

تعیین رطوبت بحرانی برای انبارمانی بهینه پودر پسته ایرانی (رقم امیری) بر مبنای منحنی‌های همدمای جذب و دفع و گرمای ایزواستریک

حمید توکلی پور^۱ و احمد کلباسی اشتری^{۲*}

^۱ استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار، مشهد

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۵/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۴/۲۲)

چکیده

منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت پودر پسته ایرانی (رقم امیری) در دماهای ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس با استفاده از روش وزن‌سنجی ایستا ترسیم و بیشترین پسماند در دامنه فعالیت آبی ۰/۲ - ۰/۷ مشاهده شد. از مدل‌های ریاضی بت (Bet)، گاب (Gab)، اسوین (Oswin)، اسمیت (Smith)، هندرسون (Henderson) و هالسی (Halsey) استفاده و داده‌های حاصل از آزمون‌ها مورد برآزش قرار گرفتند که از میان آنها مدل اسمیت بهترین برآزش را نشان داد. گرمای ایزواستریک جذب و دفع نیز با استفاده از رابطه ترمودینامیکی کلازیوس-کلاپیرون محاسبه و به صورت نموداری ترسیم گردید. همچنین با استفاده از معادله گاب و منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت، رطوبت تعادلی برای دماهای مذکور محاسبه و شرایط بهینه برای انبارداری این نوع پودر پسته پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: رطوبت بحرانی، انبارمانی، منحنی‌های همدمای جذب و دفع، پودر پسته

مقدمه

با توجه به تأثیر فعالیت آبی بر روی پایداری محصول و مشخصات فیزیکی آن مانند رنگ و بافت، تعیین منحنی‌های همدمای جذب^۱ برای مشخص کردن میزان رطوبت بهینه ماده غذایی خشک ضروری است. Tavakolipour & Kalbasi-Ashtari (2008) همدمای جذب و دفع را برای پسته کامل، مغز پسته و پودر پسته کرمان در دماهای ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس و فعالیت آبی در دامنه ۰/۱۱-۰/۸۸ ارائه نمودند. در سایر مناطق پسته‌خیز دنیا نیز تحقیقاتی در ارتباط با همین ویژگی‌ها و ارقام دیگر پسته صورت گرفته است. Maskan & Karatas (1997) منحنی‌های همدمای جذب را در دامنه دمایی ۱۰ تا ۳۰ °C برای پسته کامل بومی ترکیه تعیین کردند. Maskan & Gogus (1997) این منحنی‌ها را برای خمیر مغز پسته^۲ (به عنوان یک نوع غذای محلی ترکیه) با مدل‌ها مختلف برآزش کردند. Yanniotis & Zaramboutis (1996) منحنی‌های همدمای جذب پسته رقم (Aeginas) یونان را در دماهای ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس تعیین نمودند. Ayrancy & Dalgic (1992). همدمای جذب پسته خام رقم پیستاسیا تربینتوس (*Pistacia terebinthus* L.) و ایزوله پروتئینی آن را در دماهای ۱۵، ۲۵، ۳۵ درجه سلسیوس به دست آوردند. Karatas &

پسته گیاهی است از خانواده آناکاردیاسه (*Anacardiaceae*) که رقم اهلی آن پیستاسیاورا (*Pistacia vera*) نام دارد. این رقم ارزش اقتصادی داشته و مورد کشت و کار قرار می‌گیرد. امروزه درخت پسته در نواحی گرم و خشک مناطق مختلف جهان به ویژه خاورمیانه، کشورهای حاشیه دریای مدیترانه و آمریکا کشت می‌شود. پسته از محصولات مهم کشاورزی ایران به شمار می‌رود و در میان صادرات غیرنفتی کشور، بعد از فرش مقام دوم را احراز می‌کند. تولید سالانه پسته در ایران به‌طور متوسط طی سالیان اخیر ۲۳۲ هزار تن است که تقریباً ۵۲ درصد کل تولید جهانی را شامل می‌شود (Tavakolipour & Kalbasi-Ashtari, 2008). نظر به اینکه پس از برداشت محصول فرایندهای مختلفی باید صورت گیرد تا پودر پسته تولید و تا زمان مصرف در انبار نگهداری شود، فرایندهای جذب و دفع رطوبت محصول خام و پودر شده از اهمیت خاصی برخوردار هستند. روابط تعادلی بین سه فاز جامد (پسته)، آب و هوا تعیین‌کننده شرایط بهینه برای فرایندهای فیزیکی پس از برداشت و انبارداری است. فعالیت آبی محصول بر روی رشد میکروبی، قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیرآنزیمی و اکسایش لیپیدها تأثیر می‌گذارند. بنابراین

1. Sorption Isotherm Curves
2. Pistachio Nut Paste

* نویسنده مسئول: h.tavakolipour@gmail.com

۴- آب مقطر دو بار تقطیر شده جهت آماده‌سازی محلول‌های اشباع نمک در آزمایشگاه تهیه شد.

ب) روش‌ها

از روش وزن‌سنجی ایستا براساس روش (Wolf & Spiess, 1983) برای تعیین منحنی‌های همدمای جذب در دماهای ۱۲، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس استفاده گردید. پسته‌ها پس از جداسازی از پوست سخت آسیاب شده و پودر حاصل از یک الک با قطر منافذ ۲ میلی‌متر عبور داده شد. برای ایجاد فعالیت آبی ثابت در دامنه ۰/۸۸-۰/۱۱ محلول‌های اشباع نمک ذکر شده مورد استفاده قرار گرفتند. در این آزمایش‌ها از محفظه‌های نیم لیتری و یک لیتری پلاستیکی با درب مخصوص که باگیره و واشر کاملاً مسدود شده و دارای قابلیت هدایت حرارتی مناسب بود استفاده گردید. ۱۵۰ میلی‌لیتر از محلول‌های نمک اشباع در هر محفظه قرار داده شد و برای جایگذاری نمونه از توری‌های استیل که در بالای هر محفظه نصب شده بود، استفاده گردید. چون آزمایش‌ها در دو تکرار صورت گرفت از ۴ محفظه برای هر نمک (دو محفظه برای جذب و دو محفظه برای دفع) استفاده گردید. سپس ۲ گرم نمونه از پودر پسته آماده شده برای آزمونه‌های جذب و دفع بر روی شیشه‌های ساعت مستقر درجعبه‌ها ریخته شده و درب آن‌ها کاملاً بسته شد. برای رسیدن به حالت تعادل تمامی جعبه‌های یک لیتری در درون چهار انکوباتور که قبلاً دمای هر کدام به ترتیب در ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس تنظیم شده بود قرار گرفتند. پس از سپری شدن ۱۴ روز از شروع آزمایش، اولین توزین نمونه‌ها انجام گرفت و توزین‌های بعدی در فواصل زمانی سه روزه انجام شد. چنانچه اختلاف دو توزین متوالی به کمتر از ۰/۰۰۱ گرم می‌گردید، آن نمونه به تعادل رسیده بود. لازم به ذکر است که نمونه‌های پودر پسته در مدت زمان ۲۰-۱۸ روز به تعادل رسیدند. پس از آنکه میزان رطوبت هر نمونه پودر پسته با توجه به شرایط محیط به تعادل می‌رسید، میزان رطوبت نهایی آن طبق روش (Yanniotis & Zamboutis, 1996) و با استفاده از آن خلأ در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و فشار ۱۸۰ میلی‌بار به مدت ۶ ساعت تعیین گردید. توزین نمونه‌ها با دقت یاد شده انجام و رطوبت تعادلی آن برحسب مبنای خشک تعیین گردید. کلیه آزمایش‌های تعیین رطوبت در ۴ تکرار انجام گرفت. برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت مرحله جذب، نمونه‌های پودر پسته در قسمت فوقانی محفظه‌های یک لیتری و بر روی توری‌های استیل که در فضای بالای آن تعبیه گردیده بود قرار گرفتند. جعبه‌های شیشه‌ای که تا نیمه از سیلیکاژل پر شده در دمای اتاق قرار داده شده و در فواصل زمانی معین شیشه‌های ساعت

Battalbey (1991) همدمای جذب و دفع را برای پسته خندان رقم گازیانتپ (Gaziantep) ترکیه با پسته نرم و بدون پوسته نرم در دمای ۲۰ درجه سلسیوس تعیین کردند. Denizel & Rolfe (1976) همدمای جذب و دفع را برای مغز پسته، پوسته سخت و پوسته نرم با روش‌های وزن‌سنجی و فشارسنجی تعیین نمودند. چون ویژگی‌های فیزیکی و ترکیبات شیمیایی ارقام پسته مناطق مختلف و پودر آنها تاثیر قابل توجهی بر روی منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت می‌گذارد، انجام این تحقیقات برای ارقام گوناگون پسته ایران ضروری می‌باشد. در جدول ۱ ترکیبات پسته ایران و مقادیر میانگین آن ارائه شده است (Kamanggar & Farsam, 1997). هدف از انجام این پژوهش تعیین منحنی‌های همدمای جذب و دفع پودر پسته ایرانی در دامنه دمایی ۱۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس با استفاده از روش وزن‌سنجی ایستا^۱ و ارائه مدل ریاضی مناسب همراه با گرمای ایزوستریک جذب و دفع رطوبت پودر پسته و بالاخره تخمین شرایط بهینه انبارمانی پودر پسته با به کار گیری مدل گاب بود.

جدول ۱- درصد ترکیبات شیمیایی پسته ایران بر اساس نظر کمانگر و فرزام (۱۹۷۷)

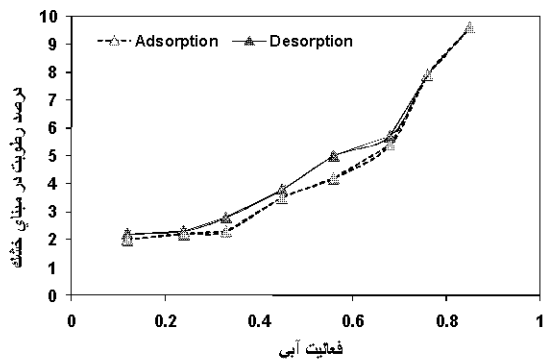
ترکیب	(میانگین) دامنه تغییرات
پروتئین	۱۵-۲۱/۲ (۱۸/۱)
چربی	۵۵/۲-۶۰/۵ (۵۷/۸۵)
کربوهیدرات	۱۴/۹-۱۷/۷ (۱۶/۳)
رطوبت	۲/۵-۴/۱ (۳/۳)
فیبر	۱/۷-۲ (۱/۹)
خاکستر	۲/۲-۲/۵ (۲/۳۵)

مواد و روش‌ها

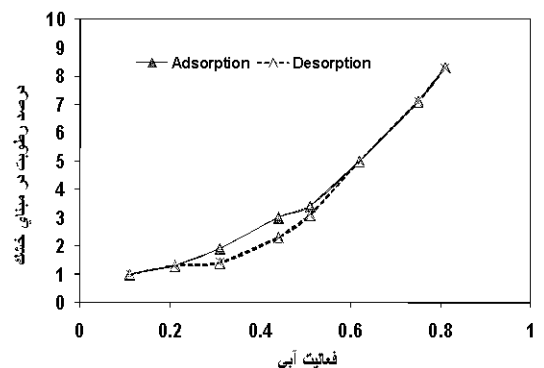
الف) مواد

- ۱- پسته رقم امیری (از ارقای مهم پسته کرمان) که از یک تولید کننده خریداری گردید.
- ۲- نمک‌های $LiCl$ ، $MgCl_2$ ، CH_3COOK ، $Mg(NO_3)_2$ ، KCl ، $NaCl$ ، $NaNO_3$ که همگی با درجه خلوص بالا جهت تأمین رطوبت‌های نسبی مورد نظر و از شرکت مرک تهیه شدند.
- ۳- تولون جهت جلوگیری از رشد کپک‌ها در فعالیت‌های آبی بالاتر از ۰/۵ از بازار داخلی تهیه گردید.

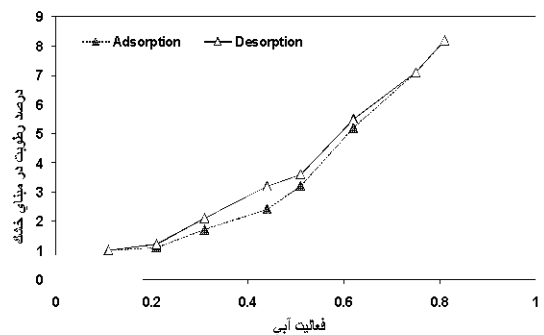
فعالیت آبی ۰/۷ گزارش شده است (Tavakolipour, 2009; Rahman, 1995; Vega-Mercado & Barbovasa-Canovas, 1996).



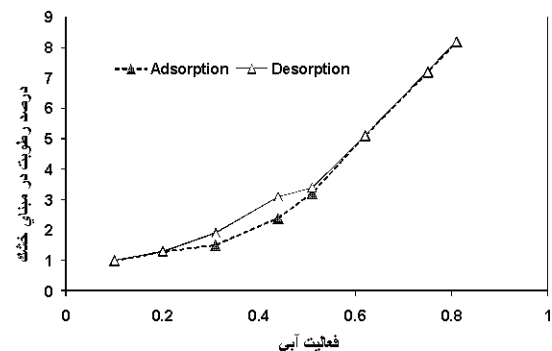
شکل ۱- منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت پودر پسته در دمای ۱۵ درجه سلسیوس



شکل ۲- منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت پودر پسته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس



شکل ۳- منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت پودر پسته در دمای ۳۵ درجه سلسیوس



شکل ۴- منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت پودر پسته در دمای ۴۰ درجه سلسیوس

حاوی پودر پسته از آنها خارج و توزین شدند. بعد از ۵ روز وزن نمونه‌ها ثابت شد و برای اطمینان کامل از حصول رطوبت تعادلی آنها، به مدت ۷ ساعت در یک آون در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و فشار ۱۸۰ میلی بار قرار داده شدند. برای آماده‌سازی نمونه جهت مرحله دفع، نمونه‌های پودر پسته در قسمت فوقانی جعبه‌های یک لیتری بر روی توری‌های استیل قرار گرفتند. آنگاه درب جعبه‌ها که تا نیمه حاوی آب مقطر بود نیز کاملاً مسدود و در دمای اتاق قرار داده شدند. در فواصل زمانی معین، شیشه‌های ساعت از آنها خارج و توزین گردیدند. نمونه‌ها پس از ۱۷ روز به وزن ثابت رسیدند. برای جلوگیری از فساد میکروبی، در فعالیت‌های آبی بالاتر از ۰/۵، از مقدار کمی تولوئن که در لوله‌های موئین قرار داده شده و انتهای آنها توسط خمیر هماتوکریت مسدود گردیده بود، استفاده شد و این لوله‌ها درون جعبه‌ها یا محفظه‌ها نصب گردیدند.

نتایج و بحث

بررسی اثرات دما بر روی منحنی‌های جذب و دفع پودر پسته

منحنی‌های همدمای جذب و دفع پودر پسته در دماهای مختلف در شکل‌های ۱ تا ۴ ارائه شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود این منحنی‌ها تابعی از دما بودند به طوری که با افزایش دما میزان رطوبت تعادلی پودر پسته برای هر دو حالت جذب و دفع کاهش یافت. این رفتار با قوانین ترمودینامیک مطابقت داشته و نشان دهنده اثرات معکوس افزایش دما با مقدار جذب رطوبت در محصول می‌باشد. البته برخی از قندها و ترکیبات غذایی با وزن مولکولی پایین مورد استثنا بوده و با افزایش دما رطوبت بیشتری را جذب می‌نمایند (Ayrancy and Dalgic, 1992). بررسی این منحنی‌ها نشان داد که در دامنه فعالیت آبی ۰/۷-۰/۲ که متناظر با ناحیه میعان موئین^۱ است، بیشترین پسماند^۲ هنگامی مشاهده می‌شود که دمای فرایند جذب و دفع در کمینه یعنی ۱۵ درجه سلسیوس باشد و با افزایش دما این پدیده کاهش یافته و در فعالیت آبی کمتر از ۰/۲ و بیشتر از ۰/۷ به کمترین مقدار تقلیل یافت. لازم به ذکر است که در مواد غذایی غنی از پکتین و قند پدیده پسماند در رطوبت‌های پایین‌تر اتفاق می‌افتد و در مواد غذایی غنی از پروتئین این پدیده در فعالیت‌های آبی بالاتر شروع شده و تا فعالیت آبی صفر بر روی منحنی همدمای امتداد می‌یابد و در مواد غذایی نشاسته‌ای، حلقه بزرگ پسماند با حداکثر کمیت، در

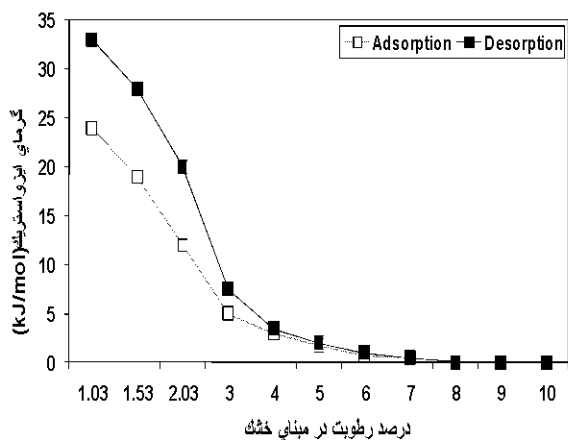
1. Capillary Condensation Region
2. Hysteresis

برازش داده‌ها

پسته را محاسبه نمود. تعیین نمودار گرمای ایزوستریک جذب و دفع برحسب درصد رطوبت بر مبنای خشک در شکل ۵ آمده است. همان طور که دیده می شود، زمانی که رطوبت مواد غذایی افزایش می‌یابد، گرمای ایزوستریک کاهش پیدا می‌کند. در رطوبت‌های پایین (رطوبت تک لایه) میزان گرمای خالص ایزوستریک زیاد است که نشان دهنده پیوند قوی مولکول‌های آب و ماده غذایی است و با افزایش میزان رطوبت، گرمای ایزوستریک کاهش می‌یابد که نشان دهنده پیوند ضعیف رطوبت به ماده غذایی و نزدیک شدن خصوصیات آب موجود در ماده غذایی به ویژگی‌های آب آزاد است. همچنین از نمودار فوق نتیجه می‌شود که گرمای ایزوستریک در حالت دفع رطوبت در بیشتر مواقع بالاتر از حالت جذب رطوبت بوده که علت آن ممکن است به دلیل تغییرات ساختمان محصول در طول خشک شدن باشد که انتقال آب را آسانتر می‌کند.

جدول ۴- ضرایب مدل اسمیت (A, B) و درصد انحراف نسبی متوسط (P%) برای پودر پسته

دما (°C)	A	B	P(%)
جذب			
۱۵	۰,۰۰۸۳	۰,۰۴۴۷	۹,۴۴
۲۵	۰,۰۰۲۳	۰,۰۴۴۸	۱۲,۱۰
۳۵	۰,۰۰۱	۰,۰۴۴۸	۱۴,۷۲
۴۰	۰,۰۰۱۲	۰,۰۵۱۰	۱۵,۹۱
دفع			
۱۵	۰,۰۱۳۵	۰,۰۴۳	۶,۰۵
۲۵	۰,۰۰۶۳	۰,۰۴۳۲	۶,۴۸
۳۵	۰,۰۰۳۲	۰,۰۴۸۱	۷,۰۷
۴۰	۰,۰۱۸۶	۰,۰۴۸۱	۶,۵۱



شکل ۵- گرمای ایزوستریک جذب و دفع رطوبت پودر پسته

تخمین شرایط بهینه انبارمانی

تخمین شرایط بهینه انبارمانی پودر پسته برای نگهداری دراز مدت و جلوگیری از آلودگی محصول به آلاینده‌های مختلف و بویژه سم آفلاتوکسین ضروری است. همان طور که مشاهده

جهت ارائه مدل مناسب برای بیان رفتار تعادلی پودر پسته و برازش داده‌های تجربی رطوبت تعادلی، مدل‌های ریاضی موجود مانند بت (BET)، گاب (GAB)، اسمیت (Smith)، ازوین (Oswin)، هالسی (Halsey) و هندرسون (Henderson) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصله نشان داد که مدل اسمیت برازش بهتری را نسبت به مدل‌های دیگر برای بیان رفتار رطوبت تعادلی این رقم پودر پسته ایران ارائه می‌دهد. برای تعیین مناسب بودن برازش از مدول درصد انحراف نسبی متوسط (P) که توسط رابطه زیر تعریف شده است استفاده گردید:

$$P = \left(\frac{100}{N} \right) \sum_{i=1}^N \left(\frac{|X_{e,i} - X_{p,i}|}{X_{e,i}} \right) \quad (1)$$

که در آن $X_{e,i}$ مقدار رطوبت تعادلی اندازه‌گیری شده توسط آزمایش و $X_{p,i}$ رطوبت تعادلی پیش‌بینی شده توسط مدل و N تعداد مشاهدات می‌باشد. مدل ارائه شده اسمیت جهت بیان داده‌های آزمایشگاهی به صورت زیر می‌باشد.

$$X_e = A - B \ln(1 - a_w) \quad (2)$$

که در آن A و B ضرایب مدل اسمیت می‌باشند. این ضرایب به همراه مدول (P) برای حالت‌های جذب و دفع در جدول ۲ ارائه شده‌اند. بنابر نتایج تحقیقات Lumar et al. وقتی $P < 5$ باشد، برازش عالی و زمانی که $P > 10$ باشد، برازش ضعیف است.

تعیین گرمای ایزوستریک جذب

گرمای ایزوستریک جذب^۲ به صورت میزان انرژی لازم برای جداسازی آب از ماده غذایی، مازاد بر مقدار انرژی لازم برای تبخیر آب آزاد (گرمای نهان تبخیر آب) تعریف می‌شود. این پارامتر ابزار ارزشمندی برای درک مکانیسم جذب بوده و در حل معادلات موازنه جرم و انرژی برای طراحی خشک‌کن‌ها کاربرد دارد. رابطه ترمودینامیکی کلایوس-کلایپرون^۳ ارتباط بین فعالیت آبی، گرمای ایزوستریک جذب و دما را بیان می‌کند.

$$\frac{d(\ln a_w)}{d(1/T)} = \frac{-Q_s}{R} \quad (3)$$

که در آن Q_s گرمای ایزوستریک جذب و یا دفع رطوبت و R ثابت گازها می‌باشد. با رسم $\ln a_w$ برحسب $1/T$ برای مقادیر مختلف رطوبت تعادلی که از مدل اسمیت حاصل می‌شود و از شیب این خطوط می‌توان گرمای ایزوستریک جذب یا دفع پودر

1. Mean Relative Percentage Deviation Modulus n
2. Isosteric Heat of Sorption
3. Clausius-Clapeyron

تعیین می‌گردد. معادله درجه سوم (۹) دارای سه ریشه است که دو ریشه آن به صورت مختلط $(a \pm bi)$ و ریشه سوم آن حقیقی و در بازه بسته $[0,1]$ قرار دارد که جواب قابل قبول و نمایانگر فعالیت آبی بحرانی (a_{wc}) است. با استفاده از معادله (۶) مقدار رطوبت بحرانی متناظر (X_c) نیز تعیین می‌شود. داده‌های a_{wc} و X_c در جدول ۴ ارائه شده‌اند که در واقع تخمین شرایط بهینه انبارداری پودر پسته می‌باشند. همان طور که از جدول ۴ مشاهده می‌شود مقادیر رطوبت تعادلی به مقدار رطوبت تک لایه نزدیک هستند. داده‌های همدمای جذب اطلاعات مفیدی را در انتخاب مواد بسته‌بندی مناسب جهت ممانعت از نفوذ بخار آب از طریق لایه بسته‌بندی به پودر پسته را در دسترس قرار داده و راهنمای مناسبی برای افزایش زمان ماندگاری پودر پسته می‌باشد.

جدول ۵-

دمای (C°)				ضرایب
۴۰	۳۵	۲۵	۱۵	
-۶۳,۰۸۷	-۵۶,۴۱	-۶۳,۰۷۹	-۴۰,۰۷۳	α
۴۹,۹۰۴	۴۵,۷۰۹	۴۹,۸۹۷	۴۲,۵۴۳	β
۸,۵۷۲	۸,۷۸۹	۸,۵۷۴	۲,۳۵۷	γ
۲,۳۱۰	۱,۹۸۰	۲,۳۱۰	۰,۹۷۶	SD*
مقدار بحرانی				مقدار بحرانی
دمای (C°)				
۴۰	۳۵	۲۵	۱۵	a_{wc}
۰,۲۳	۰,۲۴	۰,۲۴	۰,۲۶	X_c
۱,۴	۲,۵	۱,۴	۲,۵	

نتیجه‌گیری کلی

در طراحی خشک‌کن‌های پسته و تعیین شرایط انبارمانی آن، منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت و گرمای ایزوستریک جذب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در این روش با استفاده از روش وزن‌سنجی ایستا منحنی‌های مذکور برای پودر پسته در دماهای ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس تعیین شدند و مدل ریاضی که بیان‌کننده رفتار رطوبت تعادلی پودر پسته است، ارائه گردید. نتایج حاکی از آن است که با افزایش دما، میزان رطوبت تعادلی پودر پسته کاهش یافته و پسماند در دامنه فعالیت آبی ۰,۲ تا ۰,۷ بیشترین مقدار است که با افزایش دما کاهش می‌یابد و در دامنه فعالیت آبی کمتر از ۰,۲ و بیشتر از ۰,۷ تقلیل می‌یابد. همچنین با استفاده از داده‌های همدمای جذب، گرمای ایزوستریک جذب و دفع نیز تعیین و مشخص شد که با افزایش رطوبت، میزان این گرما کاهش می‌یابد. همچنین مقدار گرمای ایزوستریک دفع در اغلب محدوده‌های رطوبت بیشتر از همین گرما در مرحله جذب رطوبت است.

گردید منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت پودر پسته سیگموئیدی (S شکل) بوده و دارای نقطه عطف هستند. جهت ورود به بحث ابتدا باید مفهوم نقطه بحرانی در یک منحنی همدمای جذب تعریف شود. در نقطه یا نقاط بحرانی، با تغییر شرایط محیطی انبار (مانند دما و رطوبت نسبی) رطوبت تعادلی محصول به حداقل انحراف رسیده و بنابراین سرعت تغییرات کمینه می‌باشد. در واقع این نقاط از منحنی‌های همدمای رطوبت تعادلی در محصول را پایدار نموده و شرایط بهینه را برای انبارداری نیز مشخص می‌کنند (Taub& Singh,1999). در این پژوهش برای تعیین نقاط بحرانی از مدل گاب به شرح زیر استفاده شد:

$$X_e = \frac{CKX_m a_w}{(1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w)} \quad (4)$$

که در آن X_e مقدار رطوبت تعادلی، X_m رطوبت تک‌لایه و C و K ثابت‌های مدل گاب هستند. با تقسیم صورت و مخرج رابطه فوق بر CKX_m معادله زیر حاصل می‌شود:

$$X_e = \frac{a_w}{[1 / (CKX_m) + (CK - 2K)a_w / (CKX_m) + (K^2 - CK) / (CKX_m)]} \quad (5)$$

با استفاده از پارامترها معادله فوق به صورت زیر درمی‌آید:

$$X_e = f(a_w) = \frac{a_w}{\alpha a_w^2 + \beta a_w + \gamma} \quad (6)$$

که $\alpha = \frac{K(1-C)}{CX_m}$, $\beta = \frac{C-2}{CX_m}$, $\gamma = \frac{1}{CKX_m}$ چون در نقطه بحرانی سرعت تغییرات حداقل است از معادله تابعی (۶) نسبت به a_w مشتق‌گیری می‌شود:

$$f'(a_w) = \frac{\gamma - \alpha a_w^2}{(\alpha a_w^2 + \beta a_w + \gamma)^2} \quad (7)$$

برای حداقل کردن تابع $f'(a_w)$ ، باید مشتق دوم آن $f''(a_w)$ را مساوی صفر قرار داده و ریشه‌های آن را تعیین نمود:

$$f''(a_w) = \frac{2(\alpha^2 a_w^3 - 3\alpha\beta a_w - \beta\gamma)}{(\alpha a_w^2 + \beta a_w + \gamma)^3} \quad (8)$$

که با ساده‌سازی خواهیم داشت:

$$f''(a_w) = 0 \rightarrow \alpha^2 a_w^3 - 3\alpha\beta a_w - \beta\gamma = 0 \quad (9)$$

برای حل معادله فوق ابتدا بایستی پارامترهای α و β و γ تعیین شوند. بنابراین معادله (۶) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{a_w}{X_e} = \alpha a_w^2 + \beta a_w + \gamma \quad (10)$$

با تجزیه و تحلیل رگرسیونی معادله ۱۰ و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ثابت‌های α و β و γ در دامنه دمایی ۱۵ تا ۴۰ تعیین شدند، که نتایج این محاسبات در جدول ۳ ارائه گردیده است. ضرایب مذکور در معادله ۹ قرار داده شد و ریشه‌های معادله درجه سوم (۹) توسط نرم‌افزار MATLAB

REFERENCES

- Ayrancy, E. & Dalgic, C. (1992). Moisture sorption isotherms of Pistacia terebinthus L. and its protein isolate. *Lebensm.-Wiss.u. Technol.*, 25, 482-483.
- Denizel, T. & Rolfe, E.J. (1976) Moisture equilibrium relative humidity relationship in pistachio nut with particular regard to control of aflatoxin formation. *J. Sci. Food Agric.*, 27, 1027-1034.
- Kamanggar, T. & Farsam, H. (1977). Composition of pistachio kernels of various Iranian origins. *J. Food Sci.*, 42(4), 1135-1136.
- Karatas, M. & Battalbey, M.F. (1991). Determination of moisture diffusivity of pistachio nut meat during drying. *Lebensm.-wiss.u. Technol.*, 24, 484-487.
- Maskan, M. & Karatas, S. (1997) Sorption characteristics of whole pistachio nuts. *Drying Technology*, 15 (3/4), 1119-1130.
- Maskan, M. & Gogus, F. (1997) The fitting of various models to water sorption isotherm of pistachio nut paste. *J. Food Eng.*, 33, 227-237.
- Rahman, S. (1995). *Food Properties Handbook*, Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 23-46.
- Spiess, W.E. & Wolf, W.R. (1983). *The result of COST90 project on water activity*. In R. Jowitt (Ed.), *Physical Properties of Foods*. Applied Science Publishers, New York, pp. 65-91.
- Chinachoti, P. (1997). *Water migration and food storage stability*. In J.A.Taub & R. P. Singh (Eds.), *Food Storage Stability*., Boca Raton, FL: CRC Press.
- Tavakolipour, H. (2007). *Principles of drying of food materials and agricultural products*, 2nd edition. Aeezh Publishing Company, Tehran, pp. 27-51.
- Tavakolipour, H. & A. Kalbasi Ashtari, A. (2008). Estimation of moisture sorption isotherms in kerman pistachio nuts. *Journal of Food Process Engineering*, 31, 564-582.
- Vega-Mercado, H. & Barbosa-Canovas, V. (1996). *Dehydration of Foods*., New York: Chapman & Hall .
- Yanniotis, S & Zamboutis, I. (1996) Water sorption isotherms of pistachio nuts. *Lebensm.-wiss.u. Technol.*, 29, 327-357.