

تعیین نظری و تجربی رطوبت تعادلی دانه گلرنگ در یک فرآیند جذب رطوبت

علی اصغر زمردیان^۱ و مسعود براتی^{۲*}

چکیده

اهمیت گلرنگ به عنوان دانه روغنی، به دلیل دارا بودن اسید چرب غیراشباع لینولئیک باعث شده به تولید آن در جهان توجه خاصی شود. در این پژوهش با روش وزن‌سنجی، مقادیر رطوبت تعادلی دانه گلرنگ در سه دمای هوای ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس در یک فرایند جذب به دست آورده شد. بدین منظور از یک محفظه کنترل شده از نظر شرایط ترمودینامیکی استفاده شد. پس از تعیین مقادیر رطوبت تعادلی، منحنی‌های جذبی هم‌دما ترسیم شد. در این پژوهش از ۱۴ مدل معروف اسوین، اصلاح شده اسمیت، اصلاح شده اسوین، اصلاح شده هندرسون، اصلاح شده هالسی، اصلاح شده چانگ فاست، اصلاح شده بت، چانگ فاست، کوهن، هندرسون، هالسی، گب، کاریه و پلگ برای برازش داده‌های آزمایشی استفاده و از فاکتورهای آماری ضریب تبیین، مربع کای، مربع میانگین خطا برای مقایسه مدل‌ها استفاده شد. که از میان این مدل‌ها، مدل پلگ برای دمای ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس در حالت جذب و مدل اسوین برای دمای ۶۰ درجه سلسیوس در حالت جذب رطوبت بهترین نتیجه برازش را داشتند. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دما در یک رطوبت نسبی ثابت هوا، مقدار رطوبت تعادلی کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: جذب، گلرنگ، محتوی رطوبت تعادلی، منحنی‌های هم‌دما.

ارجاع: ع. ا. زمردیان و م. براتی. ۱۳۹۲. تعیین نظری و تجربی رطوبت تعادلی دانه گلرنگ در یک فرآیند جذب رطوبت. مجله پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲(۹): ۱۷-۹.

۱- دانشیار، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۲- کارشناسی ارشد، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه شیراز.

* نویسنده مسئول: masoud.barati90@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۰۸

مقدمه

گلرنگ گیاهی از تیره مرکبه بوده و ممکن است به صورت یک ساله یا دو ساله رویش نماید (فروزان، ۱۳۷۸). از جمله عوامل مهم در فرآیند رطوبت‌گیری و رطوبت‌دهی، آگاهی از میزان رطوبت تعادلی 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) قرار می‌گیرد. مقدار رطوبت ماده بعد از آن که آن ماده، مدت زمان نامحدودی را در محیط خاصی (رطوبت نسبی و درجه حرارت خشک هوای محیط) قرار گیرد، محتوای رطوبت تعادلی (EMC^۱) گویند.

این عامل تعیین کننده کم‌ترین یا بیش‌ترین مقدار رطوبتی است که می‌توان یک دانه را تحت شرایط معینی تا آن حد به ترتیب خشک یا تر کرد (بروکر و همکاران، ۱۹۹۲). اهمیت این عامل برای محصولات کشاورزی به دلیل ارتباط مستقیم آن با مسایل انبارداری و دفع یا جذب رطوبت است (هندرسون، ۱۹۵۲). از جمله کاربردهای این عامل، تعیین مقدار گرمای نهان تبخیر محصولات کشاورزی است. همچنین تعیین سرعت خشک شدن و مدت زمان لازم برای خشک شدن یک ماده با آگاهی از مقدار رطوبت تعادلی ممکن است. منحنی همدمای رطوبت تعادلی، بیان نموداری رابطه بین رطوبت ماده و رطوبت نسبی محیط اطراف آن ماده (در یک دمای معین) است.

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 به دست می‌آید، منحنی هم‌دما یا ایزوترم^۲ خوانده می‌شود (قوداکه و همکاران، ۲۰۰۶). منحنی هم‌دما برای مواد بیولوژیکی به صورت S شکل است که این خاصیت جزء خواص مواد بیولوژیکی (مواد اسفنجی- مواد نم‌گیر) از جمله محصولات کشاورزی است (بروکر و همکاران، ۱۹۹۲). در یک رطوبت نسبی معین محیط، با افزایش دمای محیط مقدار EMC کاهش می‌یابد زیرا با افزایش درجه حرارت میزان فعالیت آبی نیز افزایش یافته و در نتیجه میزان آب آزاد درون ماده نیز بیش‌تر شده و ماده راحت‌تر آب از دست می‌دهد و در محتوای رطوبتی کم‌تری با محیط به تعادل می‌رسد (محسنین، ۱۹۸۶؛ قوداکه و همکاران، ۲۰۰۶).

برای تعیین منحنی همدمای رطوبت تعادلی بایستی شرایط ترمودینامیکی هوای محیط اطراف ماده ثابت نگه داشته شود. دمای محیط اطراف آزمایش بیش‌تر با گرم‌کن برقی و ترموستات دقیق کنترل می‌شود و رطوبت نسبی محیط یا فشار بخار هوای اطراف نمونه با کمک محلول نمک‌های اشباع کنترل می‌شود. برای دستیابی به رطوبت‌های نسبی مختلف لازم است که از انواع نمک استفاده شود (قوداکه و همکاران، ۲۰۰۶). از جمله نمک‌های شیمیایی مورد استفاده در آزمایش‌های مختلف می‌توان موارد زیر را نام برد:

کلرید منیزیم (MgCl₂)، کلرید سدیم (NaCl)، کلرید لیتیم (LiCl)، نیتрат پتاسیم (KNO₃)، نیترات منیزیم (Mg(NO₃))، سولفات پتاسیم (K₂SO₄) و سولفات آمونیم ((NH₄)₂SO₄) (زمردیان و کاووسی، ۲۰۱۱).

آلونسو و همکاران (۲۰۰۶) ترمودینامیک جذب رطوبت را در پلیمرهای کربوهیدراتی بررسی و در این مطالعه خواص ترمودینامیکی را از منحنی‌های جذب رطوبت استخراج کردند. مدل گب به عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی رفتار رطوبتی این ماده انتخاب شد. گارسیا و همکارانش (۲۰۰۷) در ارتباط با منحنی‌های همدمای جذب- دفع رطوبت پوست لیمو در دماهای مختلف مطالعه کردند. نمودارهای همدمای جذب- دفع رطوبت در دماهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس به دست آمدند و با مقایسه واریانس و نمودارهای باقیمانده از میان معادلاتی که برای مدل‌کردن رفتار این ماده استفاده شدند، معادله گب بهترین انتخاب بود.

زمردیان (۱۳۸۰) خواص خشک کردن به روش لایه نازک برای تعیین رطوبت تعادلی رقم‌های ایرانی برنج را مطالعه کرد. وی از رقم‌های رشتی، دم سیاه، رشتی سالاری و چمپا در این پژوهش استفاده کرد. آزمایش‌ها در سه دمای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس و در ۶ رطوبت نسبی محیطی مختلف و در سه تکرار انجام شد. یافته‌های این پژوهش و مقایسه داده‌ها با ضریب تبیین نشان داد که منحنی‌های همدمای برنج ایرانی S شکل بوده و دو معادله هندرسون و کاجرو برای پیش‌بینی رطوبت تعادلی آن مناسب هستند. زمردیان و کاووسی (۲۰۱۱) در مورد دستیابی به منحنی‌های همدمای تعادلی و پیشنهاد مدل ریاضی مناسب برای پیش‌بینی رطوبت تعادلی رقم لیکورد کلزا مطالعه کردند. در این پژوهش برای دمای ۲۵، ۴۰

1 -Equilibrium Moisture Contant

2 -Isotherm

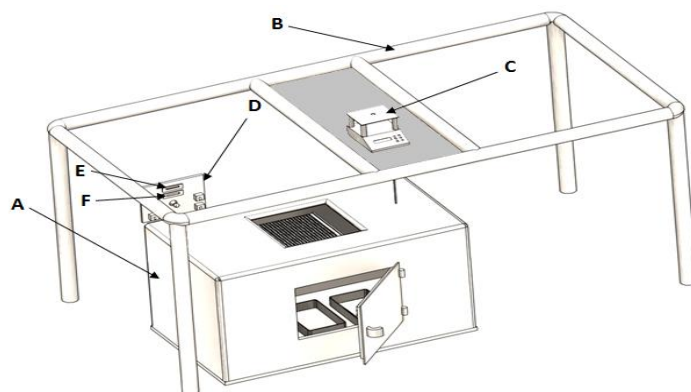
ریاضی برای پیش‌بینی رطوبت تعادلی دانه گلرنگ ارایه می‌شود.

مواد و روش‌ها

در این آزمایش‌ها، برای به دست آوردن منحنی‌های ایزوترم جذبی دانه گلرنگ، به روش آمیزه‌ای از استاتیکی و دینامیکی عمل شد. برای انجام این آزمایش نیاز به یک محیط به طور کامل قابل کنترل (از نظر حرارت و رطوبت نسبی) بود. برای رسیدن به این هدف از یک محفظه به طور کامل بسته، عایق کاری و کنترل شده از لحاظ شرایط ترمودینامیکی استفاده شد. جنس محفظه از نئوپان (چوب فشرده با ضخامت ۱۸ میلی‌متر) است. برای کنترل آسان‌تر و دقیق‌تر شرایط هوای خشک کننده، محفظه تا حد امکان کوچک ساخته شده است (شکل ۱). یک مولد حرارت الکتریکی (گرم‌کن) ۱۰۰۰ وات مجهز به پنکه، ترموستات الکتریکی برای تغییر درجه حرارت هوای درون محفظه، استفاده شده است. از پنکه (دمنده گریز از مرکز ۲۸۰۰ rpm و در نتیجه تسریع در فرآیند تغییر مقدار رطوبت نمونه استفاده شده است.

درجه سلسیوس در حالت جذب رطوبت، مدل هالسی و برای دمای ۵۵ درجه سلسیوس، در هر دو حالت دفع و جذب رطوبت، مدل گب به عنوان بهترین مدل مناسب پیشنهاد شد. با افزایش دما مقدار رطوبت تعادلی کاهش می‌یابد و همچنین دما و رطوبت نسبی محیط نیز بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. کوا و همکاران (۲۰۱۲) ایزوترم‌های جذب آرد مانیوک را با استفاده از روش استاتیکی در دماهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سلسیوس و در محدوده فعالیت آبی ۱۰ تا ۹۰ درصد را مطالعه کردند. مدل گب به عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی رطوبت تعادلی آرد مانیوک، در دماهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سلسیوس پیشنهاد شد.

با توجه به موارد ذکر شده، پژوهش حاضر با اهداف زیر انجام گرفت: تعیین مقدار رطوبت تعادلی جذبی دانه گلرنگ که در شرایط کنترل شده‌ای از لحاظ رطوبت نسبی و دمای محیط در یک فرآیند جذب رطوبتی قرار گرفته تا به رطوبت تعادلی برسد. ترسیم منحنی‌های هم‌دما برای رطوبت تعادلی جذبی دانه گلرنگ. تعیین مدل ریاضی مناسب جهت پیش‌بینی رطوبت تعادلی جذبی دانه گلرنگ. با توجه به مدل‌های ریاضی ارایه شده برای پیش‌بینی رطوبت تعادلی محصولات کشاورزی و مقایسه آن‌ها با داده‌های حاصل از آزمایش، مناسب‌ترین مدل



شکل ۱- نمای شماتیک محفظه و تجهیزات بیرونی

A: محفظه‌ی آزمایش؛ B: میز؛ C: ترازوی دیجیتال؛ D: تابلوی مدار الکتریکی؛ E: نمایشگر رطوبت‌سنج؛ F: نمایشگر ترموستات

درون محفظه، به تجهیزات این محفظه اضافه شد. برای توزین نمونه‌ها از یک ترازوی دیجیتالی مدل GF300 ساخت شرکت A&D ژاپن با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. به دلیل حساسیت زیاد ترازو به لرزش، ترازو روی سازه‌ای فلزی که از محفظه به‌طور کامل جدا است قرار داده شد. این آزمایش به روش وزن‌سنجی به صورت لایه

از یک ترموستات دیجیتالی با دقت $\pm 1\%$ درجه سلسیوس، مدل سام وان (Samwon)، برای کنترل و تثبیت دمای درون محفظه استفاده شده است. یک رطوبت‌سنج دیجیتالی مدل سام وان (محصول کره جنوبی) با دامنه اندازه‌گیری ۰ تا ۱۰۰ درصد رطوبت نسبی و با دقت ۰/۳ $\pm$ رطوبت نسبی، برای اندازه‌گیری سریع رطوبت نسبی

بعد از سپری شدن مدت زمان ۲۴ ساعت و دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس نمونه‌ها خارج و توزین شدند. سپس درصد رطوبت بر پایه‌ی خشک برای هر یک از تکرارها بر اساس معادله زیر مشخص شد. (زمردیان، ۱۳۸۷):

$$M(d.b) = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، W_1 وزن اولیه نمونه (وزن خالص بدون احتساب وزن ظرف آن)، W_2 وزن نمونه بعد از بیرون آوردن از آن (وزن خالص نمونه بدون احتساب وزن ظرف آن) هستند. تمامی مقادیر W_1 ، W_2 و $M(d.b)$ برای همه تکرارها و در هر سه دما در جداولی ثبت شد. پس از اینکه مقادیر رطوبت تعادلی جذبی در دماهای ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و در محدوده رطوبت نسبی ۱۱ تا ۹۱ درصد به دست آمد، منحنی‌های هم‌دمای جذبی گلرنگ در هر سه دما به دست آورده شدند.

نازک در سه دمای ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس در سه تکرار انجام شد. شروع آزمایش در هر سه دما با تثبیت رطوبت نسبی در پایین‌ترین مقدار مورد نظر انجام شد. این رطوبت نسبی با محلول اشباعی از نمک کلرید لیتیم به دست می‌آمد. سبد نمونه متصل به ترازو در طول روز به طور مرتب توزین می‌شد و داده‌ها در جدول‌هایی ثبت می‌شدند. عمل توزین تا وقتی که نمونه به تعادل می‌رسید ادامه پیدا می‌کرد. حالت تعادل موقعی در نظر گرفته می‌شد که اختلاف چند توزین آخر در حدود ۰/۰۰۵ گرم باشد. پس از به تعادل رسیدن نمونه، از سبد حاوی نمونه مقدار ۵ گرم گلرنگ برای محاسبه محتوای رطوبت برداشته شد و سبد نمونه سریع به داخل محفظه برگردانده می‌شد. این عمل برای تمامی رطوبت‌های نسبی در هر دما دائم انجام شد. برای تعیین رطوبت تعادلی، ظروف آلومینیومی حاوی ۵ گرم دانه گلرنگ را درون یک آون (کوره الکتریکی)، مدل Heraeus T5050 قرار دادیم.

جدول ۱- معادلات ریاضی برای پیش‌بینی مدل مناسب

$Me = \exp(\ln(A) - B \times RH)$	(۱) معادله کاربه (لی و لی، ۲۰۰۸)
$Me = A + B \ln(-\ln(RH))$	(۲) معادله چانگ فاست ۱ (لی و لی، ۲۰۰۸)
$Me = \frac{ABC(RH)}{(1 - C(RH))(1 - C(RH) + BC(RH))}$	(۳) معادله گب (قوداکه و همکاران، ۲۰۰۴ و سینیچا و میشر، ۲۰۰۷)
$Me = \left(-\frac{A}{\ln(RH)} \right)^{\frac{1}{B}}$	(۴) معادله هالسی ۲ (لی و لی، ۲۰۰۸)
$Me = \left(-\frac{\ln(1 - RH)}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$	(۵) معادله هندرسون (توقرل و ارسلان، ۲۰۰۶)
$Me = \frac{A}{\ln(RH)} + B$	(۶) معادله کوهن ۳ (لی و لی، ۲۰۰۸)
$Me = A \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^B$	(۷) معادله اسوین ۴ (سینیچا و میشر، ۲۰۰۷)
$Me = \frac{(a + bT)(C)(RH)}{(1 - RH)(1 - RH + C \times RH)}$	(۸) معادله اصلاح شده بت (جمالی و همکاران، ۲۰۰۵)
$Me = -\ln \left[-\frac{(T - c)(\ln(RH))}{a} \right] \left(\frac{100}{b} \right)$	(۹) معادله اصلاح شده چانگ-فاست (قوداکه و همکاران، ۲۰۰۶)

1- Chung and Pfof

2- Halsey

3- Cohen

4- Oswin

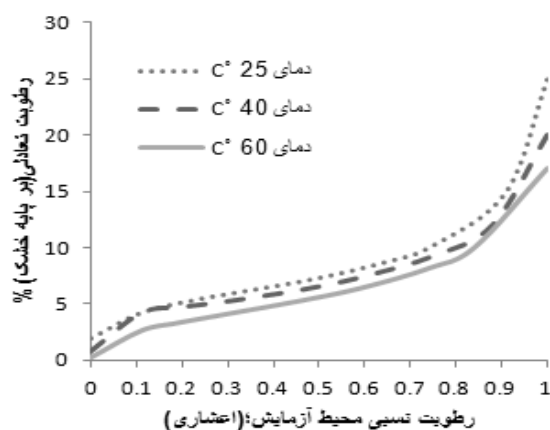
ادامه جدول ۱

$Me = \left[-\frac{\exp(a+bT)}{\ln(RH)} \right]^{\frac{1}{C}}$	(۱۰) معادله اصلاح شده هالسی (قوداکه و همکاران، ۲۰۰۴ و سینيجا و میشرا، ۲۰۰۷)
$Me = \left[-\frac{\ln(1-RH)}{a(T+c)} \right]^{\frac{1}{b}}$	(۱۱) اصلاح شده هندرسون (قوداکه و همکاران، ۲۰۰۴ و سینيجا و میشرا، ۲۰۰۷)
$Me = (a + bT) \left(\frac{RH}{1-RH} \right)^C$	(۱۲) معادله اصلاح شده اسوین (قوداکه و همکاران، ۲۰۰۶)
$Me = (a + bT) - (c + dT) \ln(1 - RH)$	(۱۳) معادله اصلاح شده اسمیت ^۱ (قوداکه و همکاران، ۲۰۰۶)
$Me = a(RH)^b + c(RH)^d$	(۱۴) معادله پلگ ^۲ (بیجار و همکاران، ۲۰۱۲)

نتایج و بحث

از آن جایی که رطوبت تعادلی و منحنی‌های هم‌دما نقش مهمی در فرآیند خشک کردن و انبارمانی گلرنگ دارند، طی آزمایش‌های که در این پژوهش انجام شد، مقادیر رطوبت تعادلی دانه گلرنگ در سه دمای ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس در دامنه رطوبت نسبی ۱۱٪ تا ۹۱٪ به دست آمد. منحنی‌های هم‌دمای جذبی نیز در سه دمای مذکور با توجه به داده‌های آزمایشگاهی ترسیم شدند. شکل ۲ منحنی‌های هم‌دمای جذبی دانه گلرنگ (بدون برازش) در سه دما را نشان می‌دهد. در این پژوهش برای برازش منحنی‌های هم‌دمای جذبی به دست آمده، از چهارده مدل مهم و رایج برای محصولات کشاورزی استفاده شد و سپس با مقایسه آماری داده‌های آزمایشی و پیش‌بینی شده با مدل‌ها، مناسب‌ترین مدل برای هر دما انتخاب شد (جدول ۲، ۳ و ۴).

در این معادلات پارامترها به صورت زیر معرفی می‌شوند: 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 ضرایب ثابت وابسته به درجه حرارت محیط ماده؛ a, b, c, d ضریب‌های ثابت ماده (زمردیان و کاووسی، ۲۰۱۱). برای برازش داده‌های حاصل از آزمایش بر روی مدل‌های بالا نیاز به دانستن ضریب‌های ثابت موجود برای هر معادله است. در این پژوهش برای به دست آوردن این ثابت‌ها از نرم‌افزار آماری SPSS 16.0 استفاده شد و با روش برازش غیرخطی ثابت‌ها برای هر مدل به دست آمدند. پس از آن مقادیر رطوبت تعادلی حاصل از آزمایش با مقادیر رطوبت تعادلی تخمین زده شده با هر مدل، به وسیله فاکتورهای آماری مقایسه ضریب تبیین^۱ (R^2)، مربع کای^۲ (χ^2) و مربع میانگین خطا^۳ (RMSE) مقایسه شدند.



شکل ۲- منحنی‌های هم‌دمای جذبی (برازش شده) دانه گلرنگ

- 1- Smith
- 2- Peleg
- 3- Coefficient of determination
- 4- Chi - square
- 5- Root of mean square error

جدول ۲- داده‌های آماری گلرنگ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در حالت جذب

معادله	ثابت A	ثابت B	ثابت C	ثابت D	R^2	χ^2	RMSE
کاریه	۳/۷۰۱	-۱/۴۰۶	-	-	۰/۹۸۵	۰/۱۹۲	۰/۳۷۰
چانگ فاست	۶/۴۸۵	-۲/۹۹۴	-	-	۰/۹۹۲	۰/۰۹۶	۰/۲۶۲
گب	۲۵/۲۳۷	۱۴۵/۴۴۱	۰/۰۰۷	-	۰/۸۵۴	۲/۳۴۴	۱/۱۱۵
هالسی	۲۵۰/۲۹۷	۲/۹۸۲	-	-	۰/۹۷۷	۰/۲۸۸	۰/۴۵۴
هندرسون	۰/۰۰۵	۲/۳۷۴	-	-	۰/۹۷۷	۰/۳۳۵	۰/۴۸۹
کوهن	-۰/۸۳۵	۵/۵۸۹	-	-	۰/۸۵۰	۱/۹۰۶	۱/۱۶۷
اصلاح شده بت	-۷۵۲۷۸/۵۱۳	۲۸۴۸/۵۳۵	-۰/۰۰۴	-	۰/۷۷۱	۴/۱۷۸	۱/۵۴۵
اصلاح شده چانگ - فاست	۶۶۱۹۱۱/۴۲	۳۳/۳۹۸	-۷۵۸۴۹/۹۲۸	-	۰/۹۹۲	۰/۱۲۰	۰/۲۶۲
اصلاح شده هالسی	-۱۷۰۹۳۹/۰۴۸	۶۸۳۷/۷۸۳	۲/۹۸۲	-	۰/۹۷۷	۰/۳۶۱	۰/۴۵۴
اصلاح شده هندرسون	۰/۰۷۵	۲/۳۷۴	-۱۰/۸۳۵	-	۰/۹۷۷	۰/۳۵۸	۰/۴۵۲
اصلاح شده اسوین	۱۶/۵۰۵	-۰/۳۶۱	۰/۲۶۵	-	۰/۹۹۳	۰/۱۱۶	۰/۲۵۸
اصلاح شده اسمیت	-۱/۱۷	۰/۲۲۲	۵/۶۵۶	-۰/۰۶۶	۰/۹۸۳	۰/۲۶۳	۰/۳۸۷
اسوین	۷/۴۷۱	۰/۲۶۵	-	-	۰/۹۹۳	۰/۰۹۳	۰/۲۵۷
پلگ	۷/۸۹۷	۴/۲	۸/۶۴۵	۰/۳۲	۰/۹۹۶	۰/۰۸۳	۰/۱۸۹

جدول ۳- داده‌های آماری گلرنگ در دمای ۴۰ درجه سلسیوس در حالت جذب

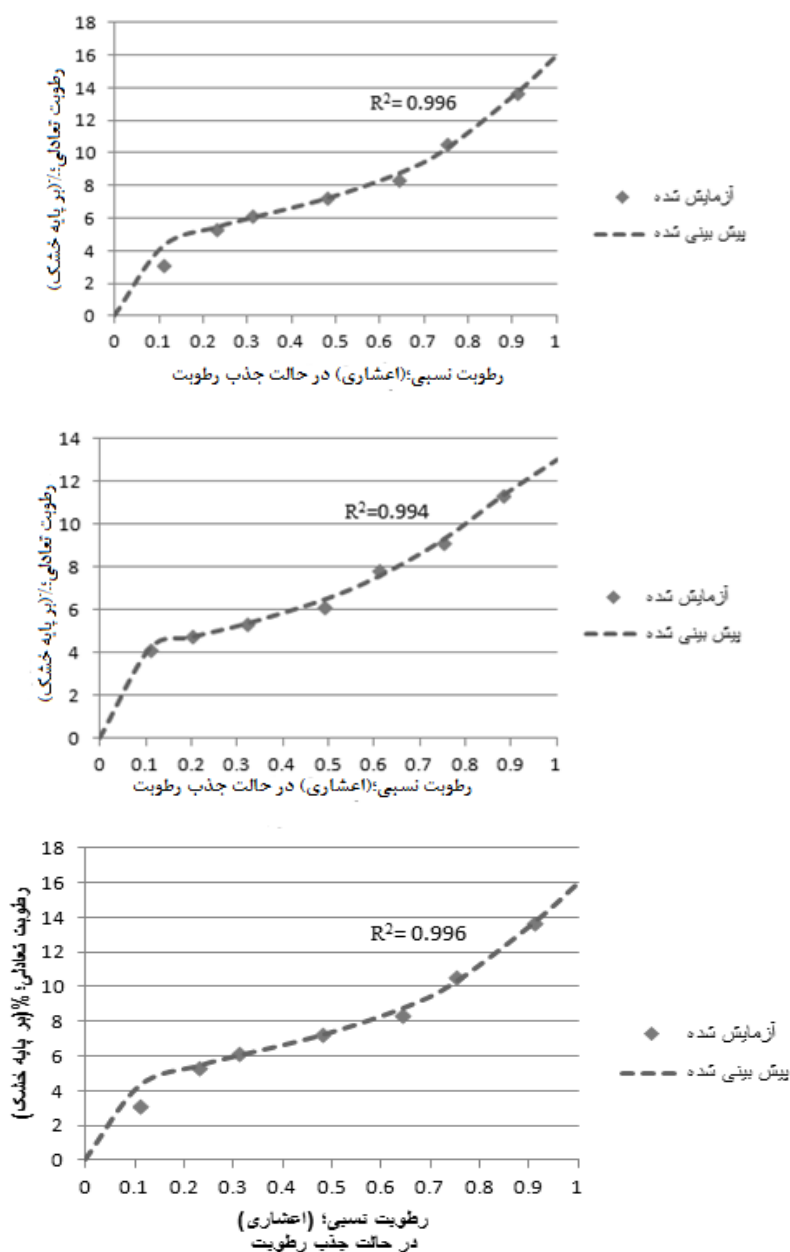
معادله	ثابت A	ثابت B	ثابت C	ثابت D	R^2	χ^2	RMSE
کاریه	۳/۴۹۵	-۱/۳۱۲	-	-	۰/۹۸۹	۰/۰۹۱	۰/۲۵۴
چانگ فاست	۵/۸۹۴	-۲/۵۶۹	-	-	۰/۹۸۶	۰/۱۱۲	۰/۸۸۱
گب	۱۶/۸۳۱	۲۵۰/۹۳۵	۰/۰۰۷	-	۰/۸۲۴	۱/۸۸۹	۱/۰۳۸
هالسی	۱۶۲/۷۶۱	۲/۹۱۵	-	-	۰/۹۸۳	۰/۱۳۶	۰/۳۱۱
هندرسون	۰/۰۰۵	۲/۵۶۴	-	-	۰/۹۶۵	۰/۳۳۹	۰/۴۹۲
کوهن	-۰/۹۳۲	۴/۷۵۵	-	-	۰/۸۸۳	۰/۹۴۴	۰/۸۲۱
اصلاح شده بت	۶۲۴۴۴/۲۴۱	-۴۶۴/۰۷۷	۰/۰۰۰۱۷	-	۰/۶۴۹	۲/۹۶۷	۱/۴۵۵
اصلاح شده چانگ - فاست	۲۲/۱۹۶	۳۸/۹۳۰	۳۷/۷۶۲	-	۰/۹۸۶	۰/۱۴۰	۰/۲۸۳
اصلاح شده هالسی	-۸۴۷۷۶/۹۲۱	۲۱۱۹/۵۵۰	۲/۹۱۵	-	۰/۹۸۳	۰/۱۷۲	۰/۳۱۳
اصلاح شده هندرسون	۳/۴۶۸	۲/۵۶۴	۷۰۶/۴۹۱	-	۰/۹۶۵	۰/۳۴۸	۰/۴۴۶
اصلاح شده اسوین	۶/۱۲۴	۰/۰۱۶	۰/۲۶۱	-	۰/۹۸۸	۰/۱۲۰	۰/۲۶۲
اصلاح شده اسمیت	۲/۱۳۱	۰/۰۵۶	۴/۹۶۵	-۰/۰۲۴	۰/۹۸۳	۱/۶۲۲	۰/۸۳۳
اسوین	۶/۷۵۵	۰/۲۶۱	-	-	۰/۹۸۸	۰/۰۹۶	۰/۲۶۲
پلگ	۶/۰۵۱	۰/۱۶۸	۷/۶۳۶	۲/۷۲۶	۰/۹۹۴	۰/۰۷۹	۰/۱۸۴

جدول ۴- داده‌های آماری گلرنگ در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد در حالت جذب

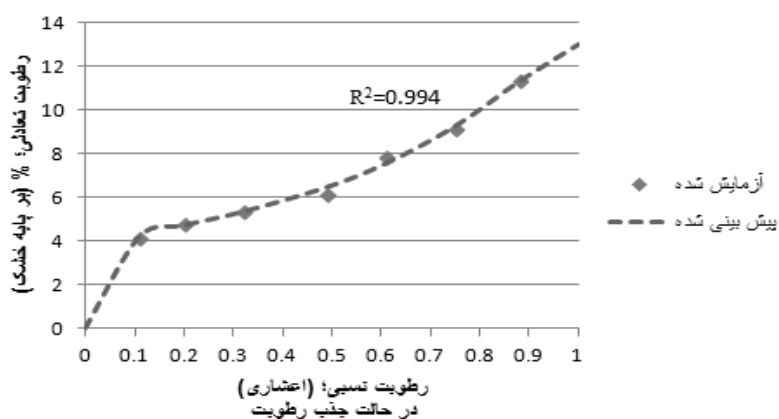
معادله	ثابت A	ثابت B	ثابت C	ثابت D	R^2	χ^2	RMSE
کاریه	۲/۳۶۸	-۱/۷۱۵	-	-	۰/۹۹۴	۰/۰۴۹	۰/۱۸۷
چانگ - فاست	۴/۷۴۹	-۲/۹۴۵	-	-	۰/۹۹۶	۰/۰۳۵	۰/۱۵۹
گب	۳۲/۱۲۴	۵۵/۶۳	۰/۰۰۹	-	۰/۹۳۹	۰/۷۳۹	۰/۶۵۰
هالسی	۲۳/۳۷۴	۲/۰۹۲	-	-	۰/۹۸۴	۰/۱۴۱	۰/۳۱۷
هندرسون	۰/۰۲۴	۱/۹۰۳	-	-	۰/۹۹۲	۰/۰۶۹	۰/۲۲۳
کوهن	-۱/۳۵۸	۳/۰۰۸	-	-	۰/۹۱۹	۰/۷۰۷	۰/۷۱۰
اصلاح شده بت	۱۳۱۴۹/۶۳	۲۱۹/۹۹۳	۰/۰۰۰۵	-	۰/۹۱۷	۱/۸۶۶	۱/۰۳۲
اصلاح شده چانگ - فاست	۳۳۳۴۷/۵۹۳	۳۳/۹۵۷	۶۵۸۷/۴۲۷	-	۰/۹۹۶	۰/۰۴۴	۰/۱۵۹
اصلاح شده هالسی	-۸۴۰۲۷/۷۰۷	۱۴۰۰/۵۱۴	۲/۰۹۲	-	۰/۹۸۴	۰/۱۸۰	۰/۳۲۱
اصلاح شده هندرسون	۰/۵۱۱	۱/۹۰۳	-۳۸/۴۳۹	-	۰/۹۹۲	۰/۰۸۴	۰/۲۱۹
اصلاح شده اسوین	۳۵/۵۴۸	-۰/۴۹۹	۰/۳۵۷	-	۰/۹۹۸	۰/۰۲۱	۰/۱۱۰
اصلاح شده اسمیت	۲/۱۶۵	۰/۰۰۵	-۳/۴۸۶	۰/۱۲۹	۰/۹۹۱	۰/۱۲۹	۰/۲۳۶
اسوین	۵/۶۲۴	۰/۳۵۷	-	-	۰/۹۹۸	۰/۰۱۶	۰/۱۰۹
پلگ	۶/۹۵۸	۴/۴۲۳	۷/۴۵۵	۰/۴۸۶	۰/۹۹۸	۰/۰۴۱	۰/۱۳۳

رطوبت بیشتری با ماده جذب می‌شود. با توجه به منحنی‌های به دست آمده می‌توان دریافت که منحنی‌ها از نوع S شکل^۱ هستند که این رفتار مربوط به خواص محصولات کشاورزی و مواد غذایی (مواد نم‌گیر^۲) است. نتیجه دیگری که از وضعیت منحنی‌ها می‌توان دریافت این است که در یک رطوبت نسبی ثابت، با افزایش دما مقدار رطوبت تعادلی کاهش پیدا می‌کند. دلیل این است که با افزایش درجه حرارت میزان فعالیت آبی زیاد شده و آب آزاد درون ماده افزایش می‌یابد و همین امر باعث می‌شود که ماده راحت‌تر آب خود را از دست بدهد و در رطوبت نسبی پایین‌تری با محیط به تعادل برسد.

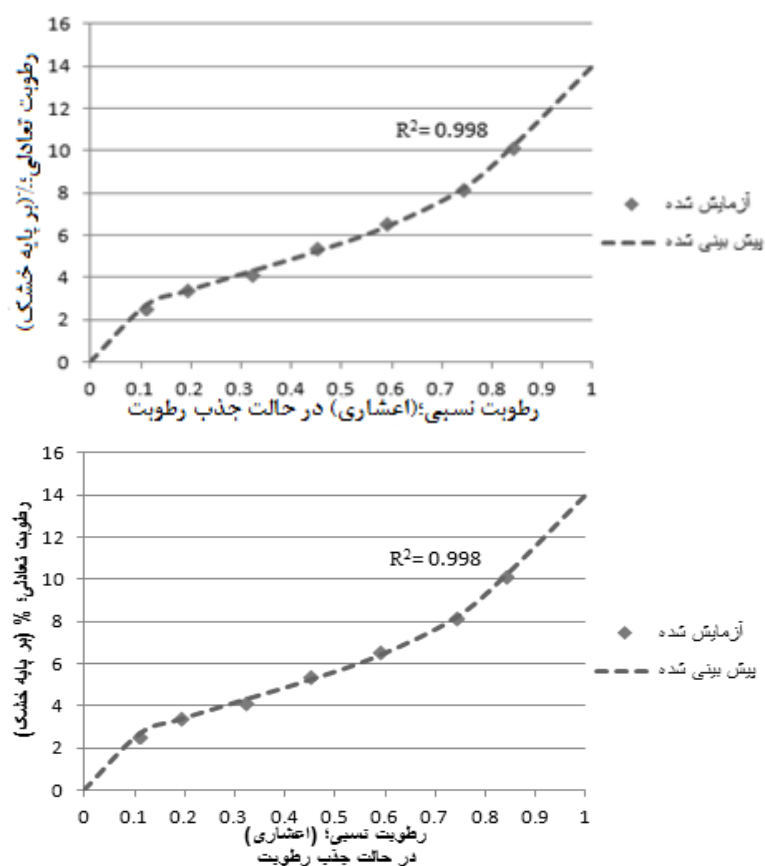
در این پژوهش برای تعیین منحنی‌های هم‌دمای جذبی در دماهای ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، مقادیر رطوبت تعادلی پیش‌بینی شده در برابر رطوبت نسبی تعادلی هوا در هر یک از دماهای مذکور ترسیم شد (شکل ۳، ۴ و ۵). همان طور که در نمودارها مشاهده می‌کنید، مقدار رطوبت تعادلی در یک دمای ثابت با افزایش مقدار رطوبت نسبی (فعالیت آبی) افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان این طور توجیه کرد که، هر چه قدر رطوبت نسبی محیط بالا می‌رود، فشار جزیبی بخار آب به فشار بخار آب اشباع نزدیک‌تر می‌شود و در نتیجه اختلاف فشار (پتانسیل رطوبتی) بیشتری بین ماده و محیط به وجود می‌آید و



شکل ۳- نمودار منحنی هم‌دمای جذبی برازش شده با مدل پلگ برای دانه گلرنگ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس



شکل ۴- نمودار منحنی همدمای جذبی برازش شده با مدل پلگ برای دانه گلرنگ در دمای ۴۰ درجه سلسیوس



شکل ۵- نمودار منحنی همدمای جذبی برازش شده با مدل اسوین برای دانه گلرنگ در دمای ۶۰ درجه سلسیوس

نتیجه گیری

در این پژوهش، منحنی‌های همدمای جذبی دانه گلرنگ در سه دمای ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به دست آورده شد. در رطوبت نسبی بالا، شیب منحنی‌های همدمای گلرنگ افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، مدل پلگ با R^2

χ^2 و RMSE، به ترتیب ۰/۹۹۶، ۰/۰۸۳، ۰/۱۸۹ و در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۹۹۴، ۰/۰۷۹، ۰/۱۸۴ مناسب‌ترین مدل و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس مدل اسوین با R^2 و χ^2 و RMSE، به ترتیب ۰/۹۹۸، ۰/۰۱۶، ۰/۱۰۹ مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی مقادیر رطوبت تعادلی جذبی دانه گلرنگ است.

منابع

۱. زمردیان ع. ۱۳۸۰. بررسی خواص خشک کردن به روش لایه‌های نازک برای تعیین رطوبت تعادلی ارقام ایرانی برنج. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۲(۷):۲۷-۴۰.
۲. زمردیان ع. ۱۳۸۷. خشک کردن دانه‌ها - اصول عملی و نظری (ترجمه). انتشارات مرکز نشر علمی کشاورزی. ۴۴۴ ص
۳. فروزان ک. ۱۳۷۸. گلرنگ. انتشارات شرکت دانه‌های روغنی. ۱۰۵ ص.
4. Alonso C. Beristain C. Calleros C. Huezo M. and Carter E. 2006. Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. *Journal of Food Engineering*. 77(2):753-760.
5. Bejar A. Miaoubi N. and Kecaou N. 2012. Moisture sorption isotherms Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves. *Food Chemistry*. 132(4):1728-1735
6. Brooker d. Bakker-Arkema F. and Hall C. 1992. Drying and storage grains and oilseeds. New York: AVI Book by van Nostrand Reinhold. 468 p.
7. Garcia-Prez J. Carcel J. Clemente G. and Mulet A. 2007. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heat. *LWT - Food Science and Technology*. 41(1):18-25
8. Moisture sorption isotherms heat of sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. *Journal of Food Engineering*. 78(3):827-835.
9. Henderson S. 1985. A basic concept of equilibrium moisture. *Journal of Agricultural Engineering*. 33(1):29-32.
10. Jamali A. Kouhila M. Ait M. Idlimam A. and Lamharrar A. 2005. Moisture adsorption-desorption isotherms of Citrus reticulate leaves at three temperatures. *Journal of Food Engineering*. 77(2):71-78.
11. Koua B. Koffi P. Gbaha P. and Toure S. 2012. Thermodynamic analysis of sorption isotherms of cassava (*Manihot esculenta*). *LWT-Food Science and Technology*. 45(2):1506-1513
12. Lee J. and Lee M. 2008. Effect of drying method on the moisture sorption isotherms for *Inonotus obliquus* mushroom. *LWT-Food Science and Technology*. 41(4):1478-1484.
13. Mohsenin N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach publishers. 891 pp.
14. Sinija V. and Mishra H. 2007. Moisture sorption isotherms and heat of sorption of instant (soluble) green tea powder and green tea granules. *Journal of Food Engineering*. 86(2):494-500
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. Zomorodian A. Kavoosi Z. and Momenzadeh L. 2011. Determination of EMC isotherms and appropriate mathematical models for Canola. *Food and bio product processing*. 89(4):407-413.

