

بررسی خشک کردن پسته به طریقه لایه های نازک برای دستیابی به منحنی های همدمای تعادلی و تعیین مدل ریاضی مناسب برای پیش بینی رطوبت تعادل برای سه رقم پسته ایرانی

علی زمردیان^۱ - رجبعلی توکلی^۲

چکیده

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 فرآوری پسته می باشد . رطوبت تعادلی (EMC) 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 میشود (اوحدی ، کله قوچی و عبدالهی) با استفاده از روش وزن سنجی در ماههای 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 با گرمکن برقی به وسیله ترموستات کنترل شد و رطوبت نسبی هوای اطراف نمونه ها با استفاده از محلول های نمکهای 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) در هر سه دما برای هر رقم ، منحنی های سیگمائییدی (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) 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.

۱- استادیار بخش مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه شیراز
۲- دانشجوی فوق لیسانس

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

مقدمه

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 زیر کشت پسته در جهان را تشکیل می‌دهد (۵). بر اساس آخرین گزارش سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی^۱ 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 فرآیندهای پس از برداشت انبارداری و حمل و نقل نقش قابل توجهی در جلب بازارهای داخلی و خارجی خواهد داشت.

مهمترین منطقه پسته کاری 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 پسته کاری روند روبه افزایشی 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، کله قوچی، اکبری، احمدآقایی و عبدالهی.

یکی از فرایندهای پس از برداشت عملیات خشک کردن می‌باشد. در حال حاضر نیمی از تولیدکنندگان این فرایند 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

^۱ - F.A.O

و رطوبت نسبی هوای داخل خشک‌کن است رسید. یعنی با اضافه نمودن زمان خشک‌کردن 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 میکروارگانیسم‌ها 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 تعادلی خوانده می‌شود (۱۰). این عامل تعیین‌کننده 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 خشک‌کردن 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 امکان‌پذیر است (۳ و 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. به‌عنوان 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 (به‌عنوان متغیر مستقل) و مقادیر رطوبت تعادلی ماده (به‌عنوان متغیر وابسته) در دمای ثابت حاصل می‌شود، منحنی همدمای یا ایزوترم خوانده می‌شود. منحنی همدمای برای مواد بیولوژیک به‌صورت شکل^۱ است که این خاصیت جزء خواص مواد بیولوژیکی (مواد اسفنجی، نمگیر^۲) 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 و ۱۹)

چن و وین موری ۱۹۸۹ (۱۱) در یک بررسی گسترده چهار معادله بیانگر روابط مقدار رطوبت تعادلی و رطوبت نسبی تعادلی محیط (EMC/ERH)^۳ 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 و ۶):

الف- معادله هندرسون:

^۱ S-shape or sigmoid type

^۲ Hygroscopic material

^۳ Equilibrium Moisture Content/Equilibrium Relative Humidity

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

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 (۱۲) 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:

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

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

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

A, B, C, K, N و 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 وارسته‌های ذرت و گندم و... می‌باشد (۱۱).

تسامی و همکارانش ۱۹۹۰ (۲۳) 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 خشک‌شده می‌باشد.

آیرانسی و همکارانش ۱۹۹۰ (۷) 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 باتالی ۱۹۹۱ (۲۱) تحقیقی در مورد میزان انتشار رطوبت در مغزپسته در حال خشک‌شدن بر روی وارپته گزیانتب انجام دادند و مدلی برای مکانیزم خشک‌شدن آن براساس قانون فیک ارائه دادند.

میردامادیه‌ها و خراسانی ۱۳۷۵ (۶) 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 $C^{\circ} 25$ به دست آوردند. مقادیر رطوبت تعادلی به وسیله دسیکاتور در سه رطوبت نسبی محیط (۱۱، ۴۳ و ۹۷ درصد) در دمای مذکور به دست آمده است.

ماسکان و گوگوس ۱۹۹۷ (۱۵) 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.

بصیری و توکلی پور ۱۳۷۸ (۱) با انجام طرح تحقیقاتی بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن 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 (۱۶) 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، اسوین و هالسی بهترین نتیجه را نشان دادند.

تمپل و باکستل ۱۹۹۹ (۲۲) 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 کنترل‌شده از نظر حرارت قرار دارد، استفاده گردید.

بلاربی و همکارانش ۱۹۹۹ (۸) منحنی‌های همدمای دفع رطوبت را برای یازده رقم خرما به‌دست آوردند. آزمایش به‌روش وزن‌سنجی استاتیک و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام شد. دو مدل گب و بت به‌روش رگرسیون غیرخطی برای برازش منحنی‌های همدمای مورد استفاده قرار گرفتند. هر دو مدل نتایج قابل قبولی نشان دادند.

جانسون و برنان ۲۰۰۰ (۱۴) خصوصیات منحنی همدمای دفع رطوبت را در یک محصول کشاورزی به نام پلانین^۱ (میوه‌ای شبیه موز اما شیرین‌تر و بزرگتر) مورد بررسی قرار دادند. ایشان ایزوترم ماده را در سه حالت تازه، پیش‌تیمار شده (سردشده 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 به‌روش انجمادی و مدل ایگل‌سیاس-شریف برای میوه پیش‌تیمار شده بهترین نتایج را نشان داده‌اند.

منکوف ۲۰۰۰ الف (۱۷) طی یک آزمایش رطوبت تعادلی بذر نخود را به‌روش 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 (۱۸) رطوبت تعادلی بذرهای عدس را به روش وزن‌سنجی استاتیک در دماهای ۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و در دامنه رطوبت نسبی ۰/۸۷-۰/۱۱ 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.

^۱Platain (Musa, AAB)

^۲ Function-linear

مواد و روشها

برای انجام آزمایش بطریقه استاتیکی نیاز به یک محفظه کاملاً بسته (۳ عدد برای سه وارپتته پسته) درزبندی شده، عایق کاری و کنترل شده از لحاظ شرایط ترمودینامیکی (حرارت و رطوبت نسبی) بود. بهمین دلیل اقدام به ساخت محفظه آهایی گردید تا ضمن تثبیت شرایط هوای درون آن، عملیات خشک کردن پسته در آنها صورت پذیرد (شکل ۱).

جهت تولید حرارت لازم برای انجام فرآیند دفع رطوبت از نمونه های پسته از یک مولد حرارت الکتریکی (هیتر) ۱۰۰۰ وات مجهز به پنکه استفاده شد. پنکه به منظور به هم زدن هوای کنترل شده درون محفظه و در نتیجه تسریع در به تعادل رسیدن نمونه های پسته به کار گرفته شد. برای کنترل و ثابت نگه داشتن دمای هوای درون محفظه از یک ترموستات (*Honeywell T 6060 A,B,C*) با محدوده کنترل ۵۰-۱۰ درجه سانتیگراد استفاده شد. برای به حد اقل 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 می شدند. جهت کنترل رطوبت نسبی هوای درون محفظه از محلول های اشباع نمک استفاده شد. جدول (۱) فهرستی از نمک های مورد استفاده را در هر دما نشان می دهد

آزمایش به روش وزن سنجی به صورت لایه-نازک برای هر سه رقم در چهار تکرار انجام گردید. چون آزمایش به منظور تعیین منحنی ایزوترم دفعی (خشک شدن) انجام می شد، اولین آزمایش با تثبیت رطوبت نسبی در بالاترین مقدار مورد نظر یعنی در حدود ۸۵ در صد آغاز شد. نمونه های درون محفظه به فواصل مساوی و معین (هر ۶ ساعت یکبار) توزین می شدند. توزین نمونه ها به وسیله ترازوی الکترونیکی دیجیتالی (*Sartorius, 2354*) با دقت ۰/۰۱ گرم و ماکزیمم اندازه گیری ۱۰۰۰ گرم انجام می گرفت. حالت تعادل موقعی در نظر گرفته می شد که بین سه دور 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 می شد.

نتایج و بحث

با توجه به نقش مهم رطوبت تعادلی و منحنی های همدمای در فرآیند خشک کردن و انبارمانی پسته، در این تحقیق طی آزمایش هائی 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 داده های بدست آمده منحنی های همدمای دفعی در سه دما برای هر رقم ترسیم گردید. برای برآزش منحنی های مذکور، از پنج مدل ریاضی مهم و رایج برای محصولات کشاورزی استفاده شد

۲ - Environmental chamber

و با مقایسه داده های آزمایشی و پیش بینی شده توسط مدل ها، مناسب ترین مدل برای هر رقم معرفی گردید.

برای تعیین مقادیر رطوبت تعادلی سه رقم معروف و صادراتی پسته ایرانی (اوحدی، کله قوچی و عبداللهی) در شرایط مختلف ترمودینامیکی، آزمایش هایی در رطوبت های نسبی و دمای ثابت در چهار تکرار برای رسیدن به رطوبت تعادلی انجام پذیرفت و میانگین داده های بدست آمده برای رطوبت تعادلی یک رقم (بعنوان نمونه) محاسبه و در جداول (۲) ارائه شد.

جدول (۲) بیانگر مقادیر رطوبت تعادلی رقم اوحدی در سه دما می باشد. همان طور که این جدول نشان می دهد در یک دمای ثابت، مقدار رطوبت تعادلی با افزایش مقدار رطوبت نسبی (فعالیت آبی)، افزایش می یابد. این امر به علت اختلاف فشار بخار آب بین ماده و محیط می باشد. یعنی هرچه قدر در رطوبت نسبی محیط بالا می رود. در حقیقت فشار جزئی بخار آب به فشار بخار آب اشباع نزدیک تر شده و بین ماده (پسته) و محیط (هوای خشک کننده) اختلاف فشار کمتری وجود دارد لذا رطوبت کمتری از دست می رود.

اگر مقادیر رطوبت تعادلی یک ماده در برابر رطوبت نسبی یا فعالیت آبی تعادلی در یک دمای ثابت به صورت نموداری رسم شود، نمودار حاصل منحنی همدمای (ایزوترم) نامیده می شود. در صورتیکه رطوبت های تعادلی طی فرآیند دفع رطوبت (پروسه خشک شدن) به دست آمده باشند به این نمودار، منحنی همدمای دفعی گفته می شود. این منحنی ها نقش مهمی در زمینه های گوناگون فرآوری و نگهداری مواد کشاورزی دارند.

در این تحقیق با استفاده از مقادیر رطوبت تعادلی، منحنی های همدمای دفعی برای سه رقم پسته و در سه دما به دست آورده شد. شکل ۲ نمودار همدمای دفعی را در سه دما برای رقم اوحدی (برای نمونه) نمایش می دهد. همان طور که در نمودار مشخص است منحنی ها از نوع گشکل می باشند. این از خواص مهم مواد نمگیر از جمله محصولات کشاورزی و مواد غذایی می باشد.

با توجه به نمودار می توان دریافت که در یک دمای ثابت، با افزایش رطوبت نسبی هوا مقدار رطوبت تعادلی نیز افزایش می یابد. این افزایش در رطوبت های نسبی بالاتر شدیدتر است. همچنین بر اساس وضعیت منحنی در دماهای مختلف، واضح است که در یک رطوبت نسبی مشخص، با افزایش دما رطوبت تعادلی پسته کاهش می یابد. به طوری که رطوبت تعادلی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بیشترین مقدار را نشان می دهد و در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد مقادیر رطوبت تعادلی کمتر هستند. با بالا رفتن درجه حرارت، میزان فعالیت آبی نیز افزایش می یابد یعنی آب آزاد درون بافت بالا می رود. بنابراین ماده غذایی راحت تر رطوبت از دست می دهد و در رطوبت پایین تری به تعادل می رسد.

مدل های تجربی و تئوری متعددی برای برازش مقادیر آزمایشی رطوبت تعادلی مواد ارائه شده است که در بخش قبل برخی از این مدل ها مورد بحث قرار گرفتند. در این پژوهش مدل های اسمیت، اسوین، چانگ-فاست، هالسی و هندرسون برای برازش داده های آزمایشی به کار گرفته شدند

. این مدل های ریاضی در بیشتر تحقیقات که بر روی محصولات کشاورزی و مواد

غذایی انجام پذیرفته مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بوکونت و همکارانش ۱۹۷۸ (۹) 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 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.

(۷) مدل اسمیت :

$$1 - RH = \exp\left[\frac{A - M_e}{B}\right]$$

(۸) مدل اسوین:

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

(۹) مدل هالسی:

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

(۱۰) مدل چانگ - فاست:

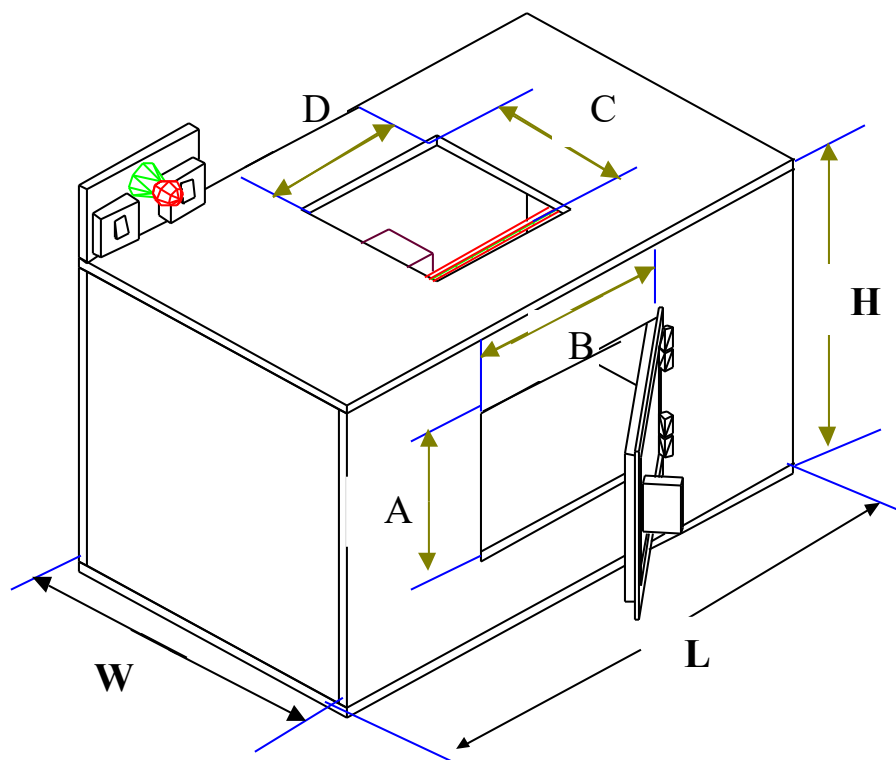
$$RH = \exp\left[-A/\exp(BM_e)\right]$$

(۱۱) مدل هندرسون:

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

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

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 و ۱۸).

^۱ Mean Relative Error

^۲ Standard Error of estimated Moisture

$$SEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{ai} - M_{mi})^2}{df}} \quad MRE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{M_{ai} - M_{mi}}{M_{ai}} \right| \quad (12)$$

(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 $df = 7 - 2 = 5$).

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

درجهٔ حرارت	رطوبت نسبی (به اعشار)	نام نمک	فرمول شیمیایی	وزن لازم برای اشباع ۱۰۰ گرم آب مقطر (بر حسب گرم) □
T_1 ۲۵°C	۰/۱۱	کلرید لیتیم □	$LiCl$	۱۱۷
	۰/۲۳	استات پتاسیم □	$KC_2H_3O_2$	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
T_2 ۳۷°C	۰/۸۴	نیتريت پتاسیم	KNO_3	۷۲
	۰/۱۱	کلرید لیتیم	$LiCl$	۱۱۷
	۰/۲۳	استات پتاسیم	$KC_2H_3O_2$	۲۲۲
	۰/۳۵	کلرید کلسیم	$CaCl_2$	۱۷۷
	۰/۴۶	نیتريت پتاسیم	KNO_2	۲۲۲
	۰/۶۴	نیتريت سدیم	$NaNO_2$	۱۱۵
T_3	۰/۷۵	کلرید سدیم	$NaCl$	۴۰
	۰/۸۵	نیتريت پتاسیم	KNO_3	۷۲
	۰/۱۱	کلرید لیتیم	$LiCl$	۱۱۷

۲۲۲	$KC_2H_3O_2$	استات پتاسیم	۰/۲۳	۵۰ °C
۱۷۷	$CaCl_2$	کلرید کلسیم	۰/۳۶	
۲۲۵	$MgNO_3$	نیترات منیزیم □	۰/۴۹	
۱۱۵	$NaNO_2$	نیتريت سدیم	۰/۶۲	
۴۰	$NaCl$	کلرید سدیم	۰/۷۵	
۷۲	KNO_3	نیترات پتاسیم	۰/۸۵	

فاکتورهای فوق در تحقیقات گذشته به‌ویژه در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۱۱); ۱۶; ۱۷; ۱۸).

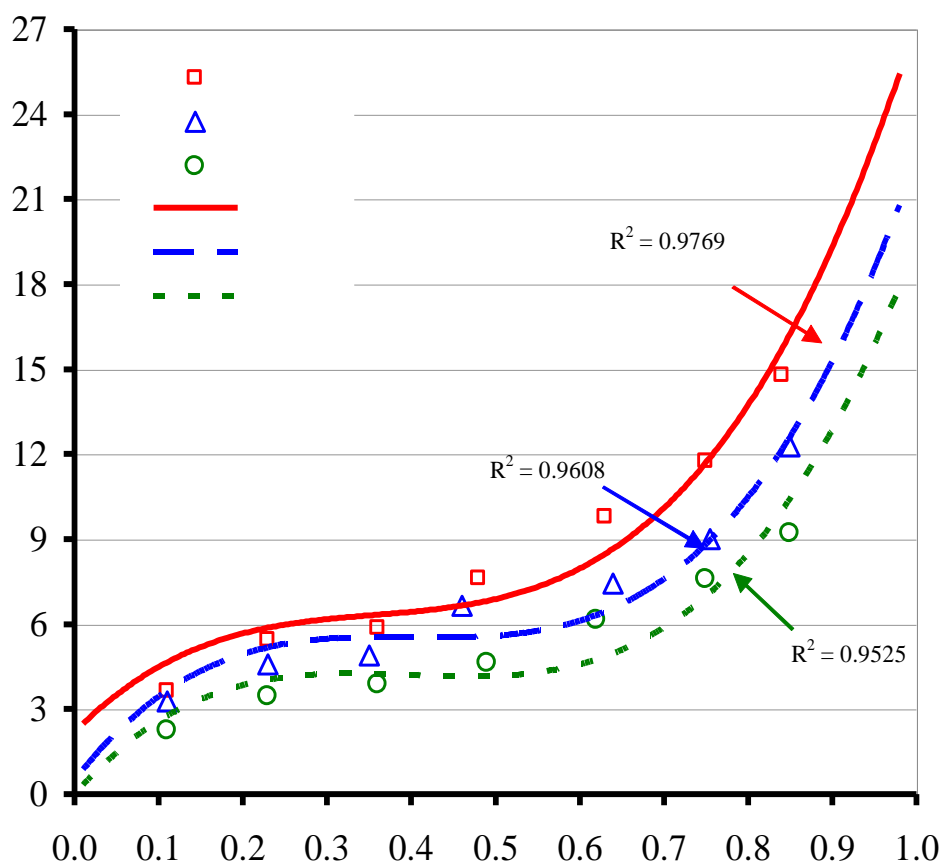
با تعیین مقادیر MRE و SEM هر مدل، برای هر رقم جدول جداگانه‌ای تشکیل شد تا مدل‌ها با یکدیگر مقایسه گردند. مدلی که کمترین مقدار MRE و SEM را دارد به عنوان مدل مناسب انتخاب می‌گردد.

جدول (۲) مقادیر رطوبت تعادلی به‌دست آمده برای رقم اوحدی

رقم اوحدی	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۳۶	۰/۴۸	۰/۶۳	۰/۷۵	۰/۸۴
رطوبت نسبی، رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	۳/۶۳	۵/۴۴	۵/۸۵	۷/۶۰	۹/۷۹	۱۱/۷۴	۱۷۷
انحراف معیار	۰/۲۳	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۳۵	۰/۶۵	۰/۴۸
رطوبت نسبی، رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	۳/۲۷	۴/۵۸	۴/۸۸	۶/۶۵	۷/۴۴	۸/۹۹	۱۲۷
انحراف معیار	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۳۴	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۴۰
رطوبت نسبی، رطوبت تعادلی (بر پایه خشک)	۲/۲۵	۳/۴۶	۳/۸۷	۴/۶۲	۶/۱۵	۷/۶۰	۹/۲۷

دمای ۲۵ درجه سانتیگراد
دمای ۳۷ درجه سانتیگراد
دمای ۵۰ درجه سانتیگراد

جدول ۳ 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 ۳ نمودار منحنی‌های همدمای دفعی برازش‌شده با مدل اسوین را برای رقم اوحدی (بعنوان نمونه) نشان می‌دهد.



جدول (۳) مقادیر ثابت‌های تخمین‌زده شده برای مدل انتخاب شده (به‌همراه خطای متوسط نسبی و خطای

مدل اسمیت				مدل اسوین				دما °C
SEM	MRE	B	A	SEM	MRE	B	A	▼
۰/۳۲۸	۴/۱۶۲	۱/۲۴۵ ۶	۳/۳۲۹	۰/۲۹۷	۳/۱۱۴	۱/۳۶۸ .	۷/۸۹۴	۲۵
۰/۴۸۶	۶/۵۹۹	۱/۶۳۹ ۴	۳/۰۵۷	۰/۴۷۹	۵/۳۴۲	۱/۳۲۹ .	۶/۵۰۵	۳۷
۰/۲۴۰	۴/۹۵۷	۱/۸۴۲ ۳	۲/۱۲۱	۰/۲۰۸	۳/۸۳۵	۱/۳۶۹ .	۴/۹۴۰	۵۰

با توجه به آزمایش‌های انجام شده و با مقایسه آماری که با آزمون چند دامنه‌ای دانکن ($DMRT$)^۱ بر روی مقادیر رطوبت تعادلی انجام شد نتیجه گرفته شد که: اختلاف بین رطوبت تعادلی ارقام در سطح ۰/۰۱ کاملاً معنی‌دار بود. همچنین نتایج بررسی نشان می‌دهد که اختلاف بین دماها در سطح ۰/۰۱ کاملاً معنی‌دار است. همچنین با مراجعه به داده‌های آزمایشی و تطبیق خوب (R^2 نزدیک به یک) هر سری داده با مدل‌های ریاضی پیشنهاد شده، واضح گردید که مدل‌ها با اطمینان خوبی بیانگر آزمایش‌ها بوده و میتوانند براحتی برای پیش بینی رطوبت تعادلی برای هر وارسته و در درجه حرارتهای مورد بحث بکار گرفته شوند. ضمناً شکل کلی منحنی‌ها سیگمائی‌دی بوده و با آنچه در مطالعات قبل برای مواد هیدروسکوپیک ارائه گردیده بود مطابقت دارد. بنظر میرسد آنچه سبب متفاوت بودن رطوبت تعادلی در وارسته‌های مختلف میباشد شاید یکسان نبودن مقدار روغن موجود در دانه‌ها و اندازه مختلف آنها از نظر فیزیکی باشد.

^۱ Duncan Multiple Range Test

Abstract

Thin layer drying of pistachio to determine Equilibrium Moisture Content Isotherms and proposing appropriate mathematical models for predicting the EMC of three Iranian pistachio cultivars

By:

Ali Zomorodian

Rajabali Tavakkoli

Assitant professor, Agricultural Engineering department, Shiraz University and former Msc student

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 win the trust of foreign consumers.

Drying of pistachio is the most important stage of 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 conditions(temperature and relative humidity), is a vital parameter to study the drying process.

In 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. The 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 for analysing the experiment data. The results of 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 of all cultivars, decreased with an increase in

temperature at constant relative humidity. The cultivars and temperature had significant effect on the values of EMC.

فهرست منابع

- ۱- بصیری ، ع. ر. و توکلی پور، ح. 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- میردامادیهها، ف. و س . خراسانی . ۱۳۷۵ . تعیین اثرات درصد رطوبت اولیه دمای انبار وزمان نگهداری بر کیفیت و عمر انباری پسته . گزارش پژوهشی موسسه تحقیقات پسته . صفحات ۱۹۹ - ۱۹۶ .
- 7- Ayranci, E., G. Ayranci and 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 and M. Reynes. 1999. Water desorption isotherms for eleven varieties of dates. *Journal of Food Engineering* 43:103-107.
- 9- Boquet, R. J. Chirife and 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 and C.W. Hall. 1992. Drying and storage grains and oilseeds. *AVI Book by Van Nostrand Reinhold, New York*.
- 11- Chen, C. C. and 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. and J. G. Brennan. 2000. *Moisture sorption isotherm characteristics of plantain (musa, AAB). Journal of Food Engineering* 44:79- 84.
- 15- Maskan, M. and 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. and 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, and 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. and 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 and 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.*