

تعیین منحنی‌های جذب و دفع هم دمایی رطوبت و انرژی پیوندی پسته در گستره دمایی ۱۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد

حسن پهلوانزاده*

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، بخش مهندسی شیمی، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵

کسری جعفریان

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد جنوب تهران، گروه مهندسی شیمی

چکیده: پسته یکی از فرآورده‌های مهم و استراتژیک در بین فرآورده‌های صادراتی کشورمان به شمار می‌آید. طراحی خشک‌کن مناسب برای خشک کردن پسته به صورت مطلوب و تعیین شرایط بهینه انبارمانی در گرو داشتن منحنی‌های رطوبت تعادلی دقیق آن است. در این پژوهش دستیابی به منحنی‌های جذبی و دفعی پسته و مدل ریاضی آن که در مدل سازی و حل معادله‌های انتقال جرم و انرژی در طراحی سیستم‌های خشک‌کن مورد نیاز است، امکان پذیر شده است. با بهره‌گیری از روش استاندارد آزمایشگاهی COST 90 منحنی‌های مذکور در چهار دمای ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای پودر پسته و دمای ۱۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد برای مغز پسته و پسته کامل تعیین شدند. از اطلاعات آزمایشگاهی به دست آمده، مدل ریاضی جذب و دفع رطوبت پسته ارایه شد و با استفاده از آنها حرارت پیوندی آب و پسته در حالت‌های جذب و دفع به دست آمد

واژه‌های کلیدی: جذب، دفع، خشک کردن، هیستریزس، گرمای پیوندی، هم‌دما، پسته، محلول اشباع نمک

KEY WORDS: Adsorption, Desorption, Drying, Hysteresis, Isothermic heat, Isotherm, pistachio, Saturation solution of salt

مقدمه

بایستی به صورت عملی به دست آیند. متداول‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری رطوبت تعادلی، روش‌های وزن سنجی، هیگرومتری، مانومتري است. در روش وزن سنجی برای فراهم آوردن رطوبت نسبی ثابت، از محلول اشباع نمک‌های متفاوت که در دمای معین، رطوبت نسبی ثابت را برقرار می‌کند، استفاده می‌شود [۶]. روش مذکور تحت عنوان یک پروژه استاندارد شده است [۴].^(۱)

پسته یک فرآورده تجاری با ارزش است که بیشترین درصد

در تحلیل فرایندهای بیوشیمیایی، فیزیکی و میکروبی مواد غذایی، داده‌های مربوط به منحنی‌های ایزوترم جذب آب نقش مهمی دارد. این منحنی‌ها حاوی اطلاعاتی در مورد چگونگی جذب و برهمکنش آب با بافت ماده غذایی است. همچنین در طراحی و بهینه‌سازی عملیاتی مانند آماده سازی، خشک کردن، انبارمانی، بسته‌بندی و مخلوط کردن اهمیت زیادی دارند. با توجه به اینکه ویژگی‌های مواد غذایی با یکدیگر متفاوت است، لذا منحنی‌های ایزوترم برای هر ماده غذایی جهت عملیات ذکر شده

* E-mail : PAHLAVANZH@MODARES.AC.IR

(۱) Cooperation scientific Technological (1990) COST 90

* عهده‌دار مکاتبات

آون خلاء برای خنک شدن قبل از مرحله توزین، آون خلاء با قابلیت ایجاد خلاء ۹۰۰ میلی‌بار، آنکوباتور با حجم ۲۰۰ لیتر و دقت ۰/۳ درجه سانتی‌گراد و ظرف‌های نیم لیتری پلاستیکی با درب ویژه که با گیره و واشر کاملاً محکم شده و دارای قابلیت رسانایی حرارتی بالایی هستند.

آماده سازی مرحله جذب

برای آماده‌سازی، ابتدا پسته‌های خریداری شده (واریته امیری) را پوست‌گیری کرده و سپس مغز پسته را با آسیاب به صورت پودر در آورده و برای اینکه پودر یکنواختی داشته باشیم از یک الک با قطر ۲ میلی‌متر عبور داده شد و به این ترتیب ۱۶۰ گرم پودر پسته تهیه شد. سپس چهار ظرف یک لیتری پلاستیکی با درب ویژه که با گیره و واشر محکم شده و قابلیت رسانایی حرارتی بالایی داشتند، تهیه شد. حدود ۸۰ گرم پسته پودر شده در ۴ شیشه ساعت که به وزن ثابت رسیده بودند، قرار گرفت. ظرف‌ها تا نصف حجمشان از سیلیکاژل پر شد و شیشه ساعت‌های حاوی پودر پسته به دقت وزن شدند. وزن سنجی دوم، چهار روز بعد انجام شد و نتیجه‌ها مشخص کرد که وزن نمونه‌های آماده سازی شده در مرحله جذب ثابت شدند. یک روز بعد دوباره وزن سنجی صورت گرفت تا از ثابت شدن وزن نمونه‌ها اطمینان حاصل شود. سپس نمونه‌ها را در آون خلاء قرار داده تا رطوبت باقی مانده در نمونه‌های پسته به حداقل کاهش یابد. طبق گزارش منابع دمایی آون خلاء در ۴۰ درجه سانتی‌گراد و فشار منفی ۹۰۰ میلی‌بار تنظیم شد. نتیجه‌ها نشان داد که وزن نمونه‌ها تغییری نداشت. مراحل بالا به غیر از آسیاب کردن نمونه‌ها برای مغز پسته و پسته کامل انجام شد.

آماده سازی مرحله دفع

برای آماده سازی نمونه‌های دفعی، چهار ظرف یک لیتری با مشخصات ذکر شده تهیه شد و داخل آنها تا نصف حجمشان از آب مقطر پر شد. سپس ۸۰ گرم از نمونه‌های پودر پسته الک شده، روی ۴ شیشه ساعت که به وزن ثابت رسیده بودند، قرار گرفتند و روی توری‌های استیل که به صورت معلق در داخل این ظرف‌ها

صادرات را بعد از نفت و فرش در ایران دارد. پایین بودن کیفیت فرآورده تولیدی و شرایط سنتی و نامطلوب فرایند خشک کردن و انبار داری آن، منجر به کاهش در روند صادرات این فرآورده گرانها در سال‌های اخیر شده است. آمارهای موجود نشان می‌دهد که صادرات پسته ایران از یکصد و چهل هزار تن در سال ۱۳۷۵ به هفتاد و پنج هزار تن در سال ۱۳۷۸ کاهش یافته و این بدان معنی است که در محدوده زمانی یاد شده کاهش معادل ۴۶ درصد داشته است [۲].

منحنی‌های ایزوترم برای پسته توسط Maskan, Gogus [۶] و Yanniotis, Zaramboutis [۷] و Aryanci, Dalgic [۵] گزارش شده است. با توجه به اینکه واریته پسته‌های گزارش شده متفاوت با پسته ایران است، به دست آوردن چنین منحنی‌هایی برای پسته ایران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق با استفاده از روش استاتیک (ساکن)، منحنی‌های ایزوترم تعادلی پسته کامل (با پوسته سخت بیرونی)، مغز پسته و پودر پسته در گستره دمایی ۱۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد در آزمایشگاه سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران تعیین شده و ضمن ارایه مدل ریاضی آنها، انرژی پیوندی آب و پسته نیز به دست آمده است.

شرح آزمایش‌ها

مواد مورد نیاز

برای انجام آزمایش‌ها از واریته پسته امیری استفاده شد. مواد مورد نیاز در طول انجام این تحقیق شامل نمک‌های لیتیم کلرید (LiCl)، پتاسیم استات (CH_3COOK)، منیزیم کلرید (MgCl_2)، پتاسیم کربنات (K_2CO_3)، منیزیم نیترات ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)، سدیم نیتريت (NaNO_2)، سدیم کلرید (NaCl) و پتاسیم کلرید (KCl) برای ایجاد رطوبت نسبی معین و ثابت، تولون برای جلوگیری از رشد کپک‌ها در رطوبت‌های نسبی بالای ۵۰ درصد سیلیکاژل برای رطوبت‌گیری نمونه‌ها، خمیر هماتوکریت برای نگه‌داشتن تولون در داخل لوله‌های موئین، وسایل آزمایشگاهی مورد نیاز افزون بر وسایل معمول آزمایشگاهی، آسیاب برای پودر کردن پسته، تورهای فلزی استیل برای معلق نگه‌داشتن نمونه‌ها در ظرف‌های محتوی محلول اشباع نمک‌ها، دسیکاتور حاوی سیلیکاژل برای ثابت نگه‌داشتن رطوبت نمونه‌های خشک شده در

ظرف حدود ۱۵۰ میلی لیتر محلول اشباع نمک برای ایجاد رطوبت نسبی ثابت، استفاده شد.

مراحل آماده سازی برای رسیدن به تعادل

پس از آماده شدن ظرف های حاوی محلول اشباع نمک ها، آنها در یک انکوباتور با جریان هوا در دمای مورد نظر قرار گرفته تا به تعادل رسیدند. دمای هوای داخل یک ظرف به عنوان شاهد به وسیله دماسنج کوچک اندازه گیری شد. پس از رسیدن دمای محلول داخل ظرف ها به دمای مورد نظر، نمونه های پسته آماده شده برای مراحل جذب و دفع با وزن های مشخص روی شیشه ساعت هایی که برای این کار تهیه شده بودند، قرار داده شد و همه آنها روی سبدهای توری استیل در داخل ظرف های محتوی محلول اشباع نمک ها، که به صورت معلق قرار گرفته بودند، قرار داده شدند. دستگاه انکوباتور با وجود حجم ۲۰۰ لیتری، دقتی برابر ۰/۳- درجه سانتی گراد داشت. هوای داخل دستگاه به وسیله دماسنج در طول ۲۴ ساعت کنترل شد. پس از گذشت ۲ هفته نخستین وزن سنجی انجام شد و پس از آن، هر سه روز یک بار وزن سنجی انجام شد. در صورتی که تفاوت وزن در دو سنجش متوالی کمتر از ۰/۰۱ گرم باشد، آزمایش خاتمه یافته تلقی شده و رطوبت نمونه ها به وسیله آن خلاء ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶ ساعت در فشار منفی ۹۰۰ میلی بار اندازه گیری شد [۶].

لازم به ذکر است که نمونه های پودر پسته و مغز پسته و پسته کامل به ترتیب حدود ۱۸، ۲۵، و ۳۰ روز به تعادل رسیدند. در این میان نمونه های قرار گرفته در فعالیت آبی پایین تر و دمای بالاتر کمی زودتر به تعادل رسیدند. همه نمونه های به تعادل رسیده را در بشرهای ۲۰ میلی لیتر ریخته و برای تعیین رطوبت نهایی، در آن تحت خلا قرار داده شدند. سپس نمونه های خشک شده با یک ترازوی عددی (دیجیتال) با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شدند. پس از اینکه وزن خشک نمونه ها مشخص شد، با استفاده از رابطه (۱) رطوبت نهایی پسته (رطوبت تعادلی) تعیین شد.

$$X_c = (M_w - M_d) / M_d \quad (1)$$

نتیجه های آزمایش ها در شکل های ۱ تا ۱۷ و جدول های ۲ تا ۷ نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که برای انجام آزمایش ها از ۴ تکرار کمک گرفته شد و میانگین آنها در جدول های ۲ تا ۵ آورده شده است.

جدول ۱ - فعالیت آبی برای نمک های متفاوت از دو مرجع متفاوت

نمک	(الف) (Greenspan)	(ب) (Saravacos)
LiCl	۰/۱۱۳	۰/۱۱۰
CH ₃ COOK	۰/۲۲	۰/۲۳۱
MgCl ₂	۰/۳۲	۰/۳۲۵
K ₂ CO ₃	۰/۴۳۱	۰/۴۳۷
Mg(NO ₃) ₂	۰/۵۱۴	۰/۵۲۱
NaNO ₂	-	۰/۶۴۸
NaCl	۰/۷۵۱	۰/۷۴۸
KCl	۰/۸۲۶	۰/۸۴۱

قرار گرفته بودند، جا داده شده و درب ظرف ها به طور کامل بسته شد. لازم به ذکر است که در ظرف های حاوی آب مقطر به خاطر رطوبت نسبی بالا احتمال کپک زدن وجود داشت، به همین دلیل از مقداری تولوئن که یک ماده قارچ کش است، استفاده شد. نمونه ها پس از ۱۷ روز در ظرف های محتوی آب مقطر، به وزن ثابت رسیده و برای قرار گرفتن در ظرف های محتوی محلول اشباع نمک ها آماده شدند. مراحل بالا به غیر از مرحله آسیاب برای مغز پسته و پسته کامل نیز انجام شد و نمونه ها پس از ۲۷ روز به وزن ثابت رسیده و برای قرار گرفتن در محیط با شرایط دما و فعالیت آبی ثابت برای تعیین رطوبت همدمای دفعی آماده شدند.

آماده سازی محلول اشباع نمک ها

برای ایجاد رطوبت های نسبی ثابت در دامنه فعالیت آبی $A_w = 0/11$ تا $0/86$ از محلول اشباع ۸ نمک استفاده شد. میزان رطوبت های ایجاد شده به وسیله نمک ها یکسان گزارش شده است و تفاوت بسیار کمی نسبت به یکدیگر نشان می دهند. در جدول ۱ فعالیت آبی برای نمک ها از دو مرجع [۱۱] و [۱۴] در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد با هم مقایسه شده اند.

هر یک از نمک ها به صورت خالص و از شرکت مرک خریداری شدند. لازم به ذکر است که تنها محلول های اشباع از نمک های فوق می توانند رطوبت های مورد نظر را ایجاد کنند و باتوجه به اینکه با افزایش دما حلالیت نمک ها افزایش می یابد، بنابراین، برای حصول اطمینان از اینکه در چهار دمای ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد نمک ها به صورت اشباع باقی می ماند، محلول اشباع نمک ها در ۶۰ درجه سانتی گراد تهیه شده و در هر

جدول ۲- رطوبت تعادلی پسته در ۱۵ درجه سانتی گراد برحسب فعالیت آبی در حالت‌های جذب و دفع

فعالیت آبی	پودر پسته جذب	مغز پسته جذب	پسته کامل جذب	پودر پسته دفع	مغز پسته دفع	پسته کامل دفع
۸۱۱	Xc	Xc	Xc	Xc	Xc	Xc
۸۱۱	۲/۳۲	—	—	۲/۱۵۱	—	—
۰/۲۶۱	۲/۹	۱/۳۱۹	۲/۳۹۳	۲/۳۴۲	۲/۲۵۷	۲/۹۵۲
۰/۳۳۳	۲/۴۹۰	—	—	۲/۹۴۰	—	—
۰/۴۵۹	۳/۵۰۵	۳/۵۳۵	۵/۴۸	۳/۸۳۸	۳/۷۳۶	۶/۳۷۱
۰/۵۵۹	۴/۱۶۴	۴/۵۵	۶/۵۷۰	۵/۱۰۰	۵/۱۹۹	۷/۸۲۶
۰/۶۷	۵/۴۲۵	—	—	۵/۶۹۶	—	—
۰/۷۵۶	۷/۶۳	۱۰/۶۳۰	۱۱/۴۶۰	۷/۹۲۵	۱۱/۵۴۱	۱۲/۱۲۴
۰/۸۵۹	۸/۲۹۸	—	—	۹/۶۴۹	—	—

Xc میانگین چهار تکرار است و واحد آن کیلوگرم ماده خشک/ کیلوگرم آب می باشد.

تفاوتی حدود ۱۷ درصد وجود دارد که این تفاوت را می توان به متفاوت بودن نوع پسته نسبت داد. همچنین ماسکان نیز در سال ۱۹۹۷ نتیجه‌هایی در مورد رطوبت تعادلی جذبی پسته در دمای ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی گراد ارائه کرده است [۶] که با استفاده از روش درون یابی نتیجه‌هایی از کار ایشان در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد برای مقایسه با نتیجه‌های این کار استخراج شده است که در جدول ۶ ارائه شده است. مقایسه نتیجه‌های این کار با کار ایشان حدود ۹ درصد تفاوت دارد که در گستره قابل قبول است.

جهت ارائه مناسب برای رفتار رطوبت تعادلی پسته، مدل‌های ریاضی موجود مانند مدل‌های اسمیت [۱۵]، اسوین [۱۳]، BET [۱۶]، GAB [۱۷]، هندرسون [۱۲] و هالسی [۱۰] برای برازش رفتار رطوبت تعادلی مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های حاصل از برازش‌ها نشان دادند که تنها مدل اسمیت [۱۵] بیانگر رفتار

جدول ۳- رطوبت تعادلی پسته در ۲۵ درجه سانتی گراد برحسب فعالیت آبی برای جذب و دفع

فعالیت آبی	پودر پسته جذب	پودر پسته دفع
۸۱۱	Xc	Xc
۰/۱۱۵	۱/۲۱۰	۱/۲۶۳
۰/۲۳۴	۱/۵۱۶	۱/۶۹۰
۰/۳۳۹	۱/۶۹۰	۲/۱۶۸
۰/۴۴۳	۲/۵۵۷	۳/۳۴۲
۰/۵۳۶	۳/۳۰۵	۳/۹۴۲
۰/۶۵۴	۵/۱۲۶	۵/۲۴۲
۰/۷۶۵	۷/۲۷۲	۷/۲۸۰
۰/۸۴۶	۸/۳۸۷	۸/۴۹۱

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی اثرهای تغییر دما روی منحنی‌های ایزوترم در شکل‌های ۱ تا ۶ مشخص می‌کند که با افزایش دما در یک فعالیت آبی مشخص، میزان رطوبت تعادلی پسته کاهش می‌یابد. همچنین در فعالیت آبی ۲ تا ۷ بیشترین هیستریزیس (پسماند) مشاهده می‌شود که با افزایش دما این پدیده کاهش می‌یابد و در فعالیت آبی زیر ۲ و بالای ۷ به کمترین مقدار، کاهش می‌یابد. منحنی‌های ایزوترم جذب و دفع برای پسته در شرایط دمایی متفاوت در شکل‌های ۷ تا ۱۴ آورده شده است. با توجه به منحنی‌های ایزوترم جذبی و دفعی در پسته کامل و مغز پسته و مقایسه آن با منحنی‌های ایزوترم پودر پسته مشخص می‌شود که مقدار هیستریزیس (عدم انطباق نمودار جذب و دفع همدمایی بر یکدیگر) در پسته کامل، بیشتر از مغز پسته و در مغز پسته بیشتر از پودر پسته است که دلیل آن می‌تواند وجود پوسته استخوانی در پسته کامل نسبت به مغز پسته و مجراهای موین بیشتر مغز پسته نسبت به پودر پسته باشد که در جذب مجدد آب، یک مانع در برابر انتقال جرم است. مقایسه مقدارهای رطوبت تعادلی پسته در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است که مشخص می‌کند در یک دما و فعالیت آبی مشخص مقدار رطوبت تعادلی در پسته کامل بیشتر از مغز پسته و در مغز پسته بیشتر از پودر پسته است. یانیتیس در سال ۱۹۹۶ نتیجه‌هایی در خصوص رطوبت تعادلی جذب و دفع پسته در دماهای ۱۵ و ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی گراد ارائه کرده است. آن نتیجه‌ها با مدل GAB برازش شده و ضریب‌های مدل ارائه شد [۷]. مقایسه نتیجه‌های این کار با نتیجه‌های ایشان در جدول ۶ آورده شده و نشانگر این است که

ثابت گازها مقدار گرمای لازم برای جذب یا دفع محاسبه می شود. نتیجه های حاصل از تعیین گرمای پیوندی در جدول ۸ آمده است. نتیجه های حاصل از تعیین گرمای پیوندی پسته و آب (جدول ۸) نشان می دهد که هنگامی که رطوبت مواد غذایی افزایش می یابد، ΔH_s کاهش می یابد. در رطوبت های پایین، میزان انرژی خالص ایزواستریک زیاد است که نشان دهنده پیوند قوی مولکول های آب به ماده غذایی است. هنگامی که رطوبت افزایش می یابد مقدار انرژی خالص ایزواستریک کم می شود که نشان دهنده این است که ویژگی های آب موجود در مواد غذایی به آب آزاد نزدیک می شود. با توجه به اینکه برای ارزیابی چگونگی پیوند مولکولی آب با دیواره جامد مواد غذایی و حل معادله های مربوط به موازنه جرم و انرژی در طراحی خشک کن ها نیاز به نتیجه های منحنی های گرمای پیوندی دفع رطوبت دارد، نتیجه ها بازگو می شود.

در رطوبت های کمتر از ۶۰ درصد (مبنای خشک) مقدار گرمای پیوندی در پسته کامل بیشتر از مغز پسته و در مغز پسته بیشتر از پودر پسته است. در رطوبت های بیشتر از ۶۰ درصد مقدار گرمای پیوندی در پودر پسته به صفر نزدیک می شود و مشخص می کند که در این گستره رطوبت تعادلی، ویژگی های آب موجود در پسته به آب آزاد نزدیک می شود. در این گستره رطوبت، منحنی گرمای پیوندی در مغز پسته و پسته کامل، بر هم منطبق می شوند (شکل ۱۷). همچنین نتیجه های به دست آمده از منحنی های گرمای پیوندی در حالت جذب و دفع رطوبت حاکی از این است که مقدار انرژی پیوندی در حالت دفع رطوبت، بیشتر از جذب رطوبت بوده که علت آن ممکن است به دلیل تغییرهای ساختمانی در طول خشک شدن باشد که حرکت آب را آسانتر می کند. با توجه به شکل ۱۷ مشخص می شود که در پسته کامل با کاهش رطوبت از ۱۰ درصد به ۲ درصد (بر مبنای خشک) مقدار گرمای پیوندی از ۱/۹۱۵ به ۶۰/۶۵ کیلوژول بر مول افزایش می یابد و در مغز پسته با کاهش رطوبت از ۱۰ درصد به ۱ درصد مقدار گرمای پیوندی از ۲/۷۸۳ به ۴۱/۸۵۶ کیلوژول بر مول افزایش می یابد. در پودر پسته با کاهش رطوبت از ۱۰ درصد به ۱ درصد گرمای پیوندی از ۰/۲۹۹ به ۳۳/۰۱ کیلوژول بر مول افزایش می یابد. این نتیجه ها مشخص می کند که دفع رطوبت از پسته کامل نسبت به مغز پسته و در مغز پسته نسبت به پودر پسته به مراتب نیاز به انرژی بیشتری دارد که می تواند به دلیل وجود پوسته استخوانی در پسته کامل نسبت به مغز پسته و وجود

رطوبت تعادلی پسته به کار رفته در این تحقیق است. مدل BET که به طور معمول برای مواد غذایی که دارای آب تک لایه است قابل استفاده بوده، و عدم برازش خوب نتیجه ها با این مدل نشان می دهد که آب درون پسته به کار رفته از نوع تک لایه نبوده بلکه می تواند از نوع چند لایه باشد. برای برازش داده های آزمایشگاهی از نرم افزار Curve-fit استفاده شد. لازم به ذکر است که این نرم افزار ابتدا داده های آزمایشگاهی را در قالب $Y_{act}X$ دریافت کرده و سپس نقاط را برای قرار گرفتن روی منحنی تصحیح، و در قالب Y_{cal} ارایه کرد. در نهایت درصد خطا طبق رابطه ۲ محاسبه شد و تنها مدل /سمیت [15] درصد خطای قابل قبولی داشت.

$$\%E = 100 * \sum |Y_{act} - Y_{cal}| / (N * Y_{act}) \quad (2)$$

مدل ارایه شده /سمیت [15] برای بیان داده های آزمایشگاهی این تحقیق به صورت زیر است:

$$X_e = B2 - B1 \ln(1 - A_w) \quad (3)$$

ضریب های $B1$ و $B2$ به دست آمده از برازش داده های آزمایشگاهی به وسیله مدل بالا برای حالت جذب و دفع در جدول ۷ آورده شده است.

تعیین گرمای پیوندی

تغییر گرمای ناشی از جذب و دفع مواد (ΔH_s) را گرمای جذب - دفع یا گرمای پیوندی می گویند. یکی از مهم ترین کاربردها نمودارهای رطوبت تعادلی، تعیین گرمای پیوندی مواد است. با توجه به استخراج رابطه رطوبت تعادلی مواد از داده های آزمایشگاهی و با استفاده از معادله کلایزیوس-کلایرون، ΔH_s یا همان گرمای مورد نیاز برای جذب و دفع رطوبت را می توان محاسبه کرد که برای ارزیابی چگونگی پیوند مولکول های آب با دیواره جامد مواد غذایی و حل معادله های مربوط به موازنه انرژی و جرم در طراحی خشک کن ها کاربرد عملی دارد. معادله کلایزیوس - کلایرون به صورت زیر است:

$$d(\ln A_w) / d(1/T) = -\Delta H_s / R \quad (4)$$

برای به دست آوردن مقدار ΔH_s ابتدا شیب خط $\ln A_w$ برحسب $1/T$ را که برابر $-\Delta H_s / R$ است به دست آورده سپس با ضرب آن در

جدول ۴- رطوبت تعادلی پسته در ۳۵ درجه سانتی گراد برحسب فعالیت آبی برای جذب و دفع

فعالیت آبی	پودر پسته جذب	مغز پسته جذب	پسته کامل جذب	پودر پسته دفع	مغز پسته دفع	پسته کامل دفع
Aw	Xc	Xc	Xc	Xc	Xc	Xc
۰/۱۰۸	۱/۰۲۸	—	—	۱/۵۶۷	—	—
۰/۲۱۵	۱/۱۶۱	۱/۶۳۷	۱/۸۲۰	۱/۳۱۴	۲/۵۲۱	۲/۷۵۷
۰/۳۱۸	۱/۶۶۴	—	—	۲/۱۰۸	—	—
۰/۴۳۶	۲/۴۳۸	۳/۵۱۹	۴/۱۲۷	۳/۱۳۳	۳/۷۲۵	۴/۳۸۰
۰/۵۱۵	۳/۱۲۱	۳/۹۶۴	۵/۵۱۷	۳/۴۹۱	۴/۱۴۱	۵/۶۹۸
۰/۶۲۸	۵/۱۲۳	—	—	—	—	—
۰/۷۳۴	۷/۰۶۳	۹/۵۲۳	۱۰/۲۲۷	۷/۱۱۱	۱۰/۲۳۴	۱۰/۹۴۷
۰/۸۲۱	۸/۲۹۸	—	—	۸/۴۰۱	—	—

Xe میانگین چهار تکرار است و واحد آن کیلوگرم ماده خشک/ کیلوگرم آب می باشد.

جدول ۶- مقایسه رطوبت تعادلی پسته به دست آمده در این تحقیق با نتیجه های دیگران در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد

فعالیت آبی Aw	جذب		دفع پسته کامل	درصد اختلاف
	مغز پسته	پودر پسته		
۰/۲۶۱	۱/۳۱۹	—	—	٪۱۷/۵
۰/۴۵۹	—	—	۶/۴۷۱ ۷/۸ [۷]	٪۱۹/۵
۰/۵۵۹	—	—	۷/۸۲۶ ۸/۹۹ [۷]	٪۱۳
۰/۷۵۶	—	—	۱۲/۱۲۴ ۱۵/۱ [۷]	٪۱۹
۰/۷۵۶	—	۷/۰۶ ۶/۸ [۶]	—	٪۸/۵
۰/۶۷	—	۵/۴۲۵ ۴/۹ [۶]	—	٪۹

Xe میانگین چهار تکرار است و واحد آن کیلوگرم ماده خشک/ کیلوگرم آب می باشد.

جدول ۵- رطوبت تعادلی پسته در ۴۰ درجه سانتی گراد برحسب فعالیت آبی در حالت های جذب و دفع

فعالیت آبی	پودر پسته جذب	پودر پسته دفع
Aw	Xc	Xc
۰/۵۰۱	۰/۹۸۹	۱/۰۲۱
۰/۲۰۶	۱/۱۵۸	۱/۳۰۳
۰/۳۱۳	۱/۴۵۰	۱/۹۱۵
۰/۴۳۳	۲/۳۴۱	۲/۹۹۸
۰/۶۰۵	۳/۲۰۱	۳/۷۳۳
۰/۶۱۴	۵/۰۱۱	۵/۰۳۱
۰/۷۴۸	۷/۰۱۰	۷/۱۰۲
۰/۸۰۵	۸/۲۱۷	۸/۲۲۳

Xe میانگین چهار تکرار است و واحد آن کیلوگرم ماده خشک/ کیلوگرم آب می باشد.

جدول ۷- ضریب های مدل اسمیت که از برازش داده های آزمایشگاهی به دست آمده است

دما	B2	B2	B2	B1	B1	B1	E(%)	E(%)	E(%)
درجه سانتی گراد	پودر پسته جذب	مغز پسته جذب	پسته کامل جذب	پودر پسته جذب	مغز پسته جذب	پسته کامل جذب	پودر پسته دفع	مغز پسته دفع	پسته کامل دفع
۱۵	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۱۹۰	۰/۰۰۴۰	۰/۰۴۴۷	۰/۰۷۶۴	۰/۰۷۳۳	۹/۴۴	۷/۹۷۶	۴/۱۸۰
۲۵	۰/۰۰۲۳	—	—	۰/۰۴۴۸	—	—	۱۲/۱۰	—	—
۳۵	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۴۴۸	۰/۰۷۱۷	۰/۰۷۵۷	۱۴/۷۲	۱۲/۱۵۸	۱/۹۸۳
۴۰	۰/۰۰۱۲	—	—	۰/۰۵۱۰	—	—	۱۵/۹۱	—	—
	دفع	دفع	دفع	دفع	دفع	دفع	دفع	دفع	دفع
۱۵	۰/۰۱۳۵	۰/۰۰۴۴	۰/۰۲۱۴	۰/۰۴۳۰	۰/۰۷۶۲	۰/۰۶۶۳	۶/۰۵	۱۳/۸۵۶	۰/۴۲۶
۲۵	۰/۰۰۶۳	—	—	۰/۰۴۳۲	—	—	۶/۴۸	—	—
۳۵	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۴۸	۰/۰۴۸۱	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۵۴	۷/۰۷	۱۷/۷۹۶	۸/۰۶۱
۴۰	۰/۰۱۸۶	—	—	۰/۰۴۸۱	—	—	۶/۵۱	—	—

B1, B2 بدون بُعد هستند.

جدول ۸ - گرمای پیوندی آب در پسته برحسب رطوبت تعادلی، (kJ/mol)

گرمای پیوندی دفع رطوبت	گرمای پیوندی دفع رطوبت	گرمای پیوندی دفع رطوبت	گرمای پیوندی جذب رطوبت	گرمای پیوندی جذب رطوبت	گرمای پیوندی جذب رطوبت	گرمای تعادلی بر مبنای خشک
پسته کامل	مغز پسته	پودر پسته	پسته کامل	مغز پسته	پودر پسته	Xc
—	۴۱/۸۵۶	۳۳/۰۶۰	۱۸/۶۸۷	—	۵۱/۴۲۱	۱
—	۲۲/۶۶۳	۲۸/۱۲۰	۱۰/۷۷۱	۴۶/۳۳۸	۱۸/۹۰۵	۱/۵
۶۰/۶۵۰	۱۵/۸۷۶	۲/۰۰۰	۵/۷۱۳	۲۳/۷۸۳	۱۰/۷۹۰	۲
۳۱/۰۷۰	۱۰/۱۵۶	۷/۶۸۳	۴/۰۴۸	۱۲/۴۲۳	۴/۶۶۴	۳
۱۲/۱۰۰	۷/۵۱۸	۳/۶۵۸	۲/۱۲۴	۸/۴۵۸	۲/۲۹۴	۴
۸/۰۳۴	۶/۰۰۰	۱/۸۳۷	۱/۶۲۲	۶/۳۹۷	۱/۰۴۷	۵
۵/۶۷۴	۴/۹۱۸	۰/۸۲۳	۱/۵۶۰	۵/۰۹۶	۰/۳۹۰	۶
۴/۱۹۲	۴/۱۹۲	۰/۲۵۷	۰/۷۹۵	۴/۱۹۳	۰/۰۴۱	۷
۳/۱۸۰	۳/۶۱۴	۰/۰۶۶	۰/۵۲۴	۳/۵۴۲	۰/۱۸۲	۸
۲/۴۹۳	۲/۱۴۴	۰/۰۲۱۶	۰/۳۹۷	۲/۳۰۶	۰/۲۶۶	۹
۱/۹۱۵	۲/۷۸۳	۰/۲۹۹	۰/۳۲۵	۲/۶۳۸	۰/۳۴۰	۱۰

این حالت در گستره فعالیت آبی ۰/۲ تا ۰/۷ بیشترین مقدار است و در گستره فعالیت آبی کمتر از ۰/۲ و بیشتر از ۰/۷ به شدت کاهش می یابد.

همچنین با استفاده از منحنی های جذبی و دفعی به دست آمده از آزمایش ها، انرژی پیوندی جذب و دفع رطوبت پسته تعیین شد و مشخص شد که مقدار انرژی پیوندی دفع رطوبت در بیشتر محدوده های رطوبت به دست آمده، بیشتر از انرژی جذب رطوبت است.

همچنین مشخص شد که مقدار انرژی پیوندی دفع رطوبت در پسته کامل ۱۲۰۰۰ ژول بر مول، در مغز پسته ۷۶۰۰ ژول بر مول و در پودر پسته ۳۸۰۰ ژول بر مول است.

حفره های موئین بیشتر و سطح تبادل کمتر مغز پسته نسبت به پودر پسته باشد که انتقال جرم و گرما را سخت تر می کند. با توجه به اینکه رطوبت نهایی پسته، طبق استانداردهای آن پس از فرآیند خشک کردن، باید حدود ۴ درصد (مبنای تر) باشد و با استفاده از منحنی انرژی پیوندی دفع رطوبت در شکل ۱۷ مشخص می شود که برای رسیدن به رطوبت استاندارد، میزان انرژی پیوندی دفع رطوبت در پسته کامل ۱۲۰۰۰ ژول بر مول و در مغز پسته حدود ۷۶۰۰ ژول بر مول و در پودر پسته حدود ۳۸۰۰ ژول بر مول است.

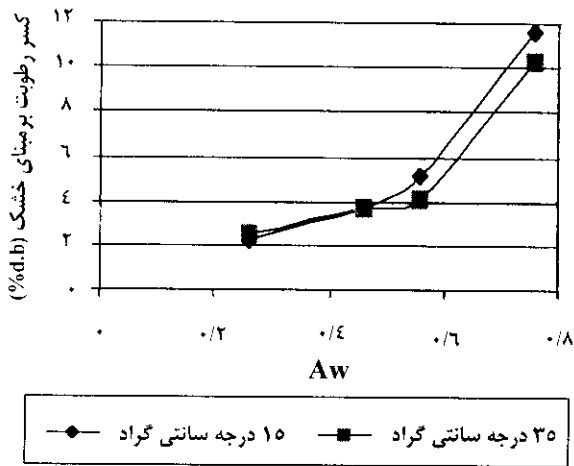
نتیجه گیری

در طراحی خشک کن های پسته و تعیین شرایط بهینه انبارمانی آن، منحنی های رطوبت تعادلی و انرژی پیوندی آب و پسته از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این تحقیق با استفاده از روش استاتیک (از طریق آزمایش ها) این منحنی ها برای پسته کامل و مغز پسته در دمای ۱۵ و ۳۵ درجه سانتی گراد و برای پودر پسته در دمای ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد تعیین شدند و مدل ریاضی که بیان کننده رفتار رطوبت تعادلی پسته ایران است، ارائه شد.

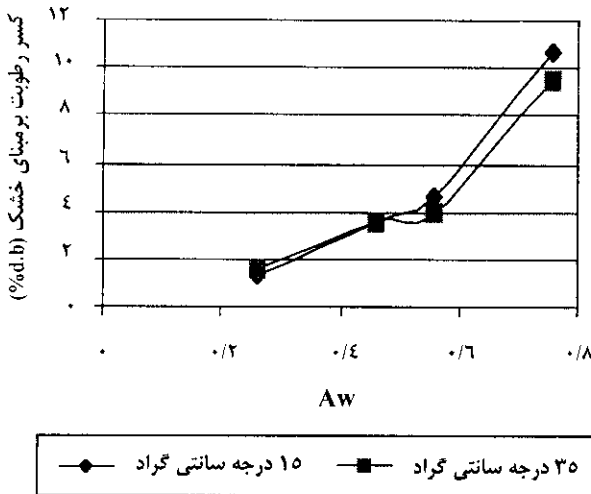
نتیجه ها حاکی از آن است که مقدار هیستریزیس در پسته کامل بیشتر از مغز پسته و در مغز پسته بیشتر از پودر پسته است و

فهرست علائم

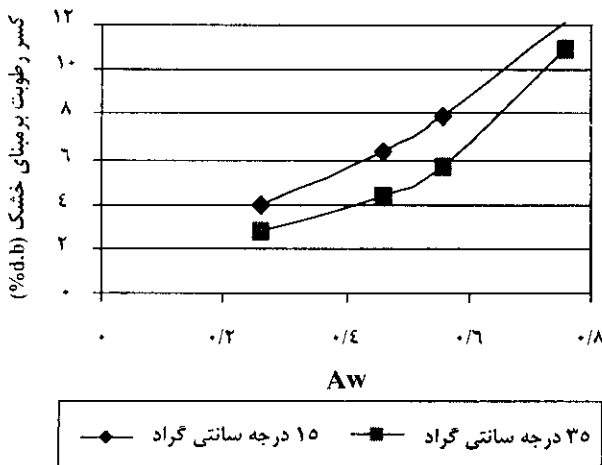
Aw	فعالیت آبی
B1	ثابت معادله اسمیت
B2	ثابت معادله اسمیت
%E	درصد خطا
ΔHs	گرمای پیوندی خالص برحسب کیلوژول بر مول
Mw	وزن نمونه تر
Md	وزن نمونه خشک



شکل ۳- تاثیر دما بر رطوبت تعادلی مغز پسته در حالت جذب

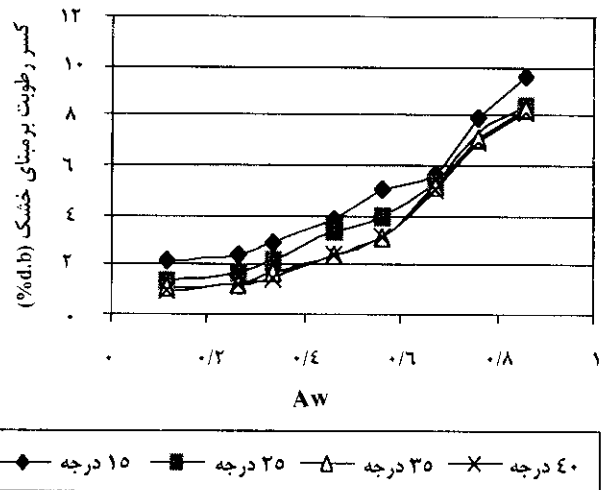


شکل ۴- تاثیر دما بر رطوبت تعادلی مغز پسته در حالت دفع

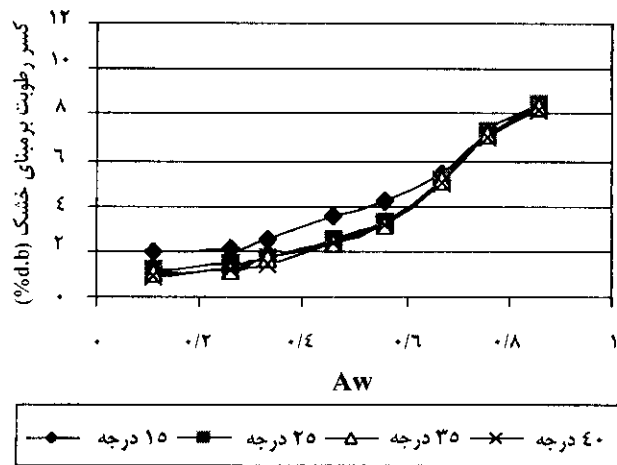


شکل ۵- تاثیر دما بر رطوبت تعادلی پسته کامل در حالت جذب

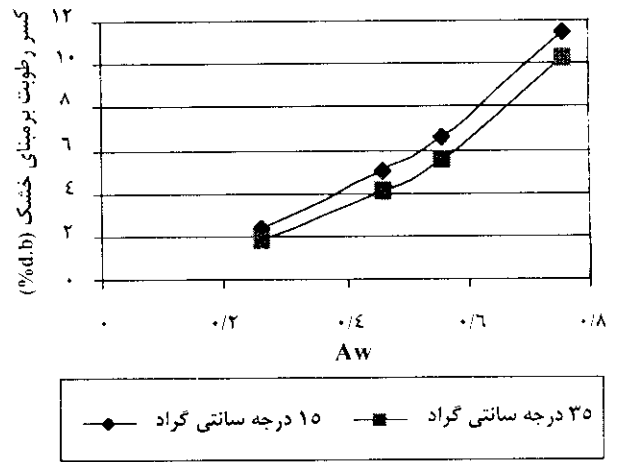
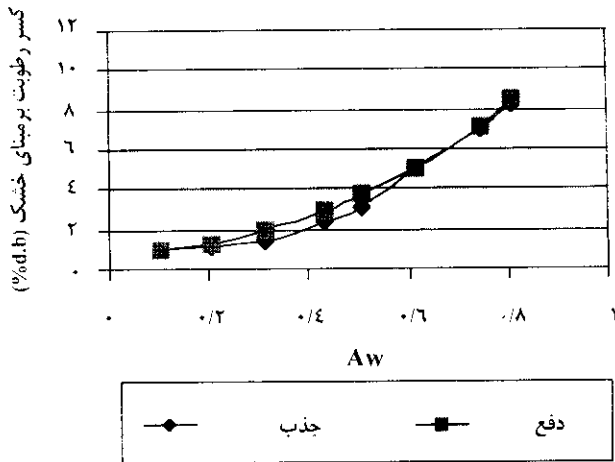
N تعداد نقاط برای برازش
 Xe مقدار رطوبت تعادلی (بر مبنای خشک)
 گرم ماده خشک/گرم آب
 Y_{act} رطوبت تعادلی واقعی به دست آمده از آزمایش ها
 گرم/گرم
 Y_{cal} رطوبت تعادلی تصحیح شده
 گرم / گرم
 R = ۸۳۱۴ ثابت گازها (مول درجه کلون/کیلوزول)
 T (K) دما



شکل ۱- تاثیر دما بر رطوبت تعادلی پودر پسته در حالت جذب

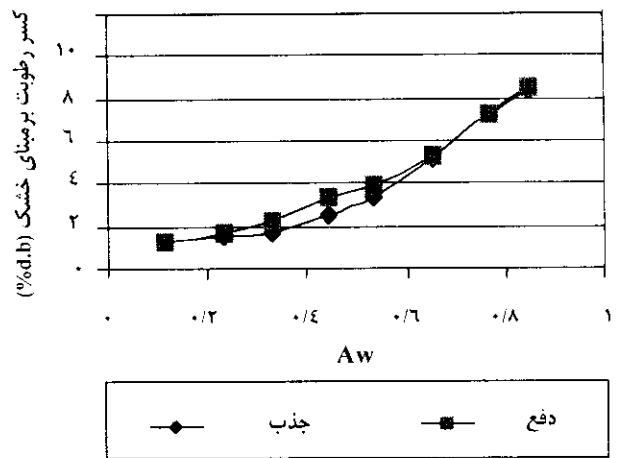
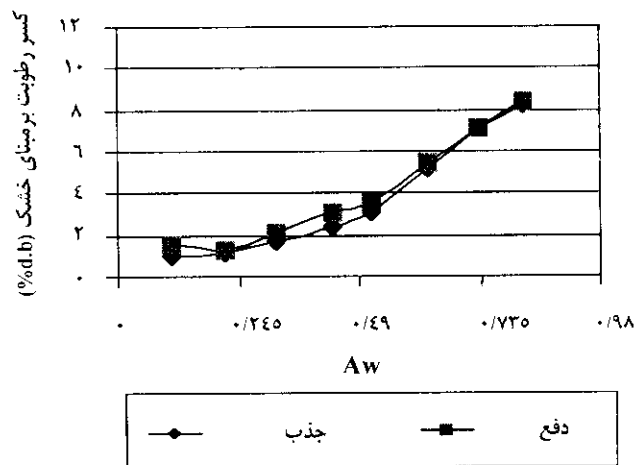


شکل ۲- تاثیر دما بر رطوبت تعادلی پودر پسته در حالت دفع



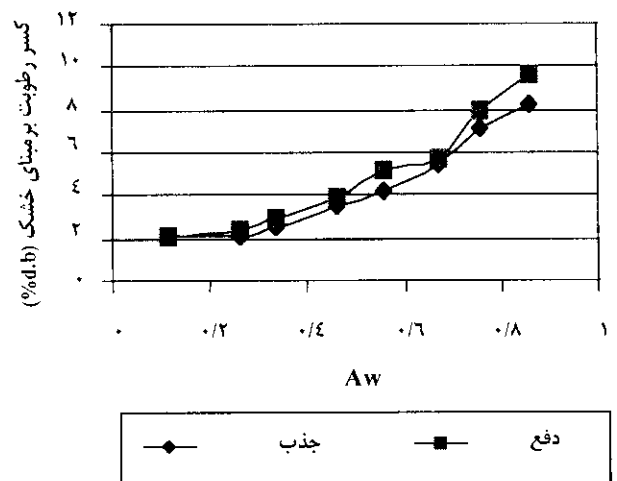
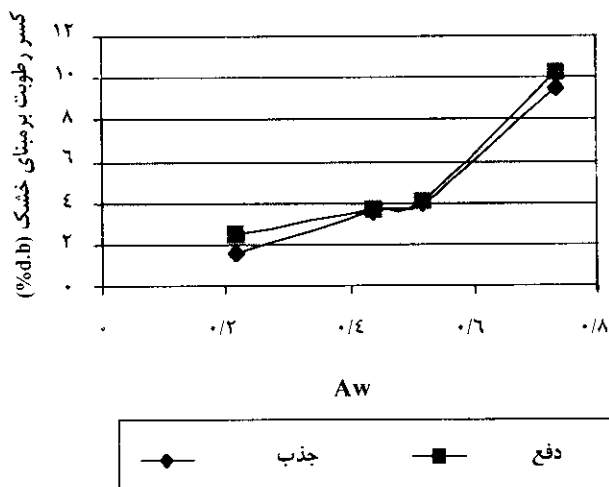
شکل ۹- هیستریزیس در پودر پسته در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد

شکل ۶- تاثیر دما بر رطوبت تعادلی پسته کامل در حالت دفع



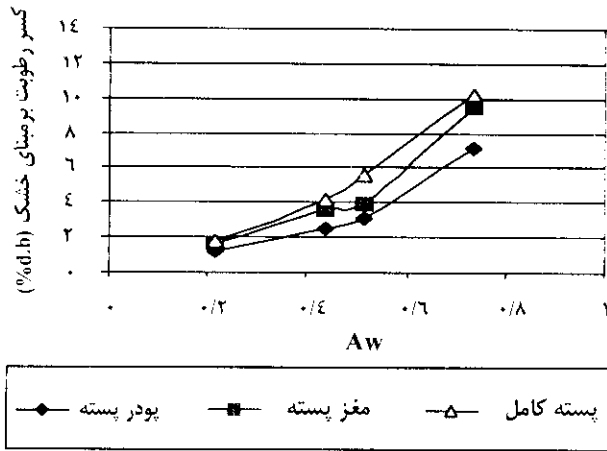
شکل ۱۰- هیستریزیس در پودر پسته در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد

شکل ۷- هیستریزیس در پودر پسته در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد

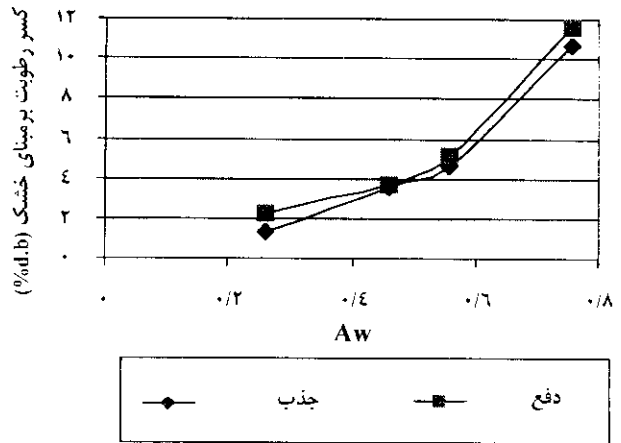


شکل ۱۱- هیستریزیس در مغز پسته در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد

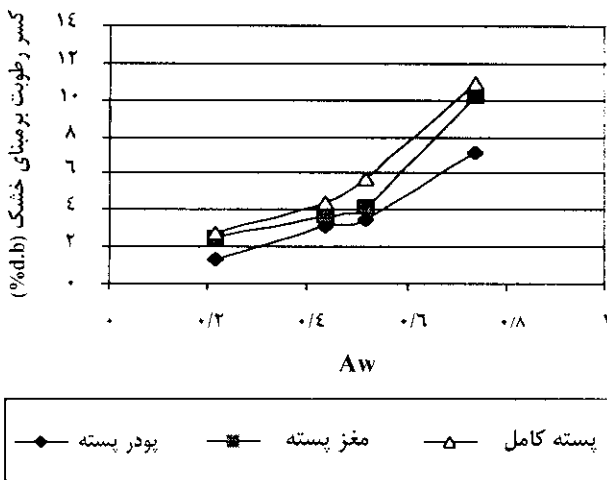
شکل ۸- هیستریزیس در پودر پسته در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد



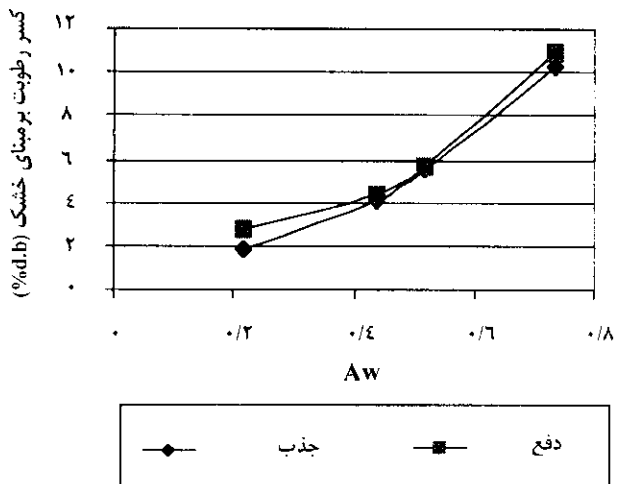
شکل ۱۵- E.M.C. در سه حالت جذب برای پسته



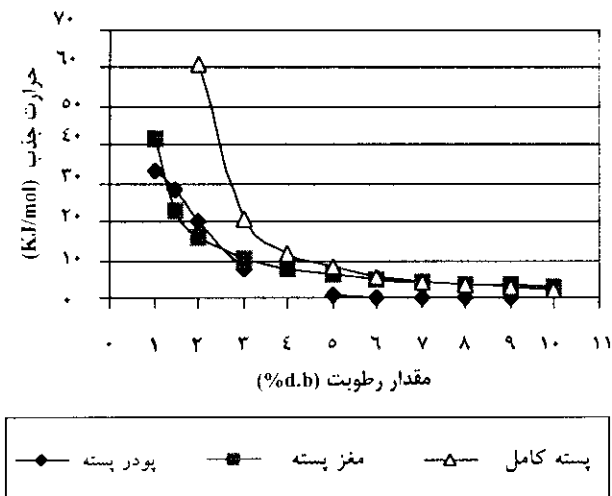
شکل ۱۲- هیستریزیس در مغز پسته در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد



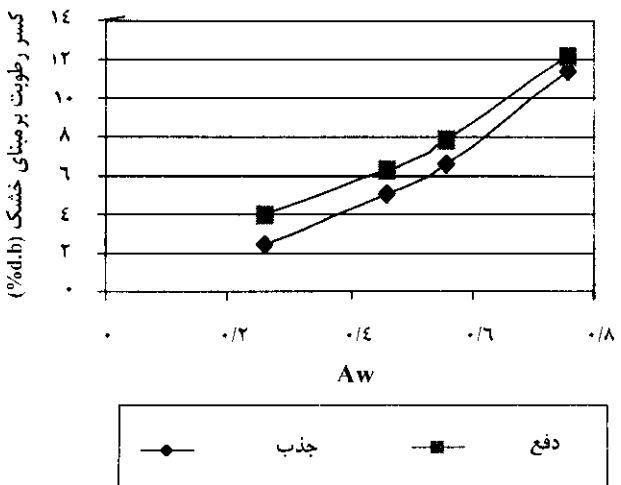
شکل ۱۶- E.M.C. در سه حالت جذب برای پسته



شکل ۱۳- هیستریزیس در پسته کامل در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد



شکل ۱۷- مقایسه انرژی پیوندی دفع رطوبت در پودر پسته، مغز پسته و پسته کامل



شکل ۱۴- هیستریزیس در پسته کامل در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد

تشکر و قدردانی

پژوهشگاه، که در پیشبرد این کار تحقیقاتی کمال مساعدت را
مبذول داشته و از نظرات ایشان استفاده شایانی شده است.

با تشکر از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران و
همچنین جناب آقای دکتر بصیری، عضو هیأت علمی آن

تاریخ دریافت: ۱۰/۸/۲۰، تاریخ پذیرش: ۸/۵/۸۱

مراجع

- [۱] مقدار و ارزش صادرات برحسب تعرفه و کشورهای مقصد در سال های ۱۳۷۲ لغایت ۱۳۷۶، گمرک جمهوری اسلامی ایران، دفتر آمار و خدمات ماشینی
- [۲] نگرشی کوتاه به پسته ایران، وزارت کشاورزی، معاونت امور باغبانی، امور پسته
- [۳] رضائیان، ایرج؛ امیر احمدی، سیدکاظم؛ آجودانی، پیمان؛ بررسی طول عمر پسته بسته‌بندی شده در روش‌های تحت خلا، فضای تغییر یافته و ...، ۱۳۷۵، اداره کل صنایع استان کرمان
- [4] AOAC 1995, Official method of analysis. Association of official analytical chemists Washington DC.
- [5] Aryanci, E, Coskun Dalgic, A., Moisture Sorption isotherm of Pistacia terbinthus I (1992).
- [6] Maskan. M. Gogus. F., The fitting of various models to water sorption Isotherm of Pistachio nut paste. **33**, 227-237 (1997).
- [7] Yanniotis. S., Zaramboutis. I., Water Sorption isotherms of Pistachio nuts. *Lebensm. Wiss. u. Technol.* **29**, 372-275 (1996).
- [8] Lubuza T.P., Kanane. A., and Chen. J.y. Effect of temperature on moisture sorption isotherms and water activities. Shift of two dehydrated foods, *J. of food Science*, **50**, P. 1385, (1985).
- [9] Ashworth, C., Moisture in solids in: Hand book of industrial solids drying. Institution Chemical Engineers, A continuing education course, Birmingham (1980).
- [10] Halsey, G., Physical adsorption in non-uniform surface, *Journal of Chemical Physics*, **16**, p.931 (1948).
- [11] Greenspan, L., Humidity fixed point of binary saturated aqueous solutions, *Jou. Res. Nat. Bureau Stand.-A Physics Chemical*, **81A**, pp. 89-96 (1977).
- [12] Henderson, S. H., A basic concepts of equilibrium moisture, *Agric. Eng. Jou.*, pp,29-32 (1952).
- [13] Oswin, G.R., The kinetics of package life, *Int. Chem. Ind.*, **65**, pp.419-421 (1946).
- [14] Saravacos, G.G., Tsiourvas, D.A., and Tsami, E., Effect of temperature on the water adsorption isotherms of sultana raisins, *Journal of Food Science*, **51**, pp. 381-383 (1986).
- [15] Smith. S. E., Sorption of water vapor by proteins and high polymers, *Jou. Ame. Chem. Soc.*, **96**, pp. 646 (1947).
- [16] Brunauer, S., Emmet, P. H., Teller, E., Adsorption of gases in multimolecular layers, *Jou. Ame. Chem. Soc.*, **60**, pp. 309 (1938).
- [17] Bizot, H. "The G. A. B. model to Construct sorption isotherms", Physical Properties of Foods, Applied Science publishers, London.