



بررسی پدیده‌ی پسماند و ارزیابی رطوبت تک لایه‌ای جذب دانه کلزا زهره کاوسی^۱ و علی زمردیان^۲

۱، ۲، کارشناس ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، استادیار بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

چکیده

کلزا یکی از دانه‌های روغنی مهم و با ارزش است و به دلیل پتانسیل بالای تولید این محصول در کشور، نیاز به بهینه سازی مراحل تولید و فرآوری آن در کشور می‌باشد. خشک کردن یکی از مراحل مهم فرآوری کلزا می‌باشد و مقدار رطوبت تعادلی (EMC) در بررسی خشک کردن دانه کلزا نقش بسزایی دارد. در این تحقیق مقادیر رطوبت تعادلی رقم لیکورد کلزا با استفاده از روش وزن سنجی در دمای ۵۵ درجه سلسیوس، با دامنه‌ی رطوبت نسبی ۷ تا ۸۴ درصد و در دو مرحله‌ی جذب و دفع رطوبت مورد ارزیابی قرار گرفت. این آزمایش به روش لایه نازک در محفظه- ای کنترل شده و عایق بندی شده انجام پذیرفت به طوری که شرایط ترمودینامیکی هوای داخل محفظه ثابت نگه داشته شد. دما به وسیله‌ی ترموستات و رطوبت نسبی هوای اطراف نمونه با استفاده از محلول‌های نمک اشباع تنظیم گردید. منحنی‌های هم‌دمای به دست آمده جذب و دفع، سیگمائی‌دی بوده و منحنی حالت دفع رطوبت بالاتر از منحنی حالت جذب رطوبت قرار گرفت و پدیده‌ی پسماند به وضوح در این دما مشاهده شد. همچنین از سیزده مدل ریاضی اسوین، اصلاح شده‌ی اسمیت، اصلاح شده‌ی اسوین، اصلاح شده‌ی هندرسون، اصلاح شده‌ی هالسی، اصلاح شده‌ی چانگ فاست، اصلاح شده‌ی بت، چانگ فاست، کوهن، هندرسون، هالسی، گب و کاریه برای برازش داده‌های آزمایشگاهی رطوبت تعادلی در رطوبت نسبی‌های مختلف جهت پیش‌بینی رطوبت تعادلی استفاده شد و بررسی‌ها نشان داد که برای هر دو حالت جذب و دفع رطوبت، مدل گب (GAB) مناسب‌ترین مدل است. مقادیر ضریب تبیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و مربع میانگین خطای (RMSE) مدل گب در حالت جذب رطوبت به ترتیب ۰/۹۹۷، ۰/۰۲۳ و ۰/۱۲۰ و در حالت دفع رطوبت به ترتیب برابر ۰/۹۹۴، ۰/۰۳۱ و ۰/۱۴۰ بود. با استفاده از داده‌های تخمین‌زده شده توسط مدل گب و بکارگیری معادله جذب رطوبت در مواد نمگیر، بت (BET) و رسم نمودار مخصوص معادله فوق، مقدار رطوبت تک لایه‌ای جذب کلزا نیز محاسبه گردید و مقدار آن برای دانه کلزا برابر ۱/۵۵۵ (درصد بر پایه خشک) و ثابت مربوط به معادله بت آن نیز برابر ۱۰/۳۷۱- محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی:

منحنی هم‌دمای کلزا، رطوبت تعادلی، مدل گب، رطوبت تک لایه‌ای، مدل بت

مقدمه

کلزا گیاهی از خانواده چلیپاییان (*Cruciferea*) و جنس کلمیان (*Brassica*) است که در قرن ۱۱۳م در اروپا اهمیت غذایی و سوختی داشت و در قرن ۲۰م روغن آن بعنوان روغن خوراکی با درصد اسید اروسیک پائین (حدود ۱ درصد) مورد توجه قرار گرفت (www. FAO.org). یکی از مهم‌ترین مناطق کشت کلزا در ایران، استان فارس و در استان فارس، شهرستان اقلید می‌باشد که محصول تا بیش از ۸ تن در هکتار در این منطقه به ثبت رسیده است (www. FAO.org). کشت کلزا در چهار ناحیه از اقلیم‌های کشور قابل اجرا است که این مناطق عبارتند از: اقلیم سواحل خزر، اقلیم گرم جنوب کشور، اقلیم سرد معتدل و اقلیم سرد (www. FAO.org). به طور معمول کلزا در طوبت‌های ۱۴-۱۲ درصد (بر پایه خشک) به وسیله ماشین برداشت می‌شود و اولین فرآیند پس از برداشت کلزا به خصوص در مناطق مرطوب، خشک کردن دانه جهت نگهداری و فرآیند می‌باشد. معمولاً رطوبت محصول را تا ۷-۶ درصد (بر پایه خشک) کاهش می‌دهند زیرا در غیر این صورت به دلیل فعالیت تنفسی بالای کلزا بعد از برداشت و گرمای ناشی از تنفس، رشد و فعالیت کپک‌ها و کلوخه شدن دانه‌ها به همراه تولید انواع سم‌های قارچی (مایکوتوکسین‌ها) سبب افزایش اسیدهای چرب آزاد و اسیدیته خواهد شد (www. FAO.org). از جمله عوامل مهم در فرآیند رطوبت دهی یا رطوبت گیری، آگاهی از میزان رطوبت تعادلی^۱ ماده است. این پدیده تحت تأثیر عوامل گوناگونی از قبیل رطوبت نسبی و دمای خشک محیط، جنس، رقم، میزان رسیدگی دانه و مسیر رسیدن به رطوبت تعادلی (جذب یا دفع رطوبت) می‌باشد (Brooker et al., 1992). با به دست آوردن مقادیر رطوبت تعادلی در دماها و رطوبت نسبی‌های مختلف می‌توان منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت^۲ را تعیین نمود و سپس با استفاده از این منحنی‌ها می‌توان در شرایط گوناگون محیطی مقدار رطوبت تعادلی را پیش‌بینی نمود، زمان رسیدن به یک رطوبت مشخص را تعیین کرد و از اتلاف انرژی در خشک‌کن‌ها پیش‌گیری نمود (Zomorodian & Tavakoli, 2004). منحنی هم‌دمای رطوبت تعادلی، بیان نموداری رابطه بین رطوبت ماده و رطوبت نسبی تعادلی (ERH^۳) 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 هم‌دما یا ایزوترم^۴ خوانده می‌شود. منحنی هم‌دما برای مواد بیولوژیکی به‌صورت S شکل^۵ است که این خاصیت جزء خواص مواد بیولوژیکی (مواد اسفنجی^۶ - مواد نم‌گیر)، از جمله محصولات کشاورزی می‌باشد (Brooker et al., 1992).

مسیر جذب رطوبت با مسیر دفع رطوبت در یک منحنی هم‌دما برای یک ماده متفاوت است که این تفاوت در رطوبت‌گیری و رطوبت‌دهی به مواد، تحت شرایط یکسان هوا و به کمک نمودارهای دفع و جذب هم‌دمای رطوبت در مقدار رطوبت تعادلی مشهود است. مقدار رطوبت تعادلی یک محصول بر حسب این که محصول آب جذب کند و یا رطوبت از دست بدهد متفاوت است. تقریباً این اختلاف در تمام محصولات کشاورزی (مواد نم‌گیر) دیده

- 1- Equilibrium moisture content, EMC
- 2 - Moisture sorption-desorption isotherms
- 3 - Equilibrium relative humidity
- 4 - Isotherm curves
- 5- S-shaped or sigmoid-type
- 6 - Hygroscopic materials

می‌شود و به پدیده‌ی پسماند^۱ معروف است (Zomorodian & Tavakoli, 2007). این پدیده هنوز کاملاً قابل درک نیست ولی نظر همگانی بر این است که طی فرآیند جذب یا دفع رطوبت یا هر دو فرآیند، فرآیندهای ترمودینامیکی غیر قابل برگشتی به وقوع می‌پیوندد. یک تئوری که برای توجیه پسماند به کار می‌رود بیان می‌کند که در شرایط مرطوب، منافذی که آب به وسیله‌ی آن‌ها جذب می‌شود کاملاً در دسترس نیستند. طی مرحله‌ی خشک کردن^۲ به علت چروکیدگی یا انقباض^۳، بعضی از منافذ بسته می‌شوند و طی فرآیند جذب بعدی رطوبت^۴ نمی‌توانند رطوبت را به طور کامل جذب کنند (Mohsenin, 1996). تئوری دیگری به نام *Ink bottle* شاید بهترین فرضیه برای توضیح پدیده‌ی پسماند باشد. این تئوری بر این فرض استوار است که مواد نمودار مانند مواد غذایی به صورت یک جسم متخلخل با لوله‌های موئین می‌باشند به طوری که این لوله‌ها شامل یک دهانه‌ی باریک و کوچک و یک قسمت لوله مانند با قطر بزرگ هستند. در حین فرآیند دفع رطوبت از ماده، شعاع کوچک دهانه‌ها با کاهش رطوبت نسبی هوای بالای لوله‌های موئین، خروج آب از لوله‌های موئین را کنترل می‌کنند. در مقابل، طی فرآیند جذب بعدی رطوبت به وسیله ماده، لوله‌های موئین به طور کامل پر نمی‌شوند تا این که رطوبت نسبی به حد متناظر با قسمت با قطر بزرگتر برسد. البته این تئوری فقط در توجیه پدیده‌ی پسماند در مورد غلات موفق بوده است (Brooker et al., 1992).

Zomorodian & Tavakoli (2007) پدیده‌ی پسماند را روی دو رقم ایرانی پسته (اوحدی و کله قوچی) در دمای ۵۰ درجه سلسیوس بررسی نمودند. پدیده‌ی پسماند برای هر دو رقم با کمی تفاوت با یکدیگر مشاهده شد که این تفاوت نیز به دلیل تفاوت اندازه و ترکیبات شیمیایی دو رقم پسته بود. نمودارهای هم‌دمای به دست آمده نیز سیگمائییدی بودند. ایشان برای پیش‌بینی مقدار رطوبت تعادلی، مدل ریاضی هالسی را برای هر دو وارسته در فرآیند جذب و مدل‌های اسوین برای رقم اوحدی و اسمیت برای رقم کله قوچی در فرآیند دفع انتخاب نمودند.

Aviaraa et al. (2005) منحنی‌های هم‌دمای جوانه‌ی سورگوم^۵ را در دمای ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس به دست آوردند. آوردند. برای خشک کردن و انبارداری صحیح این ماده نیاز به داشتن اطلاعات رفتار ماده در دما و رطوبت نسبی‌های متفاوت محیط می‌باشد. پس از انجام آزمایش‌ها، مشاهده شد که منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت S شکل بوده و به دمای محیط وابسته‌اند، هم چنین پدیده‌ی پسماند نیز در نمودارها دیده شد به طوری که با افزایش دما میزان فاصله‌ی^۶ دو نمودار پسماند از هم کاهش یافت، اما روی هم رفته پسماند کل در این ماده با افزایش دما افزایش یافت. پس از مقایسه داده‌ها به وسیله‌ی فاکتورهای میانگین درصد خطای نسبی و خطای استاندارد تخمین^۷ (Es) معادله‌ی اصلاح شده‌ی اسوین به عنوان بهترین مدل جهت پیش‌بینی رفتار این ماده انتخاب شد.

Oyelade et al. (2008) معادله‌های پیش‌بینی رطوبت تعادلی و پدیده‌ی پسماند آرد سیب‌زمینی شیرین^۸ را تحت شرایط واقعی انبارداری مطالعه نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها به این ترتیب بود که نمودارهای هم‌دمای جذب و دفع رطوبت، S شکل و تحت تاثیر دما بود و همچنین معادله‌ی اصلاح شده‌ی اسوین بهترین معادله جهت پیش‌بینی رفتار

1- Hysteresis

2 - Desorption

3 - Shrinkage

4 - Adsorption

5 - Sorghum malt

6 - Span

7 - Standard error of estimate

8 - Yam flour

آرد سیب‌زمینی شیرین به حساب می‌آید. دقت این مدل نیز به وسیله‌ی سه فاکتور مجموع مربع باقی‌مانده^۱، خطای استاندارد تخمین و ضریب تبیین محاسبه شد. پدیده‌ی پسماند در نمودارهای جذب و دفع رطوبت مشاهده شد و میزان پسماند کل با افزایش دما کاهش یافت.

Oyelade et al. (2008) منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت آرد ذرت را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در این تحقیق به جای استفاده از محلول‌های نمک اشباع جهت ایجاد یک رطوبت نسبی ثابت و دلخواه محیط، از محلول‌های اسید استفاده کردند. این آزمایش‌ها در دماهای ۲۷، ۳۲، ۳۷ و ۴۰ درجه سلسیوس انجام گرفتند و منحنی‌های به دست آمده S شکل و وابسته به دما بودند. در این تحقیق از فاکتورهای آماری مجموع مربع باقی‌مانده، خطای استاندارد تخمین و ضریب تبیین برای انتخاب بهترین معادله استفاده شد و معادله‌ی اصلاح شده‌ی گب بهترین مدل برای پیش‌بینی رفتار آرد ذرت شناخته شد. هم‌چنین پدیده‌ی پسماند در رفتار این ماده مشاهده شد و اندازه‌ی پسماند کل با افزایش دما کاهش یافت به این دلیل که مواد هیگروسکوپیک بافتی اسفنج مانند دارند و پس از هر بار جذب و دفع رطوبت عکس‌العمل آن‌ها نسبت به عمل رطوبت‌گیری و رطوبت‌دهی کمتر می‌شود.

Correa et al. (1999) خشک کردن کلزا به روش لایه نازک و قدرت جوانه‌زنی کلزا را مطالعه کردند. ایشان در این تحقیق از واریته‌ی *Hyola 401* استفاده کردند. آزمایش‌ها در ۴ دمای ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و ۴ رطوبت نسبی ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد و در سه تکرار انجام شدند. در هر تکرار از ۷۰۰ گرم کلزا با محتوای رطوبتی ۸ درصد (بر مبنای تر) در خشک‌کن لایه نازک به ضخامت حداکثر ۲ سانتی‌متر استفاده شد. آزمایش‌های اولیه‌ی قدرت نامیه‌ی بذر، بلافاصله پس از خشک کردن انجام شد و ۱۲۰ روز پس از انبار شدن نیز تکرار شدند. پس از بررسی داده‌ها مشخص شد که معادله‌ی اصلاح شده‌ی هندرسون توانایی توضیح تغییرات رطوبت تعادلی ماده تحت شرایط مختلف دمایی و رطوبتی را دارد.

Lahsasni et al. (2002) تحقیقی در رابطه با مدل کردن منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت پوست گلابی^۲ خاردار انجام دادند. معمولاً پوست این میوه که سرشار از فیبر، ویتامین و مواد معدنی است به هدر می‌رود، مگر این‌که آن‌ها را بصورت خشک شده استفاده کرد. طبق آزمایش‌های انجام شده توسط این محققین مدل‌های بت و هندرسون که ثابت‌های آن‌ها توسط رگرسیون خطی به دست آمد، بهترین مدل برای تخمین مقادیر رطوبت تعادلی پوست این میوه می‌باشند. ایشان همچنین مقدار رطوبت تک لایه‌ای این ماده را نیز با کمک معادله بت محاسبه نمودند که این مقدار برای جذب رطوبت در دمای ۳۰ درجه سلسیوس ۶/۶۴ (درصد بر پایه خشک)، در دمای ۴۰ درجه سلسیوس ۶/۲۰ (درصد بر پایه خشک) و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس ۵/۹۲ (درصد بر پایه خشک) بود و به این نتیجه نیز رسیدند که با افزایش دما میزان رطوبت تک لایه‌ای کاهش می‌یابد.

Lee & Lee (2008) که در مورد تأثیر روش خشک کردن بر منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت یک نوع قارچ (*Inonotus obliquus mushroom*) تحقیق نمودند و رطوبت تک لایه‌ای این ماده را به کمک معادله بت به دست آوردند. طبق نتایج ایشان مقدار رطوبت تک لایه‌ای علاوه بر اینکه به دما وابسته است به روش رسیدن ماده به آن رطوبت (خشک شدن) نیز وابسته می‌باشد.

1 - Residual sum of squares, (RSS)

2 - Prickly pear peel

مواد و روش‌ها

برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت تعادلی به طریقه وزن سنجی دینامیکی، هوا و یا ماده مورد نظر و یا هر دو به صورت مکانیکی حرکت می‌کند و در نتیجه سرعت انجام آزمایش افزایش می‌یابد. در این تحقیق از حرکت هوا در محفظه استفاده شد تا سرعت به تعادل رسیدن افزایش یابد اما چون نمونه ثابت بود و هوا نیز فقط داخل خود محفظه می‌چرخید، روش کار ترکیبی از روش استاتیکی و دینامیکی بود. از آن جا که در نظر بود آزمایش در یک محیط کاملاً قابل کنترل (از نظر حرارت و رطوبت) انجام گیرد، نیاز به محفظه‌ای کنترل شده^۱ بود تا ضمن تثبیت شرایط هوای درون آن، عملیات رطوبت‌گیری یا رطوبت‌دهی کلزا صورت پذیرد. یک نمونه از این محفظه‌های کنترل شده از لحاظ شرایط ترمودینامیکی در آزمایشگاه موجود بود (Zomorodian, 2001; Zomorodian & Taakoli, 2004) و با انجام تغییراتی به محفظه‌ی مورد نظر برای آزمایشها تبدیل می‌شد. محفظه ساخته شده از نئوپان به ضخامت ۱۸ میلی‌متر و به طول ۱۰۰، عرض ۶۰ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر بود که این حجم، حداقل فضای لازم برای استقرار تجهیزات مورد نیاز جهت پروسه‌ی جذب و دفع رطوبت و ظروف نمونه است (شکل (۱)). هرچه فضای محفظه کوچک‌تر باشد کنترل شرایط هوای خشک‌کننده آسان‌تر و دقیق‌تر می‌باشد. وجوه درونی محفظه با یک لایه فویل آلومینیومی پوشانیده شد که به عنوان عایق رطوبتی عمل می‌کند و وجوه بیرونی محفظه نیز با سه لایه پشم شیشه پوشانیده شد (حداقل به ضخامت ۵ سانتی‌متر) تا به عنوان عایق حرارتی از هدر رفتن حرارت جلوگیری کند. جهت تغییر دما در محفظه‌ی آزمایش، از یک مولد حرارت الکتریکی (هیتر) ۱۰۰۰ وات مجهز به پنکه استفاده شد. درون محفظه یک قفسه‌ی مشبک سیمی (توری) با شبکه‌ی درشت به ابعاد ۶۰×۳۰ سانتی‌متر در ارتفاع ۴۷ سانتی‌متری از کف محفظه برای قرار دادن دماسنج‌ها و حسگر ترموستات نصب شد که مشبک بودن آن جهت سهولت گردش هوا در اطراف نمونه و ترموستات بود (شکل‌های (۱) و (۲)). یک ترموستات دیجیتالی آتبین مدل سینوس^۲ با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس که شامل دو قسمت جداگانه‌ی بدنه‌ی اصلی و حسگر بود نیز استفاده شد، این ترموستات به طور سری و قبل از هیتر در مدار قرار گرفت تا در دمائی که تنظیم شده است هیتر را از مدار خارج کند و پس از مدتی دوباره هیتر را در مدار قرار دهد. حسگر ترموستات نیز روی قفسه‌ی مشبک سیمی (توری) و معلق در هوا و نزدیک نمونه قرار گرفت و این امر باعث می‌شد که قطع و وصل شدن هیتر به وسیله ترموستات بر اساس تغییرات دمای هوای اطراف نمونه باشد. دمای مورد نظر در این آزمایش ۵۵ درجه سلسیوس (محدوده‌ی دمایی معمول خشک کردن کلزا) بود که به خوبی تثبیت می‌شد. ترموستات نیز قبل از شروع به کار به وسیله‌ی دماسنج جیوه‌ای با محدوده‌ی کار صفر تا ۲۵۰ درجه سلسیوس کالیبره شد. جهت کنترل رطوبت نسبی (RH) هوای درون محفظه از محلول‌های اشباع نمک استفاده شد. جدول (۱) فهرستی از نمک‌های استفاده شده، رطوبت نسبی و مقدار نمک لازم برای اشباع ۱۰۰ گرم آب مقطر را نشان می‌دهد. محلول‌های نمک اشباع در دمای ۵۵ درجه سلسیوس تهیه شدند و برای حل کردن نمک‌ها از آب مقطر استفاده شد، برای هر مرحله نیز ظروف متعدد حاوی نمک اشباع در کف محفظه و زیر سبد حاوی نمونه قرار داده شد (Zomorodian & Tavakoli, 2004) (شکل (۲)).

1 - Environmental chamber

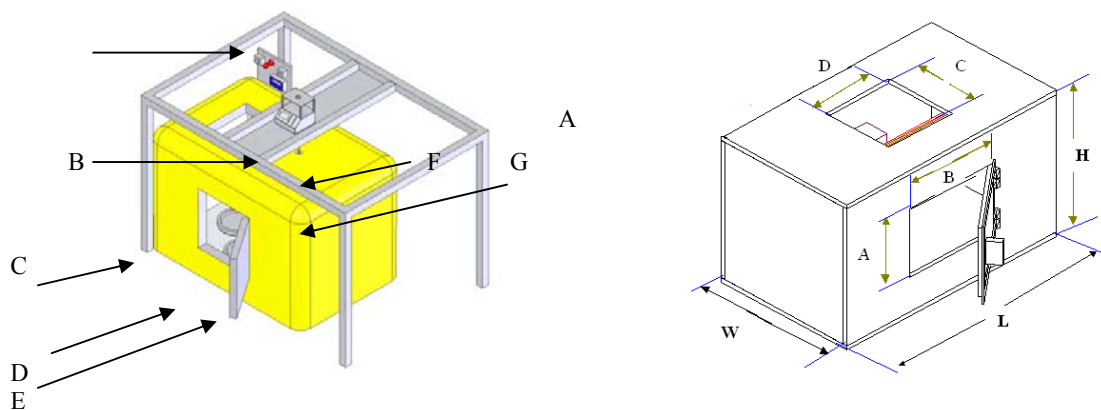
2 - ATBIN sinus

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

درجه حرارت	رطوبت نسبی (درصد)	نام نمک	فرمول شیمیایی	وزن لازم برای اشباع ۱۰۰ گرم آب مقطر (بر حسب گرم)
T (۵۵ °C)	٪۷	هیدروکسید پتاسیم	KOH	۱۲۶
	٪۱۱	کلرید لیتیم	LiCl	۱۱۷
	٪۱۹	استات پتاسیم	KC ₂ H ₃ O ₂	۲۲۲
	٪۲۹	کلرید منیزیم	MgCl ₂	۵۹
	٪۴۵	نترات منیزیم	MgNO ₃	۲۲۵
	٪۵۹	نتریت سدیم	NaNO ₂	۱۱۵
	٪۷۴	کلرید سدیم	NaCl	۴۰
	٪۸۴	نترات پتاسیم	KNO ₃	۷۲

آزمایش به روش وزن سنجی به صورت لایه- نازک انجام گردید به طوری که لایه‌ی کلزا به ضخامت حدود ۱ سانتی- متر در ظرف مشبک ریخته شده و هوای کنترل شده (رطوبت نسبی و دما) با یک فن در اطراف نمونه گردش کند. شرایط هوای داخل محفظه در طی آزمایش دائماً کنترل می‌شد (هر ۷ ساعت یکبار)، دما به وسیله‌ی نمایشگر ترموستات و دماسنج جیوه‌ای و رطوبت نسبی محیط نیز با بازدید محلول‌های اشباع و دمای خشک و تر کنترل می- شد. جهت توزین خودکار نمونه‌ها و جلوگیری از باز و بسته شدن مکرر درب محفظه از خاصیت منحصر بفرد ترازوی مدل GF 300 شرکت A&D^۱ با دقت ۰/۰۰۱ گرم و ظرفیت بارگذاری حداکثر ۳۱۰ گرم استفاده شد. این ترازو قابلیت توزین نمونه‌هایی که از قلاب زیر آن متصل باشند را دارد و به دلیل حساسیت زیاد ترازو به لرزش، ترازو روی سازه‌ای فلزی که از محفظه کاملاً مجزا بود قرار داده شد. این سازه‌ی (میز) آهنی به ابعاد ۲ در ۱ و ارتفاع ۱ متر بود و روی نبشی‌هایی که در وسط میز و به فاصله‌ی ۴۰ سانتی متر جوش داده شدند، تخته سه لا گذاشته شد تا محلی برای استقرار ترازو باشد، و سپس یک سوراخ کوچک و هم راستا با سوراخ ایجاد شده در سقف محفظه در تخته سه لا ایجاد شد تا نخ از قلاب ترازو مستقیماً به داخل محفظه برسد، بدون اینکه هیچ تماسی با دیواره‌ی سوراخ‌ها داشته باشد. با این تدابیر سبد حاوی نمونه‌ی کلزا در حالیکه در فضای داخل محفظه معلق بود (بدون هیچ گونه تماسی با بدنه یا کف محفظه)، مستقیماً به ترازو متصل بود و وزن آن بصورت دائم ثبت می‌شد (شکل (۲)). لازم به ذکر است که ترازو توانایی خواندن و ذخیره کردن داده‌ها را تا سقف ۴۰ داده در فواصل زمانی ۲، ۵، ۱۰، ۳۰ ثانیه و ۱، ۲، ۵، ۱۰ دقیقه، داشت و پس از پر شدن حافظه، داده‌ها فراخوانی و یاد داشت می‌شد و پس از تخلیه‌ی حافظه‌ی ترازو، سیستم دوباره آماده‌ی کار می‌شد. نمونه‌ی داخل محفظه به فواصل مساوی ۱۰ دقیقه یک بار، توزین می‌شد و داده‌ها در حافظه‌ی ترازو ثبت می‌شدند. عمل توزین نمونه تا وقتی که نمونه به تعادل می‌رسید (یعنی اختلاف دو توزین آخر در حدود ۰/۰۰۵ گرم می‌شد)، ادامه پیدا می‌کرد. پس از تثبیت وزن نمونه ۵ گرم کلزا از جاهای مختلف سبد برای محاسبه‌ی محتوای رطوبت برداشته می‌شد و مابقی نمونه سریعاً به داخل محفظه برگردانده می‌شد، همچنین محلول نمک اشباع جدید نیز به جای محلول نمک اشباع قبلی جایگزین می‌گردید. این نمونه‌های ۵ گرمی در ظروف آلومینیومی کوچکی ریخته می‌شد و درون کوره الکتریکی Heraeus T5050 که کنترل و تنظیم آن به

صورت دستی انجام می‌شد و دارای دماسنج جیوه‌ای با محدوده‌ی دمایی ۲۵۰-۴۰ درجه سلسیوس و دقت ۱ درجه سلسیوس است به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار می‌گرفتند. پس از سپری شدن این مدت، نمونه‌ها خارج شده، توزین می‌شدند و درصد رطوبت بر پایه‌ی خشک آنها محاسبه می‌گردید. مرحله‌ی اول این آزمایش با جذب رطوبت شروع شد و سپس عمل دفع رطوبت انجام گرفت. ابتدا اولین رطوبت نسبی استفاده شده که ۷ درصد بود اعمال شد و مقدار آن به تدریج در هر مرحله افزایش یافت تا به ۸۴ درصد رسید و سپس دوباره نمک‌های اشباع قبلی در محفظه قرار گرفت و به تدریج در هر مرحله رطوبت نسبی محیط محفظه کاهش یافت تا به ۷ درصد اولیه رسید و این آزمایش در سه تکرار انجام گرفت.



A: کلیدهای کنترل محفظه؛ B: ترموستات دیجیتال؛ C: میز؛ D: محفظه آزمایش؛ E: ظرف نمک اشباع؛ F: ترازوی دیجیتال ۰/۰۰۱ گرم؛ G: سوراخ سقف محفظه (محل عبور نخ)
 A: ۳۰ سانتی متر، L: ۱۰۰ سانتی متر، B: ۴۰ سانتی متر، W: ۶۰ سانتی متر
 C: ۳۰ سانتی متر، H: ۶۰ سانتی متر، D: ۳۰ سانتی متر
 شکل ۱- ابعاد کلی محفظه‌ی استفاده شده

شکل ۲- طرحواره محفظه و تجهیزات درونی آن

مقدار رطوبت تعادلی را می‌توان با انجام آزمایش‌هایی به دست آورد، همچنین برای محاسبه‌ی رطوبت تعادلی چندین مدل تجربی و تئوری در جدول (۲) پیشنهاد شده‌اند (Ghodake et al., 2006; Jamali et al., 2005; Lee & Lee, 2008; Sinija & Mishra, 2007; Toghrul & Arsalan, 2006). در این مدل‌ها فاکتورهای RH، رطوبت نسبی محیط اطراف ماده (به صورت اعشاری)؛ T، دمای خشک محیط اطراف ماده (°C)؛ Me: رطوبت تعادلی ماده (بر پایه خشک، بر حسب درصد)؛ A, B, C, D: ضرایب ثابت ماده هستند که تابعی از نوع ماده می‌باشند.

جدول ۲- فهرست معادلات مورد استفاده جهت محاسبه رطوبت تعادلی

$Me = \exp(\ln(A) - B \times RH)$	۱- معادله کاریه (Lee & Lee, 2008)
$Me = A + B \ln(-\ln(RH))$	۲- معادله چانگ فاست (Lee & Lee, 2008)
$Me = \frac{ABC(RH)}{(1 - C(RH))(1 - C(RH) + BC(RH))}$	۳- معادله گب (Ghodake et al., 2006; Sinija & Mishra,) (2007)
$Me = \left(-\frac{A}{\ln(RH)} \right)^{\frac{1}{B}}$	۴- معادله هالسی (Lee & Lee, 2008)
$Me = \left(-\frac{\ln(1 - RH)}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$	۵- معادله هندرسون (Toghrol & Arsalan, 2006; Lee &) (Lee, 2008)
$Me = \frac{A}{\ln(RH)} + B$	۶- معادله کوهن (Lee & Lee, 2008)
$Me = \frac{(A + BT)(C)(RH)}{(1 - RH)(1 - RH + C \times RH)}$	۷- معادله اصلاح شده بت (Jamali et al., 2005)
$Me = -\ln \left[-\frac{(T - C)(\ln(RH))}{A} \right] \left(\frac{100}{B} \right)$	۸- معادله اصلاح شده چانگ-فاست (Ghodake et al.,) (2006)
$Me = \left[-\frac{\exp(A + BT)}{\ln(RH)} \right]^{\frac{1}{C}}$	۹- معادله اصلاح شده هالسی (Ghodake et al., 2006;) (Sinija & Mishra, 2007)
$Me = \left[-\frac{\ln(1 - RH)}{A(T + C)} \right]^{\frac{1}{B}}$	۱۰- معادله اصلاح شده هندرسون (Ghodake et al., 2006;) (Sinija & Mishra, 2007)
$Me = (A + BT) \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^C$	۱۱- معادله اصلاح شده اسوین (Ghodake et al., 2006)
$Me = (A + BT) - (C + DT) \ln(1 - RH)$	۱۲- معادله اصلاح شده اسمیت (Ghodake et al., 2006)
$Me = A \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^B$	۱۳- معادله اسوین (Sinija & Mishra, 2007; Toghrol &) (Arsalan, 2006)

اکنون به بررسی فاکتور رطوبت تک‌لایه‌ای می‌پردازیم که مانند رطوبت تعادلی، جهت طراحی بهینه‌ی مراحل خشک کردن، بسته بندی و انبار کردن مواد قابل استفاده است. معادله بت یکی از معادلات جذب رطوبت است که اگر ساده شده‌ی آن بر حسب فعالیت آبی (a_w) نوشته شود معادله زیر به دست می‌آید.

$$\frac{a_w}{m(1-a_w)} = \frac{1}{m_0 c} + \frac{(c-1)a_w}{m_0 c} \quad -۱۴$$

که در آن m محتوای رطوبت پیش‌بینی شده^۱ (درصد بر پایه خشک) در فعالیت آبی (a_w) داده شده می‌باشد و m_0 محتوای رطوبت تک لایه‌ای (درصد بر پایه خشک) می‌باشد و c ثابتی است که به درجه حرارت و دیگر ثابت‌ها وابسته است. اگر با استفاده از رگرسیون یک متغیره مقادیر فعالیت آبی (a_w) در مقابل پارامتر $\frac{a_w}{m(1-a_w)}$ رسم شود نموداری خطی به دست می‌آید که شیب خط برازش یافته آن بیانگر $(m_0 c) / (c-1)$ و عرض از مبدأ آن نیز بیانگر $1/(m_0 c)$ می‌باشد و با داشتن شیب خط و عرض از مبدأ، مقدار رطوبت تک لایه‌ای (m_0) و ثابت c محاسبه می‌شوند. (Mohsenin, 1996).

نتایج و بحث

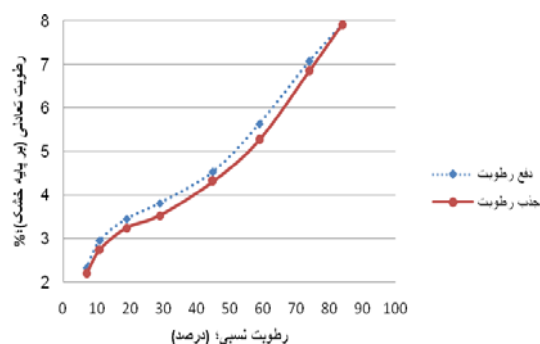
با استفاده از داده‌های به دست آمده منحنی هم‌دمای جذب و دفع رطوبت کلزا در دمای ۵۵ درجه سلسیوس ترسیم شد. برای برازش منحنی‌های مذکور از سیزده مدل ریاضی رایج برای محصولات کشاورزی استفاده گردید و با مقایسه‌ی داده‌های آزمایشی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها، مناسب‌ترین مدل انتخاب گردید. جدول (۳) بیانگر مقادیر رطوبت تعادلی کلزا در دمای ۵۵ درجه سلسیوس در حالت جذب و دفع رطوبت است. با توجه به این جدول در دمای ثابت با افزایش رطوبت نسبی درون محفظه آزمایش مقدار رطوبت تعادلی نیز افزایش می‌یابد. این امر به علت اختلاف فشار بخار بین ماده و محیط می‌باشد. یعنی هرچقدر رطوبت نسبی محیط بالا می‌رود در حقیقت فشار جزئی بخار آب به فشار بخار آب اشباع نزدیک‌تر شده و بین ماده و محیط اختلاف فشار کمتری وجود دارد. همچنین با توجه به جدول (۳) و شکل (۳) پدیده‌ی پسماند کلزا نیز مشخص می‌شود و مقادیر رطوبت تعادلی در مسیر دفع رطوبت بیشتر از مسیر جذب رطوبت می‌باشد و هر دو منحنی جذب و دفع رطوبت نیز S شکل بوده که از خواص محصولات کشاورزی می‌باشد. (Oyelade et al. 2007) که منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت آرد ذرت را به دست آوردند نیز به نتایجی مشابه رسیدند. منحنی‌های به دست آمده آنها نیز S شکل بود و پدیده‌ی پسماند در رفتار این ماده نیز مشاهده شد.

جدول ۳- مقادیر رطوبت تعادلی (برحسب درصد) طی فرآیند جذب و دفع رطوبت برای کلزا در دمای ۵۵ درجه

سلسیوس

۷٪	۱۱٪	۱۹٪	۲۹٪	۴۵٪	۵۹٪	۷۴٪	۸۴٪	رطوبت نسبی	۳ ۲ ۱ ۰
۲/۱۸	۲/۷۴	۳/۲۳	۳/۵۲	۴/۳۱	۵/۲۶	۶/۸۴	۷/۹۲	(درصد)	

۰/۵۴	۰/۳۹	۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۲۴	رطوبت تعادلی	
								انحراف معیار	
٪۸۴	٪۷۴	٪۵۹	٪۴۵	٪۲۹	٪۱۹	٪۱۱	٪۷	رطوبت نسبی	در حالت دفع رطوبت
								(درصد)	
۷/۹۲	۷/۰۷	۵/۶۳	۴/۵۳	۳/۸۱	۳/۴۵	۲/۹۵	۲/۳۲	رطوبت تعادلی	
۰/۵۴	۰/۴۰	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۳۲	انحراف معیار	



شکل ۳- پدیده‌ی پسماند در کلزا در دمای ۵۵ درجه سلسیوس

مدل‌های تجربی و تئوری متعددی برای برازش مقادیر آزمایشی رطوبت تعادلی مواد ارائه شده‌اند. در این پژوهش از سیزده مدل جدول (۲) برای برازش داده‌های آزمایشی استفاده شده است. مقادیر رطوبت تعادلی به دست آمده از آزمایش با مقادیر تخمین زده شده توسط هر مدل که به وسیله Solver نرم افزار اکسل محاسبه شدند، به کمک فاکتورهای مقایسه آماری ضریب تبیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و مربع میانگین خطا (RMSE) مورد مقایسه قرار گرفتند. فاکتورهای مذکور به شکل زیر تعریف می‌شوند (Midilli et al., 2002).

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})(MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre}) \right)^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2} \quad -15$$

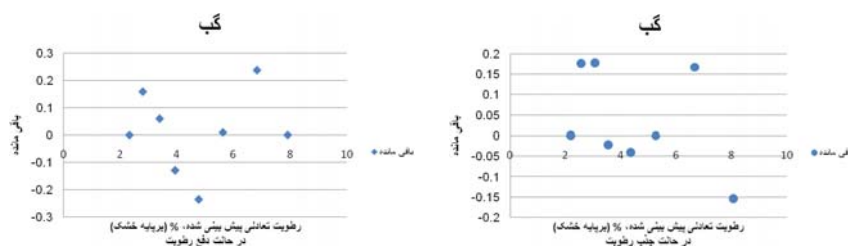
$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad -16$$

- Coefficient of determination
- Chi-square
- Root Mean Square Error

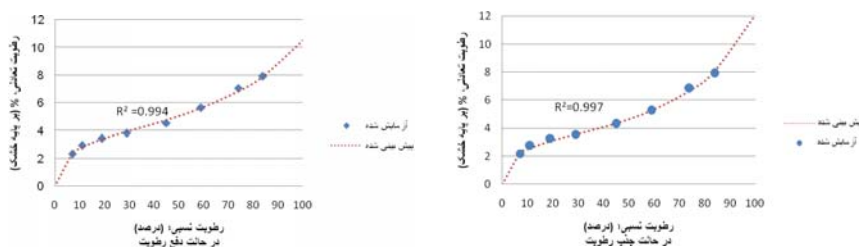
$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad -17$$

که در این روابط: MR_{exp} : مقدار رطوبت تعادلی حاصل از آزمایش؛ MR_{pre} : مقدار رطوبت تعادلی پیش‌بینی شده به وسیله مدل؛ N : تعداد نقاط برازش (در این جا برابر با رطوبت نسبی مورد آزمایش)؛ n : تعداد ثابت‌های هر مدل بود. فاکتورهای فوق در تحقیقات گذشته بویژه در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Oyelade et al., 2008 (a); Oyelade et al., 2008 (b); Sobukola & Dairo, 2007). برای مقایسه‌ی معادلات از یک فاکتور اضافی نیز استفاده شد. این فاکتور در واقع مقایسه‌ی نمودارهای باقی‌مانده‌ی هر مدل با یک‌دیگر است. نمودار باقی‌مانده بین مقادیر رطوبت تعادلی پیش‌بینی شده به وسیله هر مدل و حاصل تفریق رطوبت تعادلی پیش‌بینی شده از رطوبت تعادلی محاسبه شده، رسم می‌شود. مدلی که کمترین مقادیر مربع میانگین خطا (RMSE) و مربع کای (χ^2) و بیشترین مقدار ضریب تبیین (R^2) را داشته باشد و در نمودار باقی‌مانده‌ی آن مقادیر باقی‌مانده به محور افقی نزدیک باشند (نزدیک به صفر) و به صورت تصادفی قرار گرفته باشند، به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب می‌شود (Oyelade et al., 2008 (a); Oyelade et al., 2008 (b); Ghodake et al., 2006; Mohsenin, 1996).

جداول (۴) و (۵) مقادیر ثابت‌ها و فاکتورهای مقایسه‌ی هر مدل را در دمای ۵۵ درجه سلسیوس، در حالت جذب و دفع رطوبت، نشان می‌دهند. با توجه به این جداول و شکل (۴) که نمودارهای باقی‌مانده را نشان می‌دهد برای هر دو حالت جذب و دفع رطوبت، معادله‌ی گب (GAB)^۱ به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید. شکل (۵) نیز نمودارهای برازش شده با معادله گب را برای هر دو حالت جذب و دفع رطوبت نشان می‌دهد.

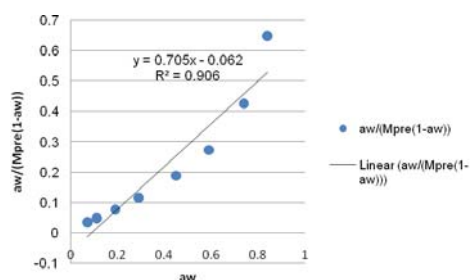


شکل ۴- نمودارهای باقی‌مانده کلزا در دمای ۵۵ درجه سلسیوس برای مدل گب



شکل ۵- نمودار منحنی هم‌دمای جذبی و دفعی برازش شده با مدل گب برای کلزا در دمای ۵۵ درجه سلسیوس

با استفاده از داده‌های به دست آمده از معادله گب در حالت جذب رطوبت، مقدار $\frac{a_w}{m(1-a_w)}$ در مقابل a_w رسم شد (m محتوای رطوبت در فعالیت آبی (a_w) می‌باشد) و یک خط رگرسیون مستقیم به دست آمد (Zomorodian, 2001). شیب خط رگرسیون به دست آمده بیان‌گر $(c-1)/m_0c$ و عرض از مبدأ آن نیز بیان‌گر $1/m_0c$ می‌باشد (شکل (۶)). با داشتن عرض از مبدأ $-0/062$ و شیب خط رگرسیون $0/705$ و حل معادله‌ی دو مجهولی به دست آمده، مقادیر عددی ثابت c برابر $10/371$ و m_0 برابر $1/555$ (درصد بر پایه خشک) به دست آمد (Lahsasni et al., 2002). Lahsasni et al. (2002) رطوبت تک لایه‌ای پوست گلابی خاردار را به کمک معادله بت در دمای 50 درجه سلسیوس برابر $5/92$ (درصد بر پایه خشک) محاسبه نمودند. Lee & Lee (2008) نیز مقدار رطوبت تک لایه‌ای یک نوع قارچ را (برای خشک کردن با هوای داغ) برابر $0/050$ (درصد بر پایه خشک) محاسبه نمودند.



شکل ۶ - نمودار بت در دمای 50 درجه سلسیوس در حالت جذب رطوبت

جدول ۴- جدول داده‌های آماری کلزا در دمای ۵۵ درجه سلسیوس در حالت جذب رطوبت

مدل	A	B	C	D	R ²	χ^2	RMSE
کاریه	۲/۲۹۶	-۱/۴۷۳	...	...	۰/۹۹۳	۰/۰۳۹	۰/۱۷۳
چانگ فاست	۴/۲۰۳	-۲/۰۶۸	...	...	۰/۹۸۹	/۰۵۴	۰/۲۰۱
گب	۳/۰۲۹	۳۸/۶۸۲	۰/۷۵۰	...	۰/۹۹۷	۰/۰۲۳	۰/۱۲۰
هالسی	۱۸/۰۳۵	۲/۱۲۹	...	...	۰/۹۸۴	۰/۱۶۰	۰/۳۴۶
هندرسون	۰/۰۴۹	۱/۷۰۲	...	...	۰/۹۹۰	۰/۵۴۱	۰/۶۳۷
کوهن	-۱/۳۲۸	۲/۴۲۹	...	...	۰/۹۱۵	۰/۸۸۷	۰/۸۱۶
اصلاح شده بت	۱/۹۴۱	۰/۰۰۴	۳۴۶/۳۸۵	...	۰/۹۰۵	۶/۸۶۵	۲/۰۷۱
اصلاح شده چانگ-فاست	۱۲۳۸/۵۲۵	۵۲/۶۵۱	۹۱/۹۰۱	...	۰/۹۸۹	۰/۱۳۳	۰/۲۸۸
اصلاح شده هالسی	۰/۹۴۱	۰/۰۳۸	۲/۲۱۳	...	۰/۹۸۵	۰/۱۱۷	۰/۲۷۰
اصلاح شده هندرسون	-۰/۰۰۰۹	۲/۹۷۴	-۷۹/۹۱۱	...	۰/۹۶۶	۵/۶۲۴	۱/۸۷۵
اصلاح شده اسوین	-۰/۱۴۲	۰/۰۸۸	۰/۲۹۹	...	۰/۹۹۳	۰/۰۵۶	۰/۱۸۷
اصلاح شده اسمیت	۱/۰۴۴	۰/۰۲۴	۱/۰۳۳	۰/۰۴۰	۰/۹۸۸	۰/۰۹۹	۰/۲۲۳
اسوین	۴/۷۲۱	۰/۲۹۹	...	...	۰/۹۹۳	۰/۰۴۶	۰/۱۸۷

جدول ۵- جدول داده‌های آماری کلزا در دمای ۵۵ درجه سلسیوس در حالت دفع رطوبت

مدل	A	B	C	D	R ²	χ^2	RMSE
کاریه	۲/۵۴۱	-۱/۳۵۲	...	...	۰/۹۹۱	۰/۰۴۹	۰/۱۹۲
چانگ فاست	۴/۳۲۶	-۲/۰۵۱	...	...	۰/۹۹۲	۰/۰۳۹	۰/۱۷۲
گب	۳/۵۷۷	۳۳/۱۹۹	۰/۶۶۵	...	۰/۹۹۴	۰/۰۳۱	۰/۱۴۰
هالسی	۱۶/۱۹۲	۱/۹۹۱	...	...	۰/۹۶۷	۰/۶۰۳	۰/۶۷۲
هندرسون	۰/۰۸۷	۱/۳۴۸	...	...	۰/۹۹۲	۱/۹۵۳	۱/۲۱۰
کوهن	-۱/۳۳۱	۲/۶۴۷	...	...	۰/۸۸۶	۱/۱۰۷	۰/۹۱۱
اصلاح شده بت	۲/۰۴۷	۰/۰۰۵	۴۹۲/۱۴۱	...	۰/۸۷۵	۹/۴۰۵	۲/۴۲۴
اصلاح شده چانگ-فاست	۱۲۳۶/۸۱۰	۵۰/۸۳۷	۷۹/۴۴۶	...	۰/۹۹۲	۰/۰۵۲	۰/۱۸۰
اصلاح شده هالسی	۲/۲۴۰	۰/۰۲۴	۲/۵۱۲	...	۰/۹۷۸	۰/۱۲۶	۰/۲۸۱
اصلاح شده هندرسون	-۰/۰۰۰۴	۲/۴۹۰	-۸۴/۴۶۸	...	۰/۹۸۳	۰/۱۱۲	۰/۲۶۵

۰/۱۸۵	۰/۰۵۵	۰/۹۹۲	...	۰/۲۹۵	۰/۱۳۵	-۲/۴۷۵	اصلاح شده اسوین
۰/۳۳۳	۰/۲۲۲	۰/۹۷۸	۰/۰۴۳	۰/۹۸۲	۰/۰۲۹	۰/۹۸۲	اصلاح شده اسمیت
۰/۱۹۴	۰/۰۵۰	۰/۹۹۲	...	...	۰/۲۹۹	۵/۰۲۹	اسوین

- 1- Aviarra, N. A., Ajibolab, O. O., Aregbesolab, O. A. and Adedeji, M. A. (2005). Moisture sorption isotherms of sorghum malt at 40 and 50 °C. *Journal of Stored Products Research*, 42, 290–301.
- 2- Brooker, D., Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C.W. (1992). *Drying and storage grains and oilseeds*. AVI Book by Van Nostrand Reinhold, New York.
- 3- Correa, P. C., Martins, J. H. and Christ, D. (1999). Thin layer Drying Rate and Loss of Viability Modelling for Rapeseed (Canola). *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74, 33-39.
- 4- Ghodake, H. M., Goswami, T. K. and Chakraverty, A. (2006). Moisture sorption isotherms, heat of sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. *Journal of Food Engineering*, 78, 827-835.
- 5- Jamali, A., Kouhila, M., Ait Mohamed, L., Iddimam, A. and Lamharrar, A. (2005). Moisture adsorption-desorption isotherms of Citrus reticulate leaves at three temperatures. *Journal of Food Engineering*, 77, 71-78.
- 6- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. and Kechaou, N. (2002). Experimental study and modeling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 55, 201-207.
- 7- Lee, J. H. and Lee, M. J. (2008). Effect of drying method on the moisture sorption isotherms for *Inonotus obliquus* mushroom. *LWT*, 41, 1478-1484.
- 8- Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. A. (2002). New model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513.
- 9- Mohsenin, Nuri N. (1996). *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach publishers.
- 10- Oyelade, O. J., Tunde-Akintunde, T. Y. and Igbeka, J. C. (2008). Predictive equilibrium moisture content equations for Yam (*Dioscorea rotundata*, Poir) flour and hysteresis phenomena under practical storage conditions. *Journal of Food Engineering*, 87(2), 229-235.
- 11- Oyelade, O. J., Tunde-Akintunde, T. Y., Igbeka, J. C., Oke, M. O. and Raji, O. Y. (2008). Modeling moisture sorption isotherms for maize flour. *Journal of Stored Products Research*, 44(2), 179-185.
- 12- Pixton, S. W. and Howe, R. W. (1983). The suitability of various linear transformations to represent the sigmoid relationship of humidity and moisture content. *Journal of Stored Products Research*, 19, 1-18.
- 13- Sinija, V. R. and Mishra, H. N. (2007). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of instant (soluble) green tea powder and green tea granules. *Journal of Food Engineering*, 86, 494-500.
- 14- Sobukola, O. P. and Dairo, O. U. (2007). Modeling drying kinetics of fever leaves (*Ocimum viride*) in a convective hot air dryer. *Nigerian Food Journal*, 25(1), 146-154.
- 15- Toghrul, H. and Arsalan, N. (2006). Moisture sorption behavior and thermodynamic characteristics of Rice stored in a chamber under controlled humidity. *Journal of Biosystems Engineering*, 95(2), 181-195.
- 16- www. FAO.org.
- 17- Zomorodian, A. A. (2001). Evaluating thin layer characteristics for Iranian rough rice varieties to determine the equilibrium moisture content. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2 (7), 27-40.
- 18- Zomorodian, A. A. and Tavakoli, R. A. (2004). Determining Equilibrium Moisture Content isotherms for Pistachio and proposing appropriate mathematical models for predicting the EMC in three Iranian pistachio cultivars. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 35(2), 379-392. (In Farsi)
- 19- Zomorodian, A. A. and Tavakoli, R. A. (2007). The Adsorption-Desorption Hysteresis Effect on Pistachio Nuts. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 9(4), 259-265.