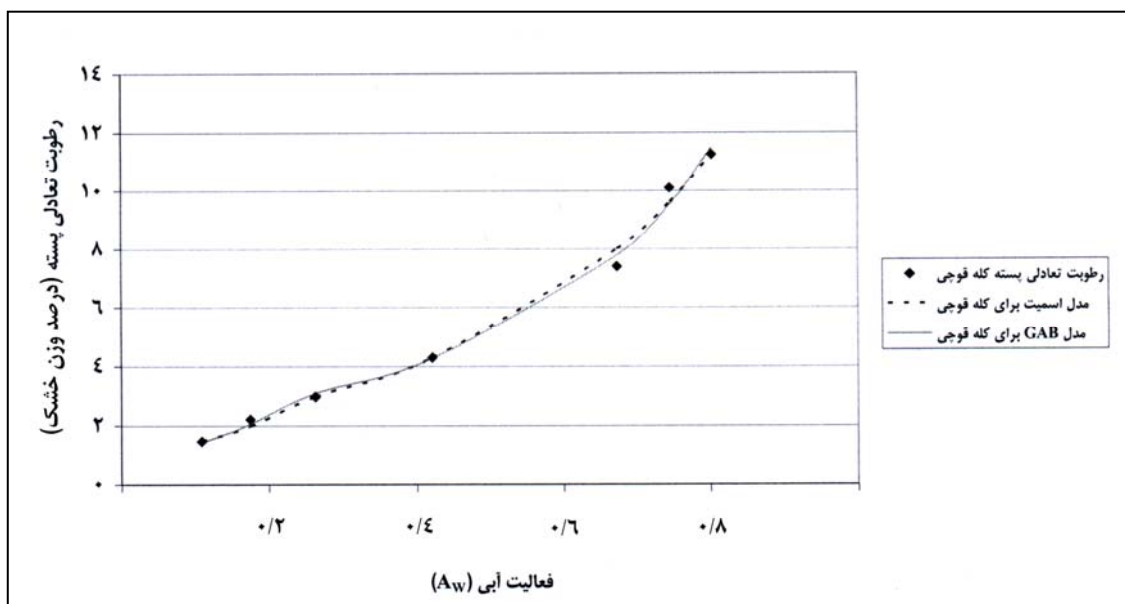
$$M_m = -0.032(T) + 5.644 \quad R^2 = 0.931 \quad (8)$$

برای پسته فندقی

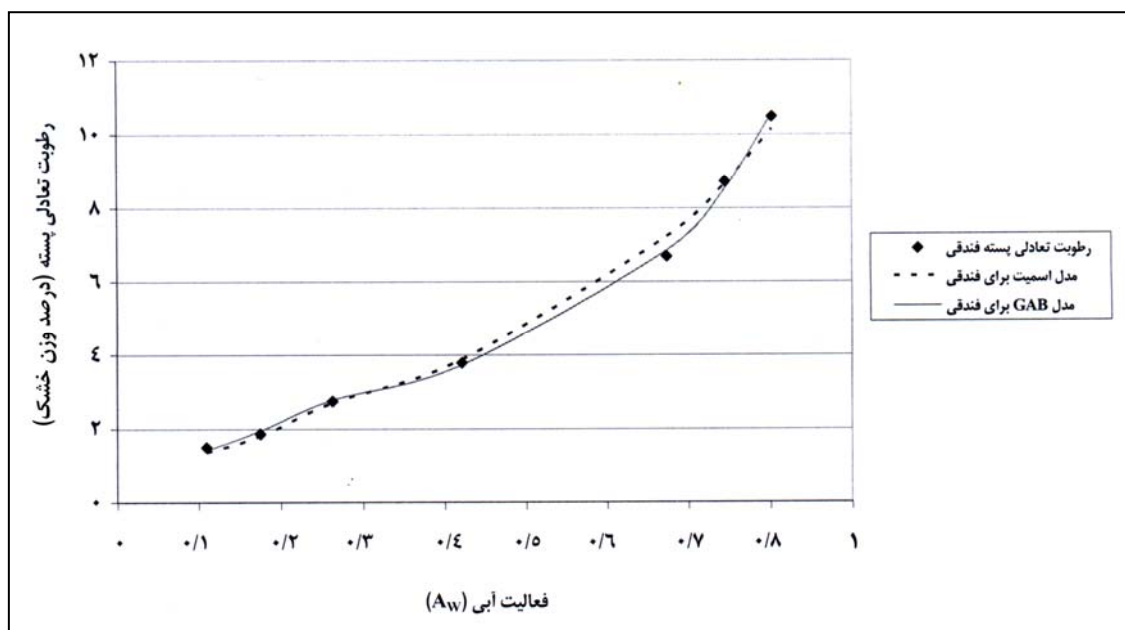
$$M_m = -0.026(T) + 4.406 \quad R^2 = 0.962 \quad (9)$$

با استفاده از معادلات به دست آمده می‌توان برای هر دو رقم پسته، در محدوده دمایی ذکر شده مقدار رطوبت تک لایه را بدون آزمایش و با تقریب قابل قبولی تخمین زد.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول شماره ۴، مشاهده می‌شود که در تمامی دماها و در هر دو رقم پسته، افزایش رطوبت نسبی (فعالیت آبی) موجب



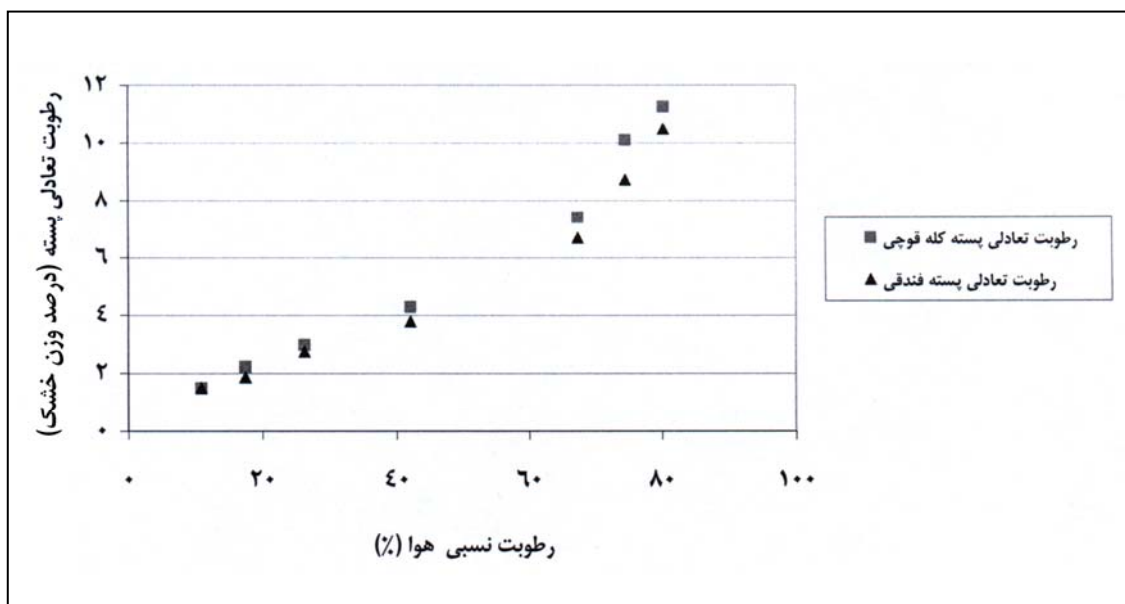
شکل شماره ۲- برازش مدل‌های GAB و اسمیت با داده‌های آزمایش برای پسته کله قوچی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد



شکل شماره ۳- برازش مدل‌های GAB و اسمیت با داده‌های آزمایش برای پسته فندقی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد

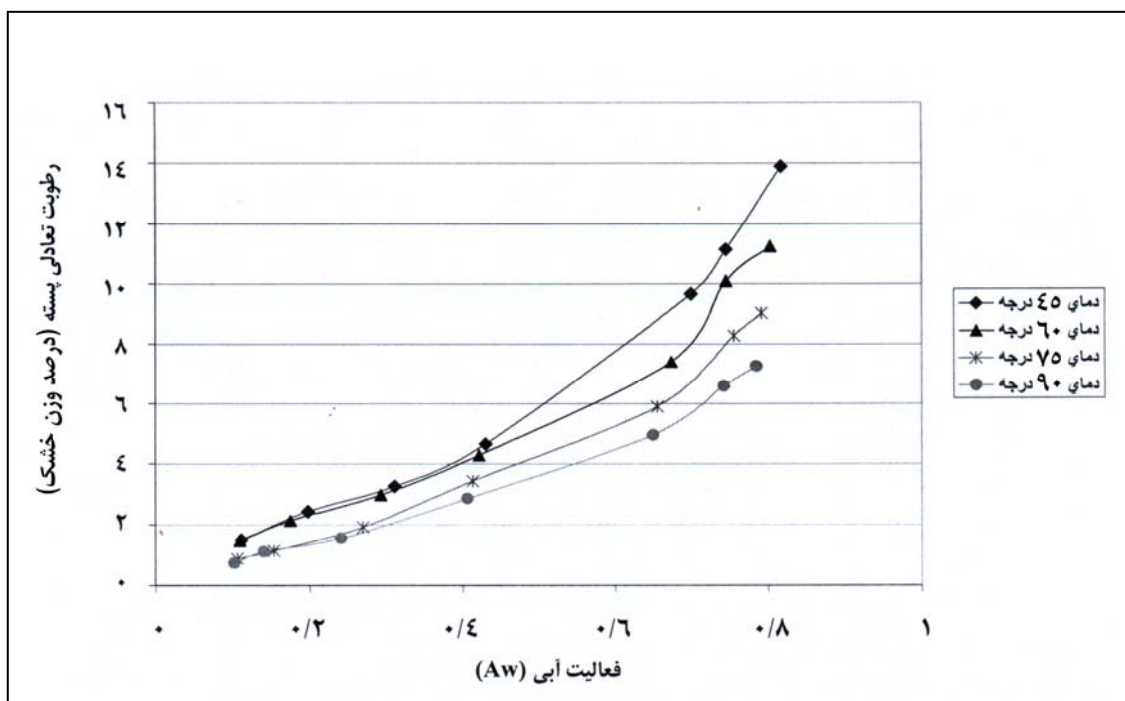
جدول شماره ۴ - رطوبت تعادلی پسته کله قوچی و فندق‌های آزمایش

رطوبت تعادلی پسته فندق (درصد بر مبنای وزن خشک)	رطوبت تعادلی پسته کله قوچی (درصد بر مبنای وزن خشک)	فعالیت آبی (A_w)	دما (درجه سانتی‌گراد)
۱/۷۶۵	۱/۴۸۹	۰/۱۱۱۶	
۲/۳۸۴	۲/۴۳۲	۰/۱۹۸۰	
۳/۳۷۵	۳/۲۵۴	۰/۳۱۱۰	
۴/۴۸۸	۴/۶۴۵	۰/۴۳۰۰	۴۵
۸/۴۶۳	۹/۶۶۸	۰/۶۹۹۹	
۹/۵۴۹	۱۱/۱۳۹	۰/۷۴۵۲	
۱۲/۱۹۸	۱۳/۸۹۵	۰/۸۱۷۴	
۱/۴۹۷	۱/۴۷۷	۰/۱۰۹۵	
۱/۸۶۸	۲/۱۲۹	۰/۱۷۵۰	
۲/۷۴۷	۲/۹۷۶	۰/۲۹۲۶	
۳/۷۸۶	۴/۲۸۵	۰/۴۲۱۲	۶۰
۶/۶۸۲	۷/۳۹۶	۰/۶۷۳۵	
۸/۷۲۳	۱۰/۰۹۰	۰/۷۴۵۰	
۱۰/۴۷۷	۱۱/۲۴۸	۰/۸۰۲۵	
۰/۷۹۷	۰/۸۸۵	۰/۱۰۶۴	
۱/۱۲۸	۱/۱۳۷	۰/۱۵۴۰	
۱/۷۱۷	۱/۹۱۴	۰/۲۶۹۴	
۲/۹۵۸	۳/۴۳۶	۰/۴۱۳۴	۷۵
۵/۱۶۸	۵/۸۹۷	۰/۶۵۵۶	
۷/۵۹۶	۸/۲۵۹	۰/۷۵۵۸	
۸/۴۲۰	۹/۰۱۷	۰/۷۹۱۷	
۰/۷۷۴	۰/۷۳۱	۰/۱۰۲۳	
۱/۰۲۵	۱/۱۱۸	۰/۱۴۱۰	
۱/۵۰۶	۱/۵۴۶	۰/۲۴۱۲	
۲/۴۷۴	۲/۸۴۹	۰/۴۰۶۳	۹۰
۴/۲۵۰	۴/۹۵۶	۰/۶۵۰۰	
۶/۱۰۶	۶/۵۷۵	۰/۷۴۳۰	
۶/۴۷۴	۷/۲۴۴	۰/۷۸۵۰	

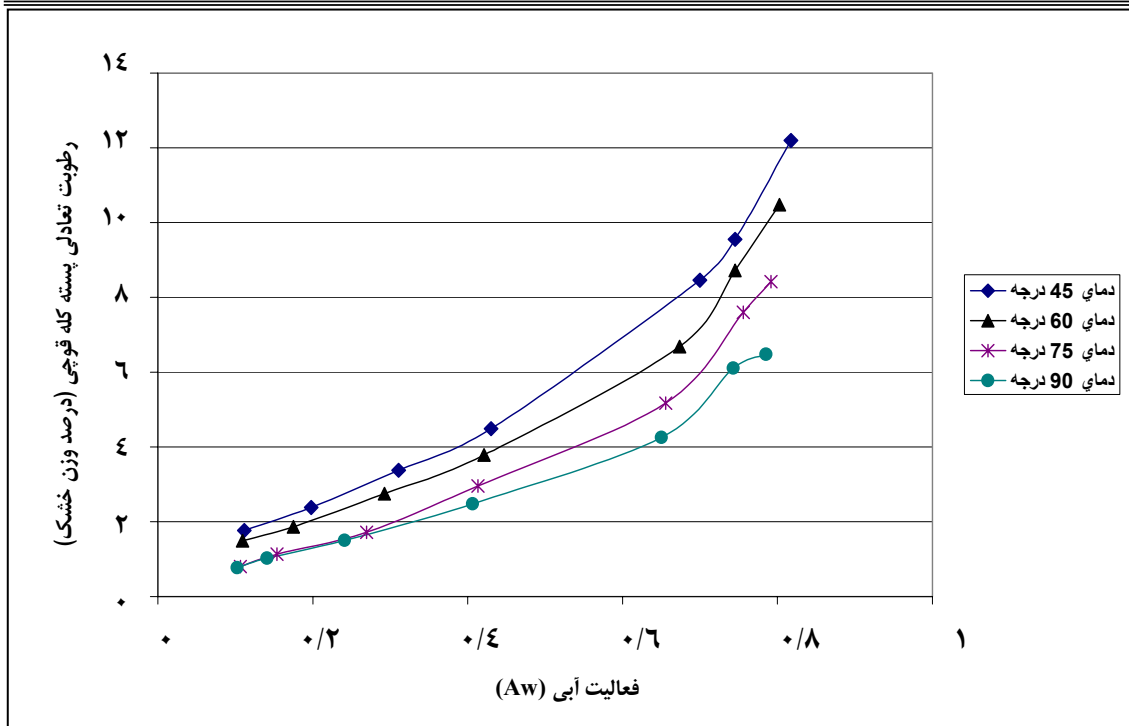


شکل شماره ۴- تغییرات رطوبت تعادلی پسته ناشی از افزایش رطوبت نسبی هوا، در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که برای هر دو رقم پسته، افزایش دما در محدوده فعالیت آبی ثابت موجب کاهش مقدار رطوبت تعادلی در پسته می شود (شکل های شماره ۵ و ۶).



شکل شماره ۵- تأثیر دما بر مقدار رطوبت تعادلی در پسته کله قوچی



شکل شماره ۶- تأثیر دما بر مقدار رطوبت تعادلی در پسته فندقی

این خود جذب رطوبت بیشتر از پسته و پایین آمدن رطوبت تعادلی آن را به دنبال دارد [۴، ۱۴، ۱۵].

نتیجه‌گیری

۱- برای هر دو رقم پسته، در میان مدل‌های به کار رفته در تحقیق، مدل‌های GAB و اسمیت دارای برآزش بهتری با داده‌های آزمایش بودند و می‌توان از آنها برای تخمین رطوبت تعادلی پسته‌های کله قوچی و فندقی در دماهای خشک کردن استفاده کرد.

۲- با توجه به کمتر بودن پارامترهای مدل اسمیت نسبت به مدل GAB و سهولت کاربرد آن، بهتر است جهت تعیین رطوبت تعادلی در پسته از مدل اسمیت استفاده شود.

همان‌گونه که در شکل‌ها مشاهده می‌شود این کاهش رطوبت در فعالیت‌های آبی بالاتر از ۰/۴، بیشتر است که نشانگر آن است که در رطوبت‌های نسبی بالاتر از ۴۰ درصد، تأثیر افزایش دما بر کاهش رطوبت تعادلی پسته زیاد می‌شود. این نتیجه برای اغلب مواد غذایی نیز مورد انتظار هست و افزایش دما در فعالیت آبی متوسط موجب کاهش مقدار آب جذب شده خواهد شد. فقط برخی از قندها و ترکیبات غذایی با وزن مولکولی پایین که در آب حل می‌شوند و در دماهای بالاتر رطوبت بیشتری جذب می‌کنند، از این قاعده مستثنی هستند. دلیل بروز پدیده فوق این است که با افزایش دما مقدار انرژی گرمایی در محیط بالا می‌رود و در واقع بر ظرفیت جذب رطوبت در محیط افزوده می‌شود، که

- ۳- با نتایج حاصل از تحقیق می‌توان در محدوده دماهای آزمایش رطوبت تک لایه را به کمک مدل GAB تخمین زد.
- ۴- در تمامی دماها و در هر دو رقم پسته، افزایش رطوبت نسبی (فعالیت آبی)، موجب افزایش رطوبت تعادلی در پسته می‌شود. این تغییرات در فعالیت‌های آبی بالاتر از ۰/۴۰ بیشتر مشهود است. با نگاهی اجمالی به داده‌های آزمایش می‌توان دریافت که تغییرات رطوبت در پسته فندقی در سطوحی پایین‌تر از پسته کله قوچی قرار دارد.
- ۵- در تمامی رطوبت‌های نسبی (فعالیت آبی)، افزایش دما موجب کاهش مقدار رطوبت تعادلی در هر دو رقم پسته می‌شود. این تغییرات در فعالیت‌های آبی بالاتر از ۰/۴۰ بارزتر است.
- ۶- برای هر دو رقم پسته، استفاده از دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد در رطوبت‌های نسبی بالاتر از ۶۸ درصد موجب می‌شود پسته به شکل مناسب خشک نشود. برای خشک کردن مناسب پسته در رطوبت‌های نسبی بین ۶۵ تا ۷۰ درصد، دمای خشک‌کن را باید به بیش از ۷۵ درجه سانتی‌گراد افزایش داد. در رطوبت نسبی حدود ۷۰ درصد
- فقط با افزایش دما به ۹۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان پسته را در حدود ۶ تا ۶/۵ درصد خشک کرد. در رطوبت نسبی بالاتر از ۷۵ درصد، افزایش دما به ۹۰ درجه سانتی‌گراد هم نمی‌تواند موجب خشک کردن مناسب پسته شود. از داده‌ها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در شرایطی که رطوبت نسبی هوا بین ۶۰ تا ۷۰ درصد است، برای خشک کردن پسته نمی‌توان از روش آفتابی یا دماهای پایین‌تر از ۷۵ درجه سانتی‌گراد در خشک‌کن استفاده کرد، زیرا محصول آن طور که ضرورت دارد خشک نمی‌شود و احتمال بروز فساد در آن زیاد است.
- ۷- با توجه به تنوع ارقام پسته در ایران، پیشنهاد می‌شود برآزش مدل‌های ذکر شده در این پژوهش در ارقام دیگر نیز بررسی و با نتایج تحقیق حاضر مقایسه شود.
- ۸- برای بهبود وضعیت انبارداری پسته و با توجه به تنوع آب و هوایی در ایران، پیشنهاد می‌شود برای دو رقم مذکور، منحنی‌های هم‌دمای جذب رطوبت در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد نیز تعیین شود.

مراجع

- 1- Adam, E., W. Mühlbaver, A. Esper, W. Wolf and W. Spieb. 2000. Effect of temperature on water sorption equilibrium of onion (*Allium cepa L*). *Drying Technology*. 18(9), 2117-2129.
- 2- Ayranci, E. and Dalgic, C. 1992. Moisture sorption isotherm of pistacia *Terebinthus L*. and it's protein isolate. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*. 25, 482-483.

- 3- Canovas, V. G. and Mercado, H. V. 1996. Dehydration of food. Chapman & Hall pub. New York. U.S.A.
- 4- Greenspan, L. 1977. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. J. Res. Nat'l. Bureau of Standards- Section A. Physics and Chemistry. 81 (1), 89-96.
- 5- Güzey, D., M. Özdemir, F. G. Seyhan, H. doğan and Y. O. Devres. 2001. Adsorption isotherm of raw and roasted hazelnuts. Drying Thechnology. 19(3&4), 691-699.
- 6- Iglesias, H. A. and J. Chirife. 1982. Handbook of food isotherms. Academic Perss. New York. U. S. A.
- 7- Jafarian, K. 1999. Determination of Pistachio (*Pistacia Veral*.) Sorption isotherms. M. Sc. Thesis, Soputh Edmpons. Azad University. Tehran. (In Farsi)
- 8- Kader, A. A., Heintz, C. M. Labavitch, J. M. Rae, H. L. 1982. Studies related to the description and evaluation of pistachio nut quality. J. of the American Society for Horticultural Science. 107(5), 812-816.
- 9- Karatas, S. and Battalbey, M. F. 1991. Determination of moisture diffusivity of pistachio nut meat during drying. Lebensmittel Wissenschaft und Technologie. 24, 484-487.
- 10- Labuza, T. P., Kaanane, A. and Chen, Y. 1985. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. J. of Food Science. 50, 385-391.
- 11- Lopez, A., Iguaz, A. Esnoz, A. and Virseda, P. 2000. Modeling of sorption isotherms of dried vegetable wastes from wholesale market. Drying Technology. 18 (4&5), 985-994.
- 12- Maskan, M. and Karatas, S. 1997. Sorption characteristics of whole pistachio nuts (*Pistacia vera L.*). Drying Technology. 15 (3&4), 1119-1139.
- 13- Perry, R. H. and Green, D. W. 1984. Perry's chemical engineer's handbook, 6th Ed. McGraw Hill Book Co. New York. U. S. A.
- 14- Rahman, S. 1995. Food properties handbook. CRC press. New york. USA.
- 15- San Martin, M. B., Mate, J. I. Fernandez, T. and Virseda, P. 2001. Modeling adsorption equilibrium moisture characteristics of rough rice. Drying Technology. 19 (3&4), 681-690.
- 16- Spiess, W. E. L. and Wolf, W. 1983. The results of the COST- 90 project on water activity. Physical Properties of Foods, Ed. by Jowitt, R. Applied Science Pub. London.
- 17- Yanniotis, S. and I. Zamboutis. 1996. Water sorption isotherm of pistachio nuts. Lebensmittel Wissenschaft und Technologie. 29, 372-375.

Determination of Pistachio (*pistacia vera el*) Moisture Desorption Isotherms Curves in Drying Temperatures

H. R. Gazor and A. R. Basiri

Pistachio is one of the most important horticultural products in Iran and its processing and packaging play major roles in exportation. Drying is a very important step in pistachio processing. In this step kernel moisture content decreases to 4-6 percent (d.b.), which is suitable for storage condition. The equilibrium moisture content (EMC) has important effects on drying time and kernel quality. In this research, pistachio moisture desorption isotherms were obtained at different drying temperatures (45, 60, 75, and 90°C) for two split Iranian pistachio varieties: Kolehghouchi and Fandoghi. For this purpose, static method and saturated salts were used based on COST-90 procedure. The results were evaluated by several models including: GAB, Smith, Henderson, Halsey and Oswin. The experimental results showed that for each variety, EMC values were reduced by increasing temperature. At different temperatures, GAB and Smith models gave better fitness for the data compared to the other models. Increasing temperature caused the reduction of mono layer moisture content in pistachio. Also, regression equations were obtained for estimation of mono layer moisture content at 45- 90°C for each variety.

Key words: Equilibrium Moisture Content, Isotherm Curves, Pistachio