

دستیابی به منحنی های همدمای تعادلی و پیشنهاد مدل ریاضی مناسب برای پیش بینی رطوبت تعادل برای سه رقم پسته ایرانی

علی زمردیان^۱ و رجبعلی توکلی^۲
۱، ۲، استادیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز
تاریخ پذیرش مقاله ۸۲/۷/۹

خلاصه

پسته یکی از صادرات مهم کشاورزی ایران است که از لحاظ مزه، عطر و طعم بهترین پسته در دنیا شناخته می شود. تحقیقات مناسب در جهت بهبود روش های فراوری، نگهداری و بسته بندی به منظور جلب نظر خریداران خارجی بسیار ضروری است. خشک کردن مهم ترین مرحله فراوری پسته می باشد. رطوبت تعادلی (EMC)^۱ که عبارت است از: رطوبت یک ماده نمگیر (هیگروسکوپیک) در حال تعادل با محیطی ویژه (از لحاظ دما و رطوبت نسبی) در بررسی خشک کردن پسته بسیار اهمیت دارد. در این تحقیق، مقادیر رطوبت تعادلی برای سه رقم مهم پسته ایرانی که در کشور بیشتر تولید می شود (اوحدی، کله قوچی و عبدالهی) با استفاده از روش وزن سنجی در دماهای ۲۵، ۳۷ و ۵۰ درجه سانتیگراد در دامنه رطوبت نسبی هوا ۰/۱۱ تا ۰/۸۵ در چهار تکرار تعیین گردید. آزمایش ها به روش لایه های نازک در محفظه های کنترل شده و عایق بندی شده انجام گرفت به طوری که شرایط ترمودینامیکی هوا ثابت نگه داشته شد. دما به وسیله ترموستات کنترل شد و رطوبت نسبی هوای اطراف نمونه ها، با استفاده از محلول های نمک های مختلف اشباع تنظیم گردید. منحنی های همدمای دفعی برای این سه رقم تعیین گردید. با رسم نمودار برای مقادیر رطوبت تعادلی (EMC) پسته و رطوبت نسبی هوا (RH)^۲ در هر سه دما برای هر رقم، منحنی های سیگمائی (S شکل) حاصل گردید که در رطوبت های نسبی بالا شیب آن به شدت افزایش می یابد. پنج مدل ریاضی (چانگ - فاست، هالسی، هندرسون، اسوین و اسمیت)^۳ برای تحلیل داده های آزمایشی مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی ها نشان داد که مدل های اسوین، اسمیت و چانگ - فاست به ترتیب برای ارقام اوحدی، کله قوچی و عبدالهی جهت توصیف و پیش بینی رابطه بین رطوبت تعادلی و رطوبت نسبی مناسب می باشند. همچنین نتایج نشان داد که در یک رطوبت نسبی ثابت با افزایش دما مقدار رطوبت تعادلی در همه ارقام کاهش می یابد. اثر رقم و دما بر مقادیر رطوبت تعادلی از لحاظ آماری، معنی دار بود.

واژه های کلیدی: منحنی های همدمای تعادلی پسته، رطوبت تعادلی، مدل ریاضی

1. Equilibrium Moisture Content
2. Relative Humidity
3. Chunk-Pfost, Halsey, Henderson, Oswin and Smith mathematical models

مکاتبه کننده: علی زمردیان

مقدمه

پسته گیاهی نیمه گرمسیری از خانواده آناکاردیاسه^۱ و جنس پیستاسیا^۲ می‌باشد (۴). نام *Pistacia* از کلمه فارسی "پیسته" یا "پسته" گرفته شده است. شواهد موجود نشان می‌دهد که از حدود سه تا چهار هزار سال قبل پسته در ایران پرورش می‌یافته است و تقریباً در اوایل قرن اول میلادی به نواحی مدیترانه‌ای اروپا معرفی شده است. مناطق اولیه رشد پسته، در آسیای میانه در مرزهای افغانستان، شوروی سابق و مرزهای شمال شرقی ایران بوده است (۲۰).

از بین گونه‌های فوق فقط پسته اهلی است که میوه‌های آن درشت بوده و ارزش اقتصادی دارد. این گونه را می‌توان مادر پسته‌های ایران و سایر پسته‌های اهلی دنیا به شمار آورد. در بیش از ۹۹ درصد از باغ‌های پسته ایران از گونه پسته اهلی به‌عنوان پایه استفاده شده است (۴).

پسته یکی از مهمترین محصولات باغی کشور است و بر اساس آمار سال ۱۳۸۰ کشور ۳۷۹۴۹۳ هکتار از اراضی زیر کشت ایران به کشت و پرورش این محصول اختصاص دارد که حدود ۶۶ درصد کل اراضی زیرکشت پسته در جهان را تشکیل می‌دهد (۵). بر اساس آخرین گزارش سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی^۳ منتشر شده در سال ۱۹۹۸ میزان تولید پسته در ایران در سال ۱۳۷۶ در حدود ۱۳۰ هزار تن بوده است که از این لحاظ در صدر تولیدکنندگان پسته در جهان قرار دارد (۲).

از جمله عوامل مهم و مؤثر حضور در بازار جهانی پسته، شرایط مطلوب کیفی بر اساس استانداردهای جهانی مشخص و مورد قبول خریداران می‌باشد. لذا رعایت نکات بهداشتی و اصول علمی در کلیه مراحل تولید پسته اعم از کاشت و داشت، برداشت، فرآورده‌های پس از برداشت، انبارداری، و حمل و نقل نقش قابل توجهی در جلب بازارهای داخلی و خارجی خواهد داشت.

مهمترین منطقه پسته‌کاری ایران و جهان، استان کرمان و منطقه رفسنجان می‌باشد حدود ۹۲/۵ درصد از کل تولید ایران متعلق به استان کرمان می‌باشد. به دلیل بالا رفتن ارزش

اقتصادی پسته و صادرات آن و همچنین مقاومت به شوری و خشکی گیاه، در سال‌های اخیر پسته‌کاری روند روبه‌افزایشی داشته است (۴). علاوه بر استان کرمان استان‌های یزد، خراسان و سمنان از مناطق عمده کشت پسته در ایران هستند. تا کنون در حدود ۶۰ رقم پسته اهلی در کشورمان شناخته شده است (۲۰). مهم‌ترین آنها بدین شرح می‌باشند: اوحدی، کله‌قوچی، اکبری، احمدآقایی و عبدالهی.

با پیشرفت فن‌آوری ضبط پسته و فرآوری آن در ایران در سال‌های اخیر احداث ترمینال‌های ضبط پسته توسعه بسیار چشمگیری داشته است. در این روش کلیه وسایل لازم جهت فرآیند پوست‌گیری، خشک‌کردن، جدا کردن و درجه‌بندی و حتی بسته‌بندی در یک محل مستقر گردیده است.

یکی از فرایندهای پس از برداشت عملیات خشک کردن می‌باشد. در حال حاضر نیمی از تولیدکنندگان، این فرآیند را به طور سنتی در معرض نور مستقیم خورشید انجام می‌دهند که این عمل در حدود ۳ تا ۴ روز طول می‌کشد. ولی با تأسیس مراکز ضبط پسته و تجهیز این مراکز به خشک‌کنهای صنعتی شرایط مطلوب‌تری برای خشک کردن پسته فراهم آمده است به نحوی که مدت خشک کردن به حدود ۴ تا ۱۰ ساعت کاهش یافته است (۴).

از جمله عوامل مهم در فرآیند خشک کردن با خشک‌کنهای صنعتی، آگاهی از میزان رطوبت تعادلی ماده می‌باشد. با آگاهی از مقدار رطوبت تعادلی، زمان رسیدن به رطوبت نهائی مورد نظر مشخص می‌گردد (فرآیند خشک کردن). هرگز نمی‌توان به رطوبتی از جسم که کمتر از رطوبت تعادلی در دما و رطوبت نسبی هوای داخل خشک‌کن است، رسید. یعنی با اضافه نمودن زمان خشک کردن، نه تنها رطوبت ماده کمتر نمی‌شود بلکه انرژی مصرف شده در خشک‌کن تلف می‌گردد. همچنین با استفاده از منحنی‌های رطوبت تعادلی هر ماده غذایی، می‌توان شرایط هوای محیط انبار را طوری تنظیم کرد که مانع رشد قارچ‌ها، باکتری‌ها و میکروب‌ها در انبار شود.

مقدار رطوبت ماده را بعد از آنکه آن ماده به مدت زمان نامحدودی در معرض محیط ویژه‌ای قرار گیرد رطوبت تعادلی گویند. به تعبیر دیگر مقدار رطوبتی که در آن رطوبت فشار بخار درونی ماده با فشار بخار محیط اطراف آن یکسان باشد، رطوبت

1. *Anacardiaceae*
2. *Pistacia*
3. FAO

برای تعیین منحنی همدمای رطوبت تعادلی بایستی شرایط ترمودینامیکی هوای محیط اطراف ماده ثابت نگه داشته شود. عموماً دمای هوای محیط آزمایش به وسیله گرمکن برقی همراه با ترموستات دقیق و رطوبت نسبی محیط یا فشار بخار هوای اطراف نمونه با کمک نمک‌های محلول اشباع مانند: کلرید منیزیم، کلرید سدیم، کلرید پتاسیم، کلرید لیتیم، نترات پتاسیم، نترات منیزیم، سولفات پتاسیم و سولفات آمونیوم (۱۰، ۲۴) کنترل می‌شود.

چن و وین موری (۱۹۸۹) در یک بررسی گسترده چهار معادله بیانگر روابط مقدار رطوبت تعادلی و رطوبت نسبی تعادلی محیط (EMC/ERH)^۲ را به منظور ارزیابی قابلیت آنها در انطباق با داده‌های آزمایشی برای دانه‌ها و بذور مختلف مورد مقایسه قرار دادند. معادلات مورد بررسی به شرح زیر می‌باشند (معادلات ۲، ۳، ۴، ۶):

الف- معادله هندرسون:

$$1 - RH = \exp(-K * T * M^N) \quad (1)$$

معادله (۱) توسط تامپسون و همکارانش اصلاح شده و بعنوان معادله اصلاح شده هندرسون بصورت زیر معرفی گردید:

$$1 - RH = \exp[-A(T+C)M^B] \quad (2)$$

ب- معادله چانگ-فاست:

$$RH = \exp\left[-\frac{A}{T+C} \exp(-BM)\right] \quad (3)$$

ج- معادله اصلاح شده هالسی:

$$RH = \exp[-\exp(A+BT)M^{-C}] \quad (4)$$

د- معادله اصلاح شده اوسوین:

$$M = K \left(\frac{RH}{1-RH} \right)^N \quad (5)$$

چن ۱۹۸۸ دریافت که ثابت K با دما یک رابطه خطی دارد و معادله اصلاح شده زیر را پیشنهاد کرد

$$M = (A + BT) \left(\frac{RH}{1-RH} \right)^N \quad (6)$$

که در آنها:

تعادلی خوانده می‌شود (۱۰). این عامل تعیین کننده کمترین مقدار رطوبتی است که می‌توان یک دانه را تحت شرایط معینی تا آن حد خشک کرد (۱۰). اهمیت این عامل برای محصولات کشاورزی به علت ارتباط مستقیم آن با مسائل انبارداری و خشک کردن می‌باشد (۱۳). از جمله کاربردهای رطوبت تعادلی تعیین مقدار گرمای نهان تبخیر محصولات کشاورزی می‌باشد. گرمای نهان تبخیر مقدار انرژی لازم برای تبخیر رطوبت موجود در ماده می‌باشد. همچنین تعیین سرعت خشک شدن و مدت زمان لازم جهت خشک شدن یک ماده با داشتن مقدار رطوبت تعادلی امکان پذیر است (۳، ۲۴).

از عوامل مؤثر بر مقادیر رطوبت تعادلی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: رطوبت نسبی و دمای محیط، جنس، رقم و مقدار رسیدگی (بلوغ) دانه (۱۰). ترکیبات شیمیایی ماده نیز در مقادیر رطوبت تعادلی نقش موثری دارد. به عنوان مثال در شرایط محیطی یکسان دانه‌های محتوی چربی (روغن) بالا نسبت به دانه‌های نشاسته‌ای، رطوبت تعادلی کمتری دارند (۱۰).

منحنی همدمای رطوبت تعادلی، بیان نموداری رابطه بین رطوبت ماده و رطوبت نسبی تعادلی محیط اطراف آن ماده (در یک دمای معین) می‌باشد. به بیان ساده‌تر نموداری که از رسم مقادیر مختلف رطوبت نسبی محیط (به عنوان متغیر مستقل) و مقادیر رطوبت تعادلی ماده (به عنوان متغیر وابسته) در دمای ثابت حاصل می‌شود، منحنی همدمای یا ایزوترم خوانده می‌شود. منحنی همدمای برای مواد بیولوژیکی به صورت S شکل^۱ است که این خاصیت جزء خواص مواد بیولوژیکی (مواد اسفنجی، نمگیر) از جمله محصولات کشاورزی می‌باشد. اثر دمای محیط بر مقدار EMC: در یک رطوبت نسبی معین محیط، با افزایش دمای محیط، مقدار رطوبت تعادلی کاهش می‌یابد (۱۰، ۱۹)

از خصوصیات بارز یک منحنی رطوبت تعادلی از نقطه نظر ریاضی می‌توان گفت: ۱- مقدار رطوبت نسبی تعادلی در جایی که رطوبت تعادلی صفر است، صفر می‌باشد. ۲- در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد، رطوبت تعادلی به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. ۳- شیب منحنی وقتی که رطوبت تعادلی به سمت صفر یا بی‌نهایت میل می‌کند، بی‌نهایت می‌شود (۱۳).

3 . Hygroscopic material

1 . S-shape or sigmoid type

2 . Hygroscopic material

M = مقدار رطوبت تعادلی، (در صد یا اعشاری)،

RH = رطوبت نسبی محیط، (در صد با اعشاری)،

T = درجه حرارت محیط، (K یا $^{\circ}C$)،

A و B , C , K , N اعداد ثابت.

نتایج مقایسه فوق به شرح زیر بود:

۱- معادلات اصلاح شده هندرسون و چانگ-فاست برای

دانه‌های نشاسته‌ای و مواد فیبری مناسب می‌باشد.

۲- معادله اصلاح شده هالسی مدل خوبی برای محصولات

حاوی روغن بالا و پروتئین زیاد می‌باشد.

۳- معادله اصلاح شده اوسوین مدل خوبی برای بادام زمینی،

بعضی واریته‌های ذرت و گندم و... می‌باشد (۱۱).

تسامی و همکارانش (۱۹۹۰) منحنی‌های همدمای جذب

رطوبت میوه‌های خشک شده (کشمش سلطانی، کشمش ریز

(سیاه)، انجیر، آلو و زردآلو) را در دماهای ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰

درجه سانتیگراد با استفاده از روش وزن‌سنجی استاتیک به

دست آوردند. منحنی‌های حاصل از آزمایش بیانگر اثر معکوس

حرارت در رطوبت‌های بالای ماده بود که این پدیده در اثر وجود

مقادیر زیاد قند در میوه‌های خشک شده می‌باشد.

ایرانی و همکارانش (۱۹۹۰) ضمن اشاره به اهمیت

منحنی همدمای جذب رطوبت آن را ابزار بسیار مهم در

پیش‌بینی پایداری مواد غذایی و انتخاب جنس و ماده

بسته‌بندی قلمداد نمودند. در این پژوهش منحنی‌های همدمای

زردآلو، انجیر و کشمش در دماهای ۲۰ و ۳۶ درجه سانتیگراد به

دست آمد. معادلات هالسی، ایگل‌سیاس-شریف، بت و گب برای

برازش اطلاعات آزمایشی مورد استفاده قرار گرفتند که هر دو

مدل نتایج قابل قبولی نشان دادند.

سوکرو و باتالبی (۱۹۹۱) تحقیقی در مورد میزان انتشار

رطوبت در مغزپسته در حال خشک شدن بر روی واریته گازیانتب

انجام دادند و مدلی برای مکانیزم خشک شدن آن براساس قانون

فیک ارائه دادند.

میردامادیه‌ها و خراسانی (۱۳۷۵) طی انجام یک طرح

تحقیقاتی تحت عنوان "تعیین اثرات درصد رطوبت اولیه، دمای

انبار و زمان نگهداری بر کیفیت و عمر انباری پسته" رطوبت

تعادلی سه رقم پسته ایرانی (اوحدی، اکبری و کله‌قوچی) را در

دمای $25^{\circ}C$ به دست آوردند. مقادیر رطوبت تعادلی به‌وسیله

دسیکاتور در سه رطوبت نسبی محیط (۱۱، ۴۳ و ۹۷ درصد) در دمای مذکور به دست آمده است.

ماسکان و گوگوس (۱۹۹۷) با استفاده از روش وزن‌سنجی

استاتیک و محلول‌های نمک اشباع، منحنی‌های همدمای

رطوبت خمیر مغز پسته را در سه دمای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه

سانتیگراد به دست آوردند. پیرو نتایج این محققین اثر دما بر

مقادیر رطوبت تعادلی، در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار نبود. در

این بررسی مشاهده شد که در فعالیت آبی بالا مقدار رطوبت

تعادلی با افزایش دما به شدت افزایش می‌یابد. در این آزمایش‌ها

۵ مدل (گب، بت، هندرسون، هالسی و ایگل‌سیاس-شریف) برای

برازش اطلاعات آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت.

بصری و توکلی‌پور (۱۳۷۸) با انجام طرح تحقیقاتی

بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن و انبارمانی پسته، منحنی‌های

همدمای جذبی و دفعی را برای پودر پسته، مغز پسته و پسته

کامل رقم امیری به دست آوردند. این منحنی‌ها در چهار دمای

۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد و در دامنه رطوبت نسبی

۱۱٪ تا ۸۶٪ به دست آمد. پس از تعیین رطوبت تعادلی و ترسیم

منحنی‌های مذکور مدل‌های بت، اسمیت، گب، هالسی و

هندرسون مورد برازش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در هر

چهار دما، منحنی‌ها از مدل اسمیت تبعیت می‌نمایند.

مک لاقلین و مگی (۱۹۹۸) در پژوهشی که به منظور تعیین

ایزوترم دفع رطوبت و گرمای ایزوستریک سیب‌زمینی انجام

شد، از روش استاندارد وزن‌سنجی در سه دمای ۳۰، ۴۵ و ۶۰

درجه استفاده نمودند. از میان مدل‌های مورد استفاده جهت

مقایسه، مدل‌های گب، اوسوین و هالسی بهترین نتیجه را نشان

دادند.

تمپل و باکستل (۱۹۹۹) روش دیگری را برای تعیین

رطوبت تعادلی چای در دامنه حرارتی دمای محیط تا ۹۰ درجه

سانتیگراد مورد استفاده قرار دادند. در این روش ابزار سنجش

نقطه شبنم همراه با نمونه مستقر در محفظه آب‌بندی شده که

در یک آون کنترل شده از نظر حرارت قرار دارد، استفاده گردید.

بلاربی و همکارانش (۱۹۹۹) منحنی‌های همدمای دفع

رطوبت را برای یازده رقم خرما به دست آوردند. آزمایش به روش

وزن‌سنجی استاتیک و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام شد.

دو مدل گب و بت به روش رگرسیون غیرخطی برای برازش

مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش بطریقه استاتیکی نیاز به یک محفظه کاملاً بسته، درزبندی‌شده، عایق‌کاری و کنترل شده از لحاظ شرایط ترمودینامیکی (حرارت و رطوبت نسبی) بود. بهمین دلیل اقدام به ساخت محفظه‌هایی^۳ گردید تا ضمن تثبیت شرایط هوای درون آن، عملیات خشک‌کردن پسته در آنها صورت پذیرد.

چون تعیین رطوبت تعادلی و ایزوترم‌های ۳ رقم پسته مورد نظر بود لذا سه محفظه با ابعاد و مشخصات یکسان ساخته شد (شکل ۱). جنس محفظه‌ها از نئوپان به ضخامت ۱۸ میلی‌متر انتخاب گردید. وجوه درونی محفظه با یک لایه فویل آلومینیومی پوشانیده شد. این لایه به عنوان عایق رطوبتی و برای جلوگیری از تبادل رطوبت بین بدنه محفظه و هوای درون محفظه، که بایستی شرایط آن (از جمله رطوبت نسبی آن) تثبیت‌شود، استفاده گردید. درون محفظه یک قفسه مشبک سیمی (توری) با شبکه درشت به ابعاد ۳۰×۱۰۰ سانتی‌متر در ارتفاع ۳۵ سانتیمتری از کف محفظه نصب شد.

این قفسه برای قرار دادن ظروف نمونه، دماسنج‌ها و ترموستات در نظر گرفته شد. جهت تولید حرارت لازم برای انجام فرآیند دفع رطوبت از نمونه‌های پسته از یک مولد حرارت الکتریکی (هیتر) ۱۰۰۰ وات مجهز به پنکه استفاده شد. لازم به ذکر است که مدار پنکه از مدار هیتر جدا بود تا پنکه به‌طور دائم (مستقل از هیتر) کار کند. این پنکه به منظور به هم‌زدن هوای کنترل شده درون محفظه و در نتیجه تسریع در به تعادل رسیدن نمونه‌های پسته به کار گرفته شد. برای کنترل و ثابت نگه داشتن دمای هوای درون محفظه از یک ترموستات (Honeywell 6060 A,B,C) با محدوده کنترل ۵۰-۱۰ درجه سانتیگراد استفاده شد. برای به حداقل رساندن انتقال حرارت و تثبیت بهتر دما در داخل محفظه از دو لایه پشم شیشه در اطراف آن استفاده گردید. دماهای مورد نظر در این آزمایش (۲۵، ۳۷ و ۵۰ درجه سانتیگراد) تثبیت می‌شدند. دمای درون محفظه توسط دماسنج خوانده می‌شد. دماسنج مورد استفاده، یک دماسنج جیوه‌ای با دامنه اندازه‌گیری ۱۰- تا ۱۱۰

منحنی‌های همدمای مورد استفاده قرار گرفتند. هر دو مدل نتایج قابل قبولی نشان دادند.

جانسون و برنان (۲۰۰۰) خصوصیات منحنی همدمای دفع رطوبت را در یک محصول کشاورزی به نام پلاتین^۱ (میوه‌ای شبیه موز اما شیرین‌تر و بزرگ‌تر) مورد بررسی قرار دادند. ایشان ایزوترم ماده را در سه حالت تازه، پیش‌تیمار شده (سرد شده در دمای ۴ درجه سانتیگراد به مدت ۱۶ ساعت) و خشک‌شده به روش انجمادی، در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و به روش وزن‌سنجی استاتیک تعیین نمودند. پس از برازش داده‌های آزمایشی با چندین مدل به این نتیجه رسیدند که مدل‌های گب و هندرسون برای میوه تازه و میوه خشک‌شده به روش انجمادی و مدل ایگل‌سیاس - شریف برای میوه پیش‌تیمار شده بهترین نتایج را نشان داده‌اند.

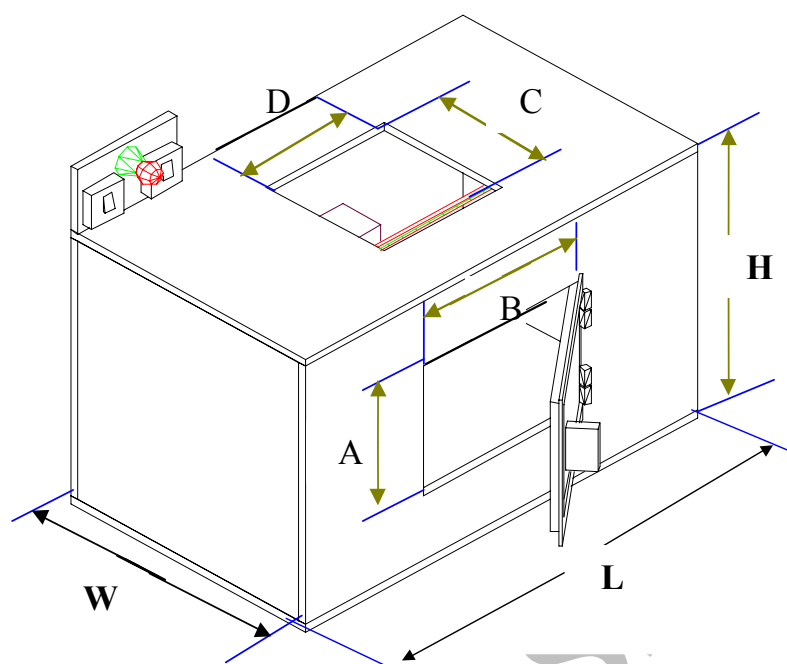
منکوف ۲۰۰۰ الف طی یک آزمایش رطوبت تعادلی بذر نخود را به روش وزن‌سنجی استاتیک در دماهای ۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و در دامنه فعالیت آبی ۰/۱۱ تا ۰/۸۷ تعیین کرد. در این پژوهش ۶ مدل (اصلاح‌شده چانگ- فاست، اصلاح‌شده هالسی، اصلاح‌شده اسوین، اصلاح‌شده هندرسون، گب و یک معادله خطی جدید (FL))^۲ برای بررسی اطلاعات آزمایشی به کار برده شدند و مشخص شد که معادله FL مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی رطوبت تعادلی و توصیف منحنی‌های ایزوترم در مورد نخود می‌باشد.

منکوف ۲۰۰۰ ب رطوبت تعادلی بذرهای عدس را به روش وزن‌سنجی استاتیک در دماهای ۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و در دامنه رطوبت نسبی ۰/۱۱-۰/۸۷ تعیین نمود. وی به این نتیجه رسید که در یک رطوبت نسبی ثابت، با افزایش دما ظرفیت جذب رطوبت بذرها کاهش می‌یابد. وی از ۵ مدل که اثر دما در آنها در نظر گرفته شده بود برای تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشی استفاده نمود. این مدل‌ها عبارت بودند از: معادله اصلاح‌شده چانگ- فاست، اصلاح‌شده هالسی، اصلاح‌شده اسوین، اصلاح‌شده هندرسون و معادله گب. نتیجه این بود که مدل‌های گب و اصلاح‌شده اسوین برای توصیف رابطه EMC/RH مناسب‌تر هستند.

3 . Environmental chamber

1 . Platin (Musa, AAB)

2. Function-linear



شکل ۱- محفظه بکار برده شده برای انجام آزمایشها
A: ۳۰ سانتیمتر، B: ۴۰ سانتیمتر، C: ۳۰ سانتیمتر، D: ۳۰ سانتیمتر، L: ۱۰۰ سانتیمتر، W: ۶۰ سانتیمتر، H: ۶۰ سانتیمتر

شکل ۱- محفظه بکار برده شده برای انجام آزمایشها

مرتبه توزین پیاپی اختلافی در حدود ۰/۰۱ گرم (برابر با دقت ترازوی موجود) باشد. آون مورد استفاده، آون Heraeus T5050 بود و کنترل و تنظیم آن به صورت دستی انجام می‌شد. این آون دارای دماسنج جیوه‌ای با محدوده دمایی ۲۵۰-۴۰ درجه سانتیگراد بود.

نتایج و بحث

با توجه به نقش مهم رطوبت تعادلی و منحنی‌های همدمای فرآیند خشک کردن و انبارمانی پسته، در این تحقیق طی آزمایش‌هایی مقادیر مختلف رطوبت تعادلی سه رقم پسته ایرانی در سه دمای ۲۵، ۳۷ و ۵۰ درجه سانتیگراد در دامنه رطوبت نسبی (فعالیت آبی) ۰/۱۱ تا ۰/۸۵ به دست آمد.

با استفاده از داده‌های بدست آمده منحنی‌های همدمای دفعی در سه دما برای هر رقم ترسیم گردید. برای برازش منحنی‌های مذکور، از پنج مدل ریاضی مهم و رایج برای محصولات کشاورزی استفاده شد و با مقایسه داده‌های آزمایشی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها، مناسب‌ترین مدل برای هر رقم معرفی گردید.

درجه سانتیگراد با دقت ۱ درجه سانتیگراد بود. قبل از شروع آزمایش ترموستات‌ها کالیبره گردیدند و صحت دمای تثبیت شده توسط آن‌ها کنترل شد. جهت کنترل رطوبت نسبی هوای درون محفظه از محلول‌های اشباع نمک استفاده شد. جدول ۱ فهرستی از نمک‌های مورد استفاده را در هر دما نشان می‌دهد. ضمناً این جدول رطوبت نسبی کنترل شده توسط هر نمک و مقدار نمک لازم برای اشباع ۱۰۰ گرم آب مقطر را نشان می‌دهد.

آزمایش به روش وزن‌سنجی به صورت لایه-نازک برای هر سه رقم در چهار تکرار انجام گردید به طوری که یک لایه پسته در ظروف مشبک ریخته شده و هوای کنترل شده با یک پنکه در اطراف نمونه‌ها گردش کند. چون آزمایش به منظور تعیین منحنی ایزوترم دفعی (خشک‌شدن) انجام می‌شد، اولین آزمایش با تثبیت رطوبت نسبی در بالاترین مقدار مورد نظر یعنی در حدود ۸۵ درصد آغاز شد. نمونه‌های درون محفظه به فواصل مساوی و معین (هر ۶ ساعت یک‌بار) توزین می‌شدند. توزین نمونه‌ها به وسیله ترازوی الکترونیکی دیجیتال (Sartorius, 2354) با دقت ۰/۰۱ گرم و ماکزیمم اندازه‌گیری ۱۰۰۰ گرم انجام می‌گرفت. حالت تعادل موقعی در نظر گرفته می‌شد که بین سه

جدول ۱- فهرست نمک‌های مورد استفاده جهت فراهم نمودن فعالیت آبی (رطوبت نسبی) ثابت

درجه حرارت	رطوبت نسبی (به اعشار)	نام نمک	فرمول شیمیایی	وزن لازم برای اشباع ۱۰۰ گرم آب مقطر (بر حسب گرم)
T ₁ ۲۵ درجه سانتیگراد	۰/۱۱	کلرید لیتیوم	LiCl	۱۱۷
	۰/۲۳	استات پتاسیم	KC ₂ H ₃ O ₂	۲۲۲
	۰/۳۶	کلرید کلسیم	CaCl ₂	۱۷۷
	۰/۴۸	نیتريت پتاسیم	KNO ₂	۲۲۲
	۰/۶۳	نیتريت سدیم	NaNO ₂	۱۱۵
	۰/۷۵	کلرید سدیم	NaCl	۴۰
	۰/۸۴	نیترات پتاسیم	KNO ₃	۷۲
T ₂ ۳۷ درجه سانتیگراد	۰/۱۱	کلرید لیتیم	LiCl	۱۱۷
	۰/۲۳	استات پتاسیم	KC ₂ H ₃ O ₂	۲۲۲
	۰/۳۵	کلرید کلسیم	CaCl ₂	۱۷۷
	۰/۴۶	نیتريت پتاسیم	KNO ₂	۲۲۲
	۰/۶۴	نیتريت سدیم	NaNO ₂	۱۱۵
	۰/۷۵	کلرید سدیم	NaCl	۴۰
	۰/۸۵	نیترات پتاسیم	KNO ₃	۷۲
T ₃ ۵۰ درجه سانتیگراد	۰/۱۱	کلرید لیتیم	LiCl	۱۱۷
	۰/۲۳	استات پتاسیم	KC ₂ H ₃ O ₂	۲۲۲
	۰/۳۶	کلرید کلسیم	CaCl ₂	۱۷۷
	۰/۴۹	نیترات منیزیم	MgNO ₃	۲۲۵
	۰/۶۲	نیتريت سدیم	NaNO ₂	۱۱۵
	۰/۷۵	کلرید سدیم	NaCl	۴۰
	۰/۸۵	نیترات پتاسیم	KNO ₃	۷۲

نسبی (فعالیت آبی)، افزایش می‌یابد. این امر به علت اختلاف فشار بخار آب بین ماده و محیط می‌باشد. یعنی هرچه قدر رطوبت نسبی محیط بالا می‌رود. در حقیقت فشار جزئی بخار آب به فشار بخار آب اشباع نزدیک‌تر شده و بین ماده (پسته) و محیط (هوای خشک‌کننده) اختلاف فشار کمتری وجود دارد لذا رطوبت کمتری از دست می‌رود. همین امر در جداول ۳ و ۴ در مورد دو رقم کله‌قوچی و عبداللهی نیز صادق است.

اگر مقادیر رطوبت تعادلی یک ماده در برابر رطوبت نسبی یا فعالیت آبی تعادلی در یک دمای ثابت به صورت نموداری رسم

برای تعیین مقادیر رطوبت تعادلی سه رقم معروف و صادراتی پسته ایرانی (اوحدی، کله‌قوچی و عبداللهی) در شرایط مختلف ترمودینامیکی، آزمایش‌هایی در رطوبت‌های نسبی و دمای ثابت در چهار تکرار برای رسیدن به رطوبت تعادلی انجام پذیرفت و میانگین داده‌های بدست آمده به عنوان رطوبت تعادلی هر رقم محاسبه و در جداول ۲، ۳ و ۴ ارائه شدند.

جدول ۲ بیانگر مقادیر رطوبت تعادلی رقم اوحدی در سه دما می‌باشد. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد در یک دمای ثابت، مقدار رطوبت تعادلی با افزایش مقدار رطوبت

شود، نمودار حاصل منحنی همدمای (ایزوترم) نامیده می‌شود. در صورتیکه رطوبت‌های تعادلی طی فرآیند دفع رطوبت (پروسه خشک شدن) به دست آمده باشند به این نمودار، منحنی همدمای دفعی گفته می‌شود. این منحنی‌ها نقش مهمی در زمینه‌های گوناگون فرآوری و نگهداری مواد کشاورزی دارند. در این تحقیق با استفاده از مقادیر رطوبت تعادلی، منحنی‌های همدمای دفعی برای سه رقم پسته و در سه دما به دست آورده شد. اشکال ۲، ۳ و ۴ بترتیب نمودار همدمای دفعی را در سه دما برای رقم اوحدی، کله قوچی و عبداللهی نمایش می‌دهد. همان‌طور که در نمودارها مشخص است منحنی‌ها از نوع S شکل می‌باشند. این از خواص مهم مواد نمگیر از جمله محصولات کشاورزی و مواد غذایی می‌باشد.

با توجه به نمودارها می‌توان دریافت که در یک دمای ثابت، با افزایش رطوبت نسبی هوا مقدار رطوبت تعادلی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش در رطوبت‌های نسبی بالاتر شدیدتر است. همچنین بر اساس وضعیت منحنی‌ها در دماهای مختلف، واضح است که در یک رطوبت نسبی مشخص، با افزایش دما رطوبت تعادلی پسته کاهش می‌یابد. به طوری که رطوبت تعادلی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بیشترین مقدار را نشان می‌دهد و در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد مقادیر رطوبت تعادلی کمتر هستند. با بالا رفتن درجه حرارت، میزان فعالیت آبی نیز افزایش می‌یابد یعنی آب آزاد درون بافت بالا می‌رود. بنابراین ماده غذایی راحت‌تر رطوبت از دست می‌دهد و در رطوبت پایین‌تری به تعادل می‌رسد.

جدول ۲- مقادیر رطوبت تعادلی به دست آمده برای رقم اوحدی

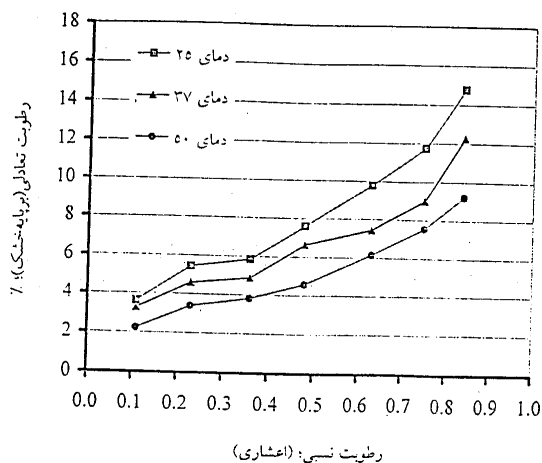
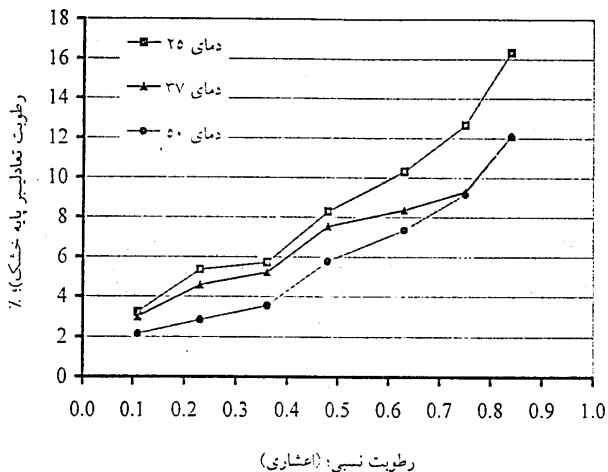
۰/۸۴	۰/۷۵	۰/۶۳	۰/۴۸	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۱۱	رطوبت نسبی،	دمای ۲۵ سانتیگراد
۱۴/۷۷	۱۱/۷۴	۹/۷۹	۷/۶۰	۵/۸۵	۵/۴۴	۳/۶۳	رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	
۰/۴۸	۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۱۲	۰/۲۸	۰/۱۶	۰/۲۳	انحراف معیار	
۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۶۴	۰/۴۶	۰/۳۵	۰/۲۳	۰/۱۱	رطوبت نسبی،	دمای ۳۷ سانتیگراد
۱۲/۲۷	۸/۹۹	۷/۴۴	۶/۶۵	۴/۸۸	۴/۵۸	۳/۲۷	رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	
۰/۴۰	۰/۳۲	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۱۴	۰/۰۴	انحراف معیار	
۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۶۲	۰/۴۹	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۱۱	رطوبت نسبی،	دمای ۵۰ سانتیگراد
۹/۲۷	۷/۶۰	۶/۱۵	۴/۶۲	۳/۸۷	۳/۴۶	۲/۲۵	رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	
۰/۴۸	۰/۴۵	۰/۶۰	۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۵۳	۰/۳۴	انحراف معیار	

جدول ۳- مقادیر رطوبت تعادلی به دست آمده برای رقم کله قوچی

۰/۸۴	۰/۷۵	۰/۶۳	۰/۴۸	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۱۱	رطوبت نسبی،	دمای ۲۵ سانتیگراد
۱۶/۳۵	۱۲/۶۷	۱۰/۳۱	۸/۲۹	۵/۷۲	۵/۳۶	۳/۲۳	رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	
۰/۳۴	۰/۹۰	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۳۵	انحراف معیار	
۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۶۴	۰/۴۶	۰/۳۵	۰/۲۳	۰/۱۱	رطوبت نسبی،	دمای ۳۷ سانتیگراد
۱۲/۱۱	۹/۳۰	۸/۳۶	۷/۵۴	۵/۲۳	۴/۵۸	۳/۰۰	رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	
۰/۶۵	۰/۱۵	۰/۶۱	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۳۱	۰/۳۶	انحراف معیار	
۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۶۲	۰/۴۹	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۱۱	رطوبت نسبی،	دمای ۵۰ سانتیگراد
۱۲/۰۹	۹/۱۸	۷/۳۵	۵/۷۸	۳/۵۵	۲/۸۵	۲/۱۶	رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	
۰/۴۷	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۴۵	۰/۳۰	انحراف معیار	

جدول ۴- مقادیر رطوبت تعادلی به دست آمده برای رقم عبداللهی

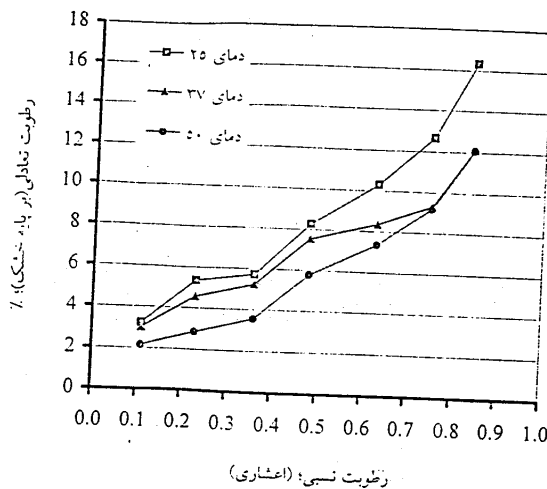
دمای ۲۵ درجه سانتیگراد	رطوبت نسبی،	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۳۶	۰/۴۸	۰/۶۳	۰/۷۵	۰/۸۴
رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	۳/۲۱	۴/۶۴	۵/۸۱	۷/۳۳	۹/۲۸	۱۰/۸۳	۱۳/۲۳	
انحراف معیار	۰/۱۶	۰/۴۸	۰/۲۷	۰/۱۰	۰/۲۶	۰/۴۰	۰/۱۴	
دمای ۳۷ درجه سانتیگراد	رطوبت نسبی،	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۳۵	۰/۴۶	۰/۶۴	۰/۷۵	۰/۸۵
رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	۳/۱۷	۴/۴۶	۴/۸۹	۶/۹۵	۷/۷۲	۹/۷۲	۱۰/۹۹	
انحراف معیار	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۳۷	۰/۳۰	۰/۱۶	
دمای ۵۰ درجه سانتیگراد	رطوبت نسبی،	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۳۶	۰/۴۹	۰/۶۲	۰/۷۵	۰/۸۵
رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	۲/۲۰	۲/۸۴	۳/۱۰	۴/۷۵	۶/۳۵	۷/۰۲	۹/۹۶	
انحراف معیار	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۴۸	۰/۴۱	



شکل ۴- نمودار همدمای دفعی (بدون برازش) مربوط به رقم عبداللهی

شکل ۲- نمودار همدمای دفعی (بدون برازش) مربوط به رقم اوحدی

مدل‌های تجربی و تئوری متعددی برای برازش مقادیر آزمایشی رطوبت تعادلی مواد ارائه شده است که در بخش قبل برخی از این مدل‌ها مورد بحث قرار گرفتند. در این پژوهش مدل‌های اسمیت، اسوین، چانگ-فاست، هالسی و هندرسون برای برازش داده‌های آزمایشی به کار گرفته شدند. این مدل‌های ریاضی در بیشتر تحقیقات که بر روی محصولات کشاورزی و مواد غذایی انجام پذیرفته مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بوکونت و همکارانش ۱۹۷۸ در تحقیقاتی بر روی مواد غذایی، این مدل‌ها را که بصورت توابع نمائی بین رطوبت تعادلی مواد و رطوبت نسبی محیط بیان میشوند بکار برده‌اند. در این معادلات RH؛ رطوبت نسبی محیط (اعشاری) یا فعالیت آبی (a_w) ، M_e رطوبت

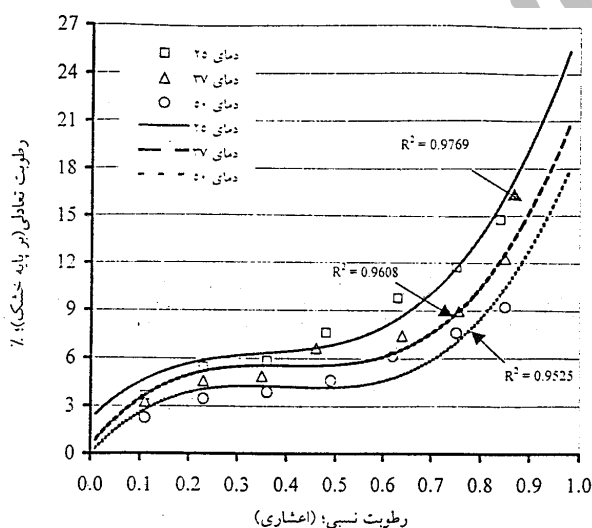


شکل ۳- نمودار همدمای دفعی (بدون برازش) مربوط به رقم کله قوچی

فاکتورهای فوق در تحقیقات گذشته به ویژه در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۱۱، ۱۶، ۱۷، ۱۸).

با تعیین مقادیر MRE و SEM هر مدل، برای هر رقم جدول جداگانه‌ای تشکیل شد تا مدل‌ها با یکدیگر مقایسه گردند. مدلی که کمترین مقدار MRE و SEM را دارد به عنوان مدل مناسب انتخاب می‌گردد.

جدول ۵ مقادیر خطای متوسط نسبی و خطای استاندارد هر مدل را برای رقم اوحدی نشان می‌دهد. با توجه به این جدول مشخص می‌گردد که مدل اسوین دارای کمترین مقدار خطای متوسط نسبی و خطای استاندارد در هر سه دما می‌باشد. لذا از بین مدل‌های مورد بررسی، مدل اسوین برای رقم اوحدی به عنوان مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی رطوبت تعادلی پیشنهاد می‌گردد. پس از مدل اسوین، مدل اسمیت در دو دمای ۲۵ و ۵۰ درجه سانتیگراد دارای کمترین مقدار خطای متوسط نسبی می‌باشد، بنابراین مدل اسمیت به عنوان مدل دوم برای پیش‌بینی رطوبت تعادلی رقم اوحدی معرفی می‌گردد. شکل ۵ نمودار منحنی‌های همدمای دفعی برازش‌شده با مدل اسوین را برای رقم اوحدی نشان می‌دهد.



شکل ۵ - نمودار منحنی‌های همدمای دفعی برازش‌شده با مدل اسوین را برای رقم اوحدی

جدول ۶ مقادیر خطای متوسط نسبی و خطای استاندارد هر مدل را برای رقم کله‌قوچی نشان می‌دهد. با توجه به این جدول معلوم می‌گردد که مدل اسمیت در دو دمای ۲۵ و ۵۰ درجه

تعادلی ماده بر حسب درصد (بر پایه خشک)، A و B ثابت‌های معادلات هستند که به خصوصیات ماده و دمای محیط (دمای آزمایش) بستگی داشته و برای معادلات فوق، مقادیر مختلفی می‌باشند.

مدل اسمیت:

$$1 - RH = \exp[(A - M_e)/B] \quad (7)$$

مدل اسوین:

$$M_e = A \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^B \quad (8)$$

مدل هالسی:

$$RH = \exp[-\exp(A)M_e^{-B}] \quad (9)$$

مدل چانگ-فاست:

$$RH = \exp[-A/\exp(BM_e)] \quad (10)$$

مدل هندرسون:

$$1 - RH = \exp(-AM_e^B) \quad (11)$$

مقادیر رطوبت تعادلی حاصل از آزمایش با مقادیر رطوبت تعادلی تخمین زده شده توسط هر مدل، با فاکتورهای مقایسه متوسط خطای نسبی (MRE)^۱ و خطای استاندارد رطوبت تخمین زده شده (SEM)^۲ مورد مقایسه قرار گرفتند. فاکتورهای مذکور به شکل زیر تعریف می‌شوند (۱۷، ۱۸).

$$SEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{ai} - M_{mi})^2}{df}} \quad (12)$$

$$MRE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{M_{ai} - M_{mi}}{M_{ai}} \right| \quad (13)$$

که در این روابط:

M_{ai} : مقدار رطوبت تعادلی حاصل از آزمایش؛ M_{mi} :

مقدار رطوبت تعادلی پیش‌بینی شده توسط مدل

N: تعداد نقاط برازش (در این جا N=7 برابر با تعداد

رطوبت نسبی مورد آزمایش)؛

df: درجه آزادی (تعداد نقاط برازش منهای تعداد ثابت‌های

هر مدل، در این جا df=7-2=5).

1. Mean Relative Error
2. Standard Error of estimated Moisture

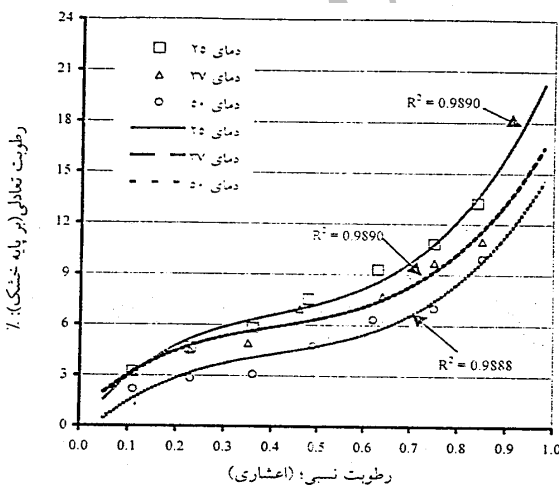
جدول ۵- مقادیر ثابت‌های تخمین‌زده شده برای مدل انتخاب شده (به‌همراه خطای متوسط نسبی و خطای استاندارد) برای رقم اوحدی

مدل اسمیت				مدل اسوین				دما (درجه سانتیگراد)
SEM	MRE	B	A	SEM	MRE	B	A	▼
۰/۳۲۸	۴/۱۶۲	۶/۲۴۵	۳/۳۲۹	۰/۲۹۷	۳/۱۱۴	۰/۳۶۸	۷/۸۹۴	۲۵
۰/۴۸۶	۶/۵۹۹	۴/۶۳۹	۳/۰۵۷	۰/۴۷۹	۵/۳۴۲	۰/۳۲۹	۶/۵۰۵	۳۷
۰/۲۴۰	۴/۹۵۷	۳/۸۴۲	۲/۱۲۱	۰/۲۰۸	۳/۸۳۵	۰/۳۶۹	۴/۹۴۰	۵۰

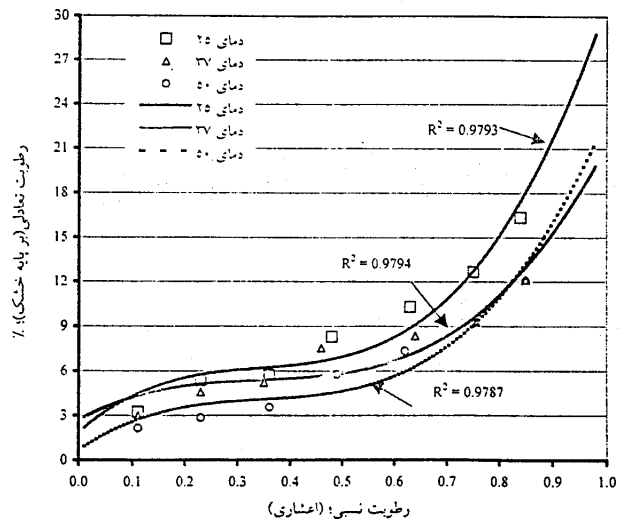
جدول ۶- مقادیر ثابت‌های تخمین‌زده شده برای مدل انتخاب شده (به‌همراه خطای متوسط نسبی و خطای استاندارد) برای رقم کله‌قوچی

مدل اسوین				مدل اسمیت				دما (درجه سانتیگراد)
SEM	MRE	B	A	SEM	MRE	B	A	▼
۰/۳۹۸	۴/۷۲۳	۰/۳۶۲	۰/۰۰۷	۰/۳۶۵	۴/۵۹۱	۷/۳۰۸	۲/۹۰۵	۲۵
۰/۵۵۹	۳/۸۷۷	۰/۳۵۰	۶/۷۵۱	۰/۵۵۴	۵/۲۲۷	۴/۶۶۳	۳/۳۲۹	۳۷
۰/۴۰۷	۷/۱۳۵	۰/۴۷۷	۵/۳۸۴	۰/۳۳۱	۴/۹۸۳	۵/۶۲۸	۱/۴۸۳	۵۰

مذکور مشاهده می‌شود که مدل چانگ-فاست در دو دمای ۲۵ و ۳۷ درجه سانتیگراد دارای کمترین مقدار MRE و SEM می‌باشد و در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد بعد از مدل هندرسون دارای کمترین مقدار MRE و SEM است. بنابراین مدل چانگ-فاست به عنوان مدل پیش‌بینی رطوبت تعادلی رقم عبداللهی پیشنهاد می‌گردد. بعد از مدل چانگ-فاست، مدل هندرسون به عنوان مدل دوم برای رقم عبداللهی معرفی می‌گردد. شکل ۷ نمودار منحنی‌های همدمای دفعی برازش شده با مدل چانگ-فاست را برای رقم عبداللهی نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمودار منحنی‌های همدمای دفعی برازش شده با مدل چانگ-فاست را برای رقم عبداللهی



شکل ۶- نمودار منحنی‌های همدمای دفعی برازش شده با مدل اسمیت را برای رقم کله‌قوچی

سانتیگراد دارای کمترین مقدار MRE و SEM است و در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد نیز بعد از مدل اسوین دارای کمترین مقدار MRE می‌باشد. لذا مدل اسمیت به عنوان مدل مناسب برای پیش‌بینی رطوبت تعادلی رقم کله‌قوچی معرفی می‌گردد. شکل ۶ نمودار منحنی‌های همدمای دفعی برازش شده با مدل اسمیت را برای رقم کله‌قوچی نشان می‌دهد.

جدول ۷ مقادیر خطای متوسط نسبی و خطای استاندارد هر مدل را برای رقم عبداللهی نشان می‌دهد. با توجه به جدول

جدول ۷- مقادیر ثابتهای تخمین زده شده برای مدل انتخاب شده (به همراه خطای متوسط نسبی و خطای استاندارد) برای رقم عبداللی

مدل هندرسون				مدل چانگ - فاست				دما (درجه سانتیگراد)	
SEM	MRE	B	A	SEM	MRE	B	A	▼	
۰/۲۷۷	۲/۳۸۲	۱/۹۵۴	۰/۰۱۲	۰/۱۹۲	۲/۳۱۰	۰/۲۵۴	۴/۸۰۴	۲۵	
۰/۴۰۵	۵/۰۷۰	۲/۲۱۵	۰/۰۰۹	۰/۳۸۴	۴/۳۸۶	۰/۳۲۶	۶/۱۶۳	۳۷	
۰/۲۶۶	۴/۵۷۷	۱/۸۲۷	۰/۰۳۷	۰/۳۴۶	۵/۶۷۰	۰/۳۳۷	۳/۸۱۸	۵۰	

بود مطابقت دارد. بنظر میرسد آنچه سبب متفاوت بودن رطوبت تعادلی در واریته های مختلف میباشد شاید یکسان نبودن مقدار روغن موجود در دانه ها و اندازه مختلف آنها از نظر فیزیکی باشد.

جا دارد آزمایشهای مشابهی در درجه حرارتهای پائین تر از ۲۵ و بالاتر از ۵۰ درجه سانتیگراد نیز انجام شود و منحنی های مشابهی با آنچه در این تحقیق آمده برای این درجه حرارتها رسم گردند تا الگوی تغییرات رطوبت تعادلی با تغییرات درجه حرارت بیشتر محقق گردد. همچنین پیشنهاد میگردد که تمهیداتی برای انجام آزمایشات در رطوبت نسبی کمتر از ۱۱٪ و بیشتر از ۸۵٪ نیز صورت گیرد تا بتوان منحنی ها را با داده هائی در محدوده وسیعتر رسم نمود.

با توجه به آزمایشهای انجام شده و با مقایسه آماری که با آزمون چند دامنه ای دانکن (DMRT)^۱ بر روی مقادیر رطوبت تعادلی انجام شد نتیجه گرفته شد که: اختلاف بین رطوبت تعادلی ارقام در سطح ۰/۰۱ کاملاً معنی دار بود. همچنین نتایج بررسی نشان می دهد که اختلاف بین دماها در سطح ۰/۰۱ کاملاً معنی دار است. همچنین با مراجعه به داده های آزمایشی و تطبیق خوب (R^2 نزدیک به یک) هر سری داده با مدلهای ریاضی پیشنهاد شده، واضح گردید که مدلهای با اطمینان خوبی بیانگر آزمایشها بوده و میتوانند براحتی برای پیش بینی رطوبت تعادلی برای هر واریته و در درجه حرارتهای مورد بحث بکار گرفته شوند. ضمناً شکل کلی منحنی ها سیگمائی بوده و با آنچه در مطالعات قبل برای مواد هیدروسکوپیک ارائه گردیده

1. Duncan Multiple Range Test

REFERENCES

مراجع مورد استفاده

۱. بصیری، ع. ر. و ح. توکلی پور. ۱۳۷۸. پروژه بهینه سازی فرآیند خشک کردن و انبارمانی پسته *Pistacia vera* L. وزارت صنایع، طرح تحقیقات صنعتی، آموزش و اطلاع رسانی. گزارش مرحله دوم، زمستان ۱۳۷۸، ۱۱۳ صفحه.
۲. بی نام. ۱۳۷۷. خشکبار، آمار و مرایا. اداره کل آمار و اطلاعات وزارت کشاورزی تهران. ۲۹۶ صفحه.
۳. پهلوانزاده، ح. ۱۳۷۷. خشک کردن، اصول، کاربرد و طراحی. ترجمه دانشگاه تربیت مدرس. ۴۵۵ صفحه.
۴. شیبانی، ا. ح. فریور مهین. و ع. وطن پور ازغندی. ۱۳۷۴. پسته و تولید آن در ایران. نشریه موسسه تحقیقات پسته. ۶۱ صفحه.
۵. گزارش وزارت جهاد کشاورزی ۱۳۸۰ منتشر نشده
۶. میردامادبها، ف. و س. خراسانی. ۱۳۷۵. تعیین اثرات درصد رطوبت اولیه دمای انبار و زمان نگهداری بر کیفیت و عمر انباری پسته. گزارش پژوهشی موسسه تحقیقات پسته. صفحات ۱۹۹ - ۱۹۶.
7. Ayranci, E., G. Ayranci, & Z. Dogantan. 1990. Moisture sorption isotherms of dried apricot fig and raisin at 20 °C and 36 °C. Journal of Food Science 55(6): 1591-1593, 1625.
8. Belarbi, A., Ch. Aymard, J. M. Moet, A. Themelin, & M. Reynes. 1999. Water desorption isotherms for eleven varieties of dates. Journal of Food Engineering 43:103-107.
9. Boquet, R. J. Chirife, & H. A. Iglesias 1978. Equation for fitting water sorption isotherms of foods: Part 2- Evaluation of various two-parameter models. Journal of Food Technology 13:319-327.

10. Brooker, D., F. W. Bakker- Arkema, & C.W. Hall. 1992. Drying and storage grains and oilseeds. AVI Book by Van Nostrand Reinhold, New York.
11. Chen, C. C. & R. Vane Morey. 1989. Comparison of four EMC/ERH equation. Transactions of ASAE 32(3): 983-990.
12. Chen, C. 1988. A study of equilibrium relative humidity for yellow - dent corn kernels Ph.D. Diss. University of Minnesota. St. Paul, Minnesota.
13. Henderson, S. M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. Agricultural Engineering 2:29 - 32.
14. Johnson, P. T. N. & J. G. Brennan. 2000. Moisture sorption isotherm characteristics of plantain (musa, AAB) . Journal of Food Engineering 44:79- 84.
15. Maskan, M. & F. Gogus. 1997 . The fitting of various models to water sorption isotherms of pistachio nut paste. Journal of Food Engineering 33:227-237.
16. McLaughlin C. P. & T. R. A. Magee. 1998.The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. Journal of Food Engineering 35: 267-280.
17. Menkov, N. D. 2000a. Moisture sorption isotherms of chickpea seeds at several temperatures. Journal of Food engineering 45: 189-194.
18. Menkov, N. D. 2000b. Moisture sorption isotherms of lentil seeds at several temperatures. Journal of Food engineering 44: 205-211.
19. Mohsenin, Nuri . N. 1996. Physical properties of plant and animal materials Grodon and Breach publishers.
20. Sheibani, A. 1990. Distribution, use and conservation of pistachio in Iran 4:51- 56.
21. Sukru K. & F. M. Battalbey. 1991. Determination of moisture diffusivity of pistachio nut meat during drying . University of Gaziantep Food Engineering Department, Gaziantep (turkey). Lebensm- Wiss. U- Technol- 24(6): 484-487.
22. Temple, S. J. & A. J. B. van Boxtel. 1999. Equilibrium moisture content of tea. Journal of Agricultural Engineering Researches 74: 83-89.
23. Tsami, E., D. Marinos- Kouris, & Z. B. Maroulis. 1990. Water sorption isotherms of raisins, currants, figs, prunes and apricots. Journal of Food Science 55(6): 1594-1597, 1625.
24. Zomorodian, A. A. 1979. Thin- and - thick- layer drying characteristics for Iranian rough rice varieties. M. S. Thesis. Shiraz University, Shiraz, Iran.

Determining Equilibrium Moisture Content Isotherms for Pistachio and Proposing Appropriate Mathematical Models for Predicting the EMC in Three Iranian Pistachio Cultivars

A. ZOMORODIAN¹ AND R.TAVAKKOLI²
1, 2, Assitant Professor and Former Graduate Student,
Faculty of Agriculture, University of Shiraz
Accepted, Oct. 1, 2003

SUMMARY

Pistachio nut is one of the most important agricultural exporting commodities in Iran that is recognized as the best in the world in terms of taste and flavour. It is important to improve pistachio processing, drying, storing and packaging, to further win the trust of foreign consumers. Drying of pistachio is the most important stage in its processing chain. The equilibrium moisture content (EMC), that is defined as the moisture content of a hygroscopic material in equilibrium with a particular environmental condition (temperature and relative humidity), is a vital parameter in studying the drying process. In the present study the equilibrium moisture contents were determined for three important cultivars of Iranian pistachio (Ohadi, Kalleghoochi and Abdollahi) using gravimetric method at 25, 37 and 50°C over a range of relative humidities from 0.11 to 0.85 at four replications. Experiments were conducted using the thin-layer drying method in the controlled and sealed environmental chambers designed and fabricated for this purpose. Thermodynamical conditions inside the chambers were kept constant. The temperature was thermostatically controlled and relative humidity of the air surrounding the samples was regulated using the saturated salt solutions. Desorption isotherms for these three cultivars were determined. The EMC data were plotted against relative humidities (RH) at a constant temperature for all cultivars. The curves were S-shaped generally rising sharply at high relative humidities. Five mathematical models (Chung-Pfost, Halsey, Henderson, Oswin and Smith) were applied in analysing the experimental data. The results indicated the analysis showed that Oswin, Smith and Chung- Pfost models were most suitable for describing and predicting the EMC vs RH relationship for Ohadi, Kalleghoochi and Abdollahi, cultivars respectively. The results also indicated that the EMC in all cultivars, decreased with an increase in temperature at constant relative humidity. Cultivar as well as temperature had significant effects on the values of EMC.

Key words: Isotherm equilibrium curves for pistachio, Equilibrium moisture content, Mathematical model