بررسی منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبتی بذر ذرت (هیبریدهای تری‌وی‌کراس ۶۴۷ و سینگل کراس ۷۰۴)

مجید سلیمانی[۱] و محمد شاهدی[۲]

چکیده

منحنی‌های همدما در کنترل رطوبت بذر و رطوبت نسبی محیط اطراف آن طی دوره نگه‌داری و هم‌چنین کنترل فرایند خشک‌شدن و طراحی خشک‌کن حائز اهمیت است. با توجه به اهمیت این منحنی‌ها، پژوهشی در قالب دو آزمایش فاکتوریل با ۳ فاکتور: هیبرید (شامل هیبریدهای ۶۴۷ و ۷۰۴)، دما (در ۶ سطح در دامنه ۵ الی ۵۵ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی (در دامنه ۱۰ تا ۹۰ درصد) به طور مستقل برای پدیده‌های جذب و دفع رطوبت انجام گرفت. برای فراهم ساختن رطوبت نسبی در دامنه مورد نظر از محلول گلیسرول استفاده شد. آزمایش‌ها نشان داد که محلول این ماده می‌تواند شرایط مورد نظر را تأمین کند. البته رابطهٔ میان غلظت و رطوبت نسبی، رابطه‌ای غیر خطی و به میزان کم وابسته به دما بود. نتایج حاصل از مقایسهٔ میانگین‌ها نشان داد که عوامل درجه حرارت، رطوبت نسبی و هیبرید، هرسه بر رطوبت تعادلی جذب و دفع در سطح ۱٪ دارای اثر معنی‌دار هستند که البته در این میان رطوبت نسبی از اهمیت و تأثیر بیشتر برخوردار است. مقایسهٔ هیبریدها نشان داد که در شرایط محیطی یکسان، هیبرید ۷۰۴ رطوبت تعادلی بالاتری نسبت به هیبرید ۶۴۷ دارد که این مسأله بیانگر بالاتر بودن قابلیت نگه‌داری و فعالیت آبی کمتر هیبرید ۷۰۴ است. انطباق مشاهدات بر مدل‌های ریاضی غیرخطی هندرسن، چانگ- فاست و اسوین پس از تعیین ضرایب منتج به این نتیجه شد که مدل اسوین برای منحنی‌های جذب و دفع هیبرید ۷۰۴ و جذب ۶۴۷ و مدل چانگ- فاست برای منحنی دفع هیبرید ۶۴۷ مدل‌های دقیق‌تر و مناسب‌تری است.

واژه‌های کلیدی: منحنی‌های همدما، ذرت، جذب رطوبت، دفع رطوبت، مدل‌های رطوبتی

مقدمه

بالا بودن سطح زیر کشت ذرت در استان خوزستان (حدود ۳۰۰۰۰ هکتار) و سیاست تولید بذر تا حدود ۱۰۰۰۰ هکتار در منطقه، ایجاب می‌کند تا در ارتباط با مسأله نگه‌داری و حفظ کیفیت آن پژوهشی جامع و کامل صورت گیرد تا در دوره نگه‌داری، کاهش قابلیت جوانه‌زنی و میزان صدمه به بذر به

۱. مربی پژوهش مرکز تحقیقات کشاورزی دزفول

۲. استاد علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]

حداقل برسد.

مطالعات مشخص کرده است که عدم کنترل عوامل محیطی در جهت کاهش دما و رطوبت نسبی، باعث افزایش فعالیت کپک‌ها طی دوران نگه‌داری شده و اولین قسمتی که توسط این عوامل فساد مورد حمله و تجزیه قرار می‌گیرد رویان بذر است. این پدیده خود باعث کاهش ماده خشک، افزایش تنفس و افت قوه نامیه می‌شود. البته لازم به ذکر است که درجه حرارت و رطوبت بذر نیز به خودی خود بر عمر انباری بذر تأثیر گذارند، زیرا افزایش این عوامل موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های تنفسی شده و افزایش شدت تنفس، منجر به کاهش ذخیرهٔ غذایی و افت قوه نامیه می‌گردد. از آنجا که رطوبت بذر و رطوبت نسبی محیط محدود به آن متأثر از یکدیگر و در عین حال هر دو عامل مذکور متأثر از عامل درجه حرارت‌اند، آگاهی از منحنی‌های همدمای بذر به منظور نگه‌داری سالم آن لازم به نظر می‌رسد (۳ و ۷). مسالهٔ دیگری که پس از برداشت بذر ذرت حائز اهمیت و ضروری است اعمال فرایند خشک کردن و کاهش رطوبت آن است. آگاهی از منحنی‌های همدمای محصول در تعیین زمان، سرعت افت رطوبت و در نتیجه برآورد ظرفیت خشک‌کن و صرفه‌جویی در زمان و مصرف انرژی طی مرحلهٔ خشک کردن مورد نیاز است (۳ و ۱۴).

ضمن پژوهشی که تامسون در سال ۱۹۷۲ انجام داد، مشخص شد که افزایش رطوبت بذر ذرت و دمای انبار، منجر به کاهش عمر نگه‌داری آن می‌شود به طوری که در دمای ۱۵/۶°C کاهش رطوبت محصول از ۲۸٪ به ۱۵/۵٪، منجر به افزایش قابلیت نگه‌داری آن از ۱۷ روز به ۱۹۷ روز می‌شود و در رطوبت ۱۵/۵٪ کاهش دمای محصول از ۲۳/۹°C به ۱۵/۶°C باعث افزایش عمر نگه‌داری از ۸۱ روز به ۱۹۷ روز می‌شود (۱۳).

طی پژوهش‌های مختلف، بیش از ۱۰۰ جنس کپک از دانه‌های غلات جدا شده است. هر جنس به یک حداقل و یک دمای بهینه و نیز یک رطوبت نسبی بهینه برای فعالیت نیاز دارد. دمای بهینه برای رشد کپک‌های مهم غلات در دامنهٔ ۲۵ الی ۳۰ درجه سانتی‌گراد است با این وجود بعضی در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد بهترین رشد و فعالیت را نشان می‌دهد. حداقل دما برای رشد کپک‌ها مشخص نشده است ولی گزارش شده که برخی از آنها حتی در دمای حدود صفر درجه سانتی‌گراد نیز قادر به رشدند (۳).

کریستنسن و کافمن گزارش کردند که در دمای ۲۵°C، رطوبت نسبی لازم برای فعالیت قارچ‌ها در دامنه ۷۰ الی ۹۰ درصد یا بالاتر و حداقل دمای لازم برای فعالیت آنها ۵ – تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد است (۶).

تویت و همکاران در سال ۱۹۸۵ طی تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که محصول ذرتی که درصد آسیب‌دیدگی فیزیکی (در نتیجهٔ ضربات مکانیکی و یا تغییرات ناگهانی رطوبت در اثر عدم کنترل شرایط محیطی) در آن بالا باشد آمادگی بیشتری برای آلودگی به قارچ‌ها دارد که این امر خود باعث کاهش سریع‌تر قوهٔ نامیه و کاهش دوام بذر می‌شود (۱۵).

در سال ۱۹۸۹ چن و موری، منحنی‌های هم‌دمای ذرت را در دامنهٔ ۵ الی ۴۵ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که این منحنی‌ها برای ارقام مختلف متفاوت است، هم‌چنین فاکتورهای درجه حرارت و رطوبت نسبی از عوامل مؤثر بر تغییرات این منحنی‌ها می‌باشند و دارای اثر معنی‌دار است. هم‌چنین نتایج نشان داد که پدیدهٔ پسماند در تمام طول منحنی‌ها (رطوبت نسبی در دامنهٔ ۱۰ تا حدود ۱۰۰ درصد) وجود دارد (۴).

درسال ۱۹۸۰ نیوبر گزارش کرد که عوامل بسیاری از قبیل اجزای محصول (مواد معدنی، محتوای روغن، نشاسته، پروتئین و نشاسته)، رقم محصول و شرایط محیطی بذر ذرت بر رطوبت نسبی تعادلی آن مؤثر است (۹).

در سال ۱۹۸۹ چن و موری مدل‌های هندرسن، چانگ–فاست، اسوین و هالسی را به منظور ارزیابی قابلیت آنها در برآورد رطوبت تعادلی دانه‌های غلات و دانه‌های روغنی بررسی کردند و در نهایت معادلهٔ هالسی را برای محصولات حاوی پروتئین و روغن بالا، مدل اسوین را برای برخی از ارقام گندم

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]

و ذرت و معادلات چانگ – فاست و هندرسن را برای دانه‌های حاوی فیبر و نشاستهٔ بالا مناسب ارزیابی نمودند (۵).

سوپید و همکارش در سال ۱۹۹۴ منحنی‌های همدمای بذر ذرت را در دامنهٔ دمای ۲۰ تا ۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد و فعالیت آبی ۰/۱ الی ۰/۹۸ مورد مطالعه قرار دادند. برای ارزیابی مدل‌های مختلف در برآورد رطوبت تعادلی، ۶ مدل را مورد مقایسه قرار دادند و در کل مدل هندرسن را به عنوان بهترین مدل ارزیابی کردند. اما در عین حال کارایی و دقت برخی مدل‌ها در پدیدهٔ جذب بهتر از پدیدهٔ دفع رطوبت ارزیابی گردید (۱۲).

در سال ۱۳۸۳، زمردیان و توکلی پدیدهٔ دفع رطوبت را برای سه رقم پستهٔ ایرانی مورد بررسی قرار دادند و مدل‌های اسوین، اسمیت و چانگ– فاست را به ترتیب برای ارقام اوحدی، کله‌قوچی و عبدالهی مناسب گزارش کردند. هم‌چنین تأثیر رقم و دما را بر مقادیر رطوبت تعادلی، معنی‌دار گزارش کردند (۱).

هدف از انجام این پژوهش عبارت است از:

الف) بررسی تأثیر عوامل محیطی، شامل دما ورطوبت نسبی و نیز عامل رقم بر رطوبت تعادلی محصول

ب) تعیین مدل‌های مناسب برای پدیده‌های جذب و دفع هریک از ارقام مورد نظر.

مواد و روش‌ها

برای تعیین منحنی‌های همدمای بذر ذرت دانه‌ای و هم‌چنین بررسی تأثیر شرایط محیطی بر آن، هیبریدهای متداول منطقه یعنی سینگل کراس ۷۰۴ و تری‌وی‌کراس ۶۴۷ از مرکز کشت و صنعت شهید رجایی تهیه گردید.

برای تأمین رطوبت نسبی به طور دقیق در شرایط دمایی متفاوت، از محلول گلیسرول در غلظت‌های متفاوت استفاده شد. برای تعیین رطوبت نسبی تعادلی و فشار بخار محلول‌های گلیسرول، محفظه‌ای ایزوله مطابق شکل ۱– الف از جنس پلکسی گلاس (Plexy Glass) تهیه شد. برای تأمین گرما از گرم‌کنندهٔ با توان ۴۰۰ وات و برای تنظیم درجه حرارت از یک ترموستات دقیق مدل HD-4030 ساخت شرکت دلتااهم (Delta Ohm) ایتالیا با قابلیت کنترل درجه حرارت با دقت ۰/۲°C ± در دامنهٔ ۱۵– تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. هم‌چنین برای توزیع یک‌نواخت دما و رطوبت از یک دمنده بهره گرفته شد. پس از به تعادل رسیدن محلول (که حدود یک سوم حجم محفظه را تشکیل می‌داد) با هوای موجود در محفظه، رطوبت نسبی آن همراه با درجه حرارت خشک و درجه حرارت مرطوب با استفاده از هیگرومتر Testo مدل ۴۰۵ (با دقت ۰/۱± در تعیین رطوبت نسبی و درجه حرارت) اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که قبل از شروع آزمایش‌ها و تعیین رطوبت نسبی و فشار بخار محلول‌ها، هیگرومتر با استفاده از محلول‌های استاندارد اسیدسولفوریک و گلیسرول بر اساس منابع موجود در دامنهٔ رطوبت ۱۰ الی ۹۰ درصد و دامنه دمای ۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد کالیبره شد (۸ و ۱۰). برای اطمینان بیشتر، درجه حرارت خشک و درجه حرارت مرطوب توسط دماسنج‌های خشک و مرطوب در محفظه و در شرایط یکسان برای هریک از محلول‌ها اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطهٔ ترمودینامیکی زیر، فشار بخار آن تعیین شد (۱۱):

$$P_w = P_{wb} - \frac{(P_B - P_{wb})(T_a - T_w)}{۱۵۵۵/۵۶ - ۰/۷۲۲(T_w)} \qquad [۱]$$

که در این خصوص پارامترها به قرار زیر است:

P_w : فشار جزئی بخار آب (kPa)

P_B : فشار بارومتریک (kPa)

P_{wb} : فشار بخار آب در حالت اشباع در دمای مرطوب (kPa)

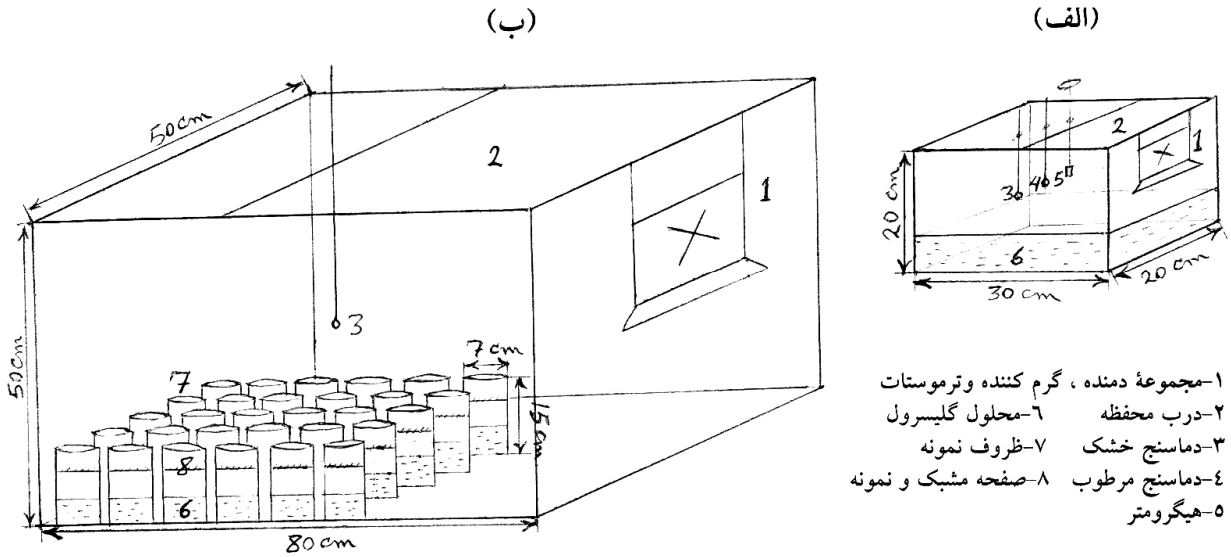
T_a : درجه حرارت خشک (°C)

T_w : درجه حرارت مرطوب (°C)

برای تعیین P_B، بارومتر Lambrecht مدل ۶۰۴ ساخت آلمان با دقت ۰/۲۵± هکتوپاسکال ساخت آلمان و برای تعیین P_{wb} جدول استاندارد ترمودینامیکی بخار اشباع آب مورد استفاده قرار گرفت (۱۰). برای انجام آزمایش‌ها، محلول‌هایی از گلیسرول با غلظت‌هایی در دامنهٔ ۲۴ الی ۹۸ درصد (w/w) تهیه شد و رطوبت نسبی تعادلی و فشار بخار آنها در شش دما شامل: ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. سپس با برازش مقادیر به دست آمده برای رطوبت نسبی در

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]



شکل ۱. الف) محفظه مورد استفاده برای تعیین ویژگی‌های محلول گلیسرول و ب) محفظه مورد استفاده برای نمونه‌ها

هریک از دماهای ذکر شده، مدل‌هایی یک متغیره برای رطوبت نسبی بر اساس غلظت محلول گلیسرول به دست آمد. در نهایت با روش سعی و خطا، غلظت‌های دقیق لازم برای فراهم ساختن ۵ سطح رطوبت نسبی (۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد) در دماهای ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد مشخص گردید که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. برای محلول‌های رقیق جهت جلوگیری از آلودگی به کپک‌ها، از دو قطره محلول اشباع سولفات مس استفاده شد (۲).

برای بررسی تأثیر شرایط محیطی بر مقدار رطوبت تعادلی (EMC) بذر ذرت، مطالعه‌ای در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایهٔ کاملاً تصادفی، شامل فاکتورهای رقم (در دو سطح شامل هیبریدهای ۷۰۴ و ۶۴۷)، درجه حرارت (در ۶ سطح در دامنهٔ۵ الی ۵۵ درجه سانتی‌گراد به فاصلهٔ ۱۰ درجه از یکدیگر) و رطوبت نسبی (در ۵ سطح مذکور) و هر تیمار در ۳ تکرار صورت گرفت. بدین منظور رطوبت تعادلی در ۲ حالت جذب (Adsorption) و دفع (Desorption) مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت جذب حدود ۴ گرم نمونهٔ خشک و در حالت دفع حدود ۵ گرم نمونهٔ مرطوب (که با استفاده از پارچهٔ کتانی خیس شده با آب‌مقطر، مرطوب شده بود) به طور دقیق توزین شد و روی صفحهٔ مشبک داخل ظرف نمونه از جنس شیشه (که حدود یک‌سوم حجم آن را محلول گلیسرول، تأمین کنندهٔ رطوبت نسبی و فشار بخار مورد نظر، تشکیل می‌داد) انتقال یافت. ظروف محتوی نمونه‌ها در داخل محفظهٔ نمونه‌ها از جنس پلکسی گلاس مطابق شکل ۱- ب قرار گرفته و در دمای مورد نظر حدود ۲۰ روز به آن زمان داده شد تا در حالت استاتیک از نظر رطوبتی به تعادل برسد (البته توزین متوالی نشان داد که بعد از روز هجدهم، تغییر وزن در نمونه صورت نمی‌گیرد). بعد از سپری شدن این زمان، نمونه از داخل محفظه خارج شد و با دقت ۰/۰۰۱ گرم توسط ترازوی Sartorius ساخت آلمان توزین گردید و در نهایت رطوبت آن در دمای ۱۰۳°C به مدت ۷۲ ساعت تعیین شد و بر اساس وزن خشک گزارش شد (۴). لازم به توضیح است که برای تأمین گرما در محفظهٔ نمونه‌ها، گرم‌کننده با توان ۸۰۰ وات و برای تنظیم دما، ترموستات دقیق با چنین مشخصاتی برای محفظهٔ قبل (شکل ۱- الف) به‌کار گرفته شد. هم‌چنین برای اندازه‌گیری دما در محفظه نمونه‌ها از دماسنج جیوه‌ای با دقت ۱°C± استفاده

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]

جدول ۱. غلظت‌های مورد نیاز گلیسرول (٪w/w) برای تأمین رطوبت نسبی مورد نظر

RH(%) / T(°C)	۱۰	۳۰	۵۰	۷۰	۹۰
۵	۹۷/۵	۹۰/۲	۷۹/۸	۶۴/۱	۳۲/۹
	(./۶۵)	(۱/۹۶)	(۳/۲۷)	(۴/۵۸)	(۵/۸۹)
۱۵	۹۷/۵۵	۹۰/۴۵	۸۰/۲	۶۴/۶	۳۳/۹
	(۱/۲۸)	(۳/۸۴)	(۶/۳۹)	(۸/۹۵)	(۱۱/۵۱)
۲۵	۹۷/۶	۹۰/۶	۸۰/۶۵	۶۵/۰۵	۳۴/۹
	(۲/۳۸)	(۷/۱۳)	(۱۱/۸۸)	(۱۶/۶۳)	(۲۱/۳۸)
۳۵	۹۷/۶۵	۹۰/۸	۸۱/۱	۶۵/۴۵	۳۵/۹
	(۴/۲۲)	(۱۲/۶۵)	(۲۱/۰۹)	(۲۹/۵۲)	(۳۷/۹۶)
۴۵	۹۷/۷	۹۱	۸۱/۵	۶۵/۹۵	۳۶/۹
	(۷/۱۹)	(۲۱/۵۶)	(۳۵/۹۴)	(۵۰/۳۲)	(۶۴/۶۹)
۵۵	۹۷/۷۵	۹۱/۲	۸۱/۹۵	۶۶/۵	۳۷/۹
	(۱۱/۱۰)	(۳۳/۳۱)	(۵۵/۵۲)	(۷۷/۷۳)	(۹۹/۹۴)

اعداد داخل پرانتز در جدول بیانگر فشار بخار ایجاد شده بر حسب میلی‌متر جیوه در غلظت ارائه شده در بالای آنها می‌باشد.

شد. برای تعیین رطوبت نمونه‌ها، از آون Memmert مدل ۶۰۰ ساخت آلمان با دقت دمای $\pm 1^{\circ}C$ استفاده شد. پس از آن داده‌های به دست آمده در قالب آزمایش فاکتوریل ۳ فاکتوره برای هریک از پدیده‌های جذب و دفع به طور جداگانه مورد تجزیه و سپس با آزمون دانکن، میانگین‌ها مورد مقایسه قرار گرفت (در سطح ۱٪).

برای تعیین پدیدهٔ پسماند برای هر رقم در دمای مشخص تفاوت میان محتوای رطوبتی بذر در حالت جذب و در حالت دفع به عنوان کمیت این پدیده گزارش گردید که اثر تغییرات رطوبت نسبی و دما بر آن در قالب منحنی ارائه شده است.

در انتها برای بررسی امکان برآورد دقیق رطوبت تعادلی بذر (هیبریدهای مذکور) بر اساس فاکتورهای محیطی درجه حرارت و رطوبت نسبی محیط، داده‌های به دست آمده بر مدل‌های ریاضی و تجربی معتبر موجود منطبق گردید. انطباق داده‌ها بر مدل‌های غیر خطی که در ذیل ارائه شده است با استفاده از روش گوس- نیوتن (Gauss-Newton) و به کمک نرم‌افزار SAS صورت گرفت. این مدل‌ها عبارت‌اند از (۳):

الف) مدل اصلاح شدهٔ هندرسن (Modified Henderson Equation) :

$$RH=1- \exp (-A\times (T+C)\times M^{B}) \qquad [۲]$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]

ب) مدل چانگ- فاست (Chung-Pfost Equation) :

$$RH=\exp(-(A / (T+C)\times \exp(-B\times M)) \quad [۳]$$

ج) مدل اصلاح شدهٔ اسوین (Modified Oswin Equation) :

$$RH=1 / [((A+B\times T) / M)^{C}+1] \quad [۴]$$

در این روابط، RH و M به ترتیب رطوبت نسبی و رطوبت تعادلی محصول، T درجه حرارت و A، B و C ضرایب ثابت‌اند. پس از انطباق داده‌ها، ضرایب برای هریک از هیبریدها در حالات جذب و دفع به طور جداگانه به دست آمد. برای مشخص کردن دقت هریک از معادلات در برآورد رطوبت تعادلی، پارامترهای خطای استاندارد (Standard Error of Estimate) و انحراف نسبی میانگین (Mean Relative Deviation) تعیین شد و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت تا بهترین معادله برای هر هیبرید مشخص گردد.

$$MRD=(1/n)\sum(|M- M_M|/M) \quad [۵]$$

که در این رابطه M_M میانگین مقادیر رطوبت تعادلی است.

نتایج

پس از انجام آزمایش‌های مربوط به تعیین فشار بخار و رطوبت نسبی محلول‌های گلیسرول، نتایج نشان داد که این ماده می‌تواند در کنترل رطوبت نسبی در دامنهٔ مورد نظر مؤثر باشد. نتایج به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است.

همان طور که داده‌های به دست آمده در جدول نشان می‌دهد با افزایش غلظت گلیسرول در دمای ثابت، می‌توان رطوبت نسبی و هم‌چنین فشار بخار محدود به محلول گلیسرول را کاهش داد. به عنوان مثال در دمای ۲۵°C می‌توان با افزایش غلظت از ۳۴/۹(w/w)٪ به ۹۷/۶(w/w)٪ رطوبت نسبی محیط را از ۹۰ به ۱۰ درصد و فشار بخار را از ۲۱/۳۸ به ۲/۳۸ میلی‌متر جیوه کاهش داد. ولی نکتهٔ دیگری که در اینجا حائز اهمیت می‌باشد آن است که کارایی افزایش غلظت گلیسرول در کاهش رطوبت نسبی، در غلظت‌های بالاتر بیشتر می‌شود به طوری که به عنوان مثال در دمای ۲۵°C برای کاهش رطوبت نسبی از ۹۰ به ۷۰ درصد غلظت این ماده باید از ۳۴/۹٪ به ۶۵/۰۵٪ افزایش یابد حال آن که برای کاهش رطوبت نسبی از ۳۰ به ۱۰ درصد غلظت آن باید از ۹۰/۶٪ به ۹۷/۶٪ افزایش پیدا کند. بنابراین رابطهٔ میان افزایش غلظت گلیسرول و کاهش رطوبت نسبی یک رابطهٔ غیر خطی است. معادلاتی که در نتیجهٔ برازش مقادیر رطوبت نسبی بر اساس غلظت محلول گلیسرول در دماهای مورد مطالعه حاصل آمد عبارت‌اند از:

$$T=5°C:\ RH=(101.45-1.01C)\ /(1-0.0074C),\ R^2>0.99 \quad [۶]$$

$$T=15°C:\ RH=(101.78-1.02C)\ /(1-0.0074C),\ R^2>0.99 \quad [۷]$$

$$T=25°C:\ RH=(102.11-1.02C)\ /(1-0.0075C),\ R^2>0.99 \quad [۸]$$

$$T=35°C:\ RH=(102.45-1.02C)\ /(1-0.0075C),\ R^2>0.99 \quad [۹]$$

$$T=45°C:\ RH=(102.77-1.03C)\ /(1-0.0075C),\ R^2>0.99 \quad [۱۰]$$

$$T=55°C:RH=(103.05-1.03C)\ /(1-0.0076C),\ R^2>0.99 \quad [۱۱]$$

که در این روابط، C غلظت گلیسرول (w/w%) می‌باشد.

پدیده جذب رطوبت

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس رطوبت تعادلی در پدیدهٔ جذب در جدول ۲ ارائه شده است.

طبق این جدول، اثر فاکتور هیبرید بر رطوبت تعادلی در سطح ۱٪ معنی‌دار است. شکل ۳ نیز مؤید این مطلب است، به طوری که در مرحلهٔ جذب، هیبرید سینگل‌کراس۷۰۴، میانگین ۱۲/۶۵٪ و هیبرید تری‌وی‌کراس۶۴۷، میانگین ۱۲/۴۵٪ (بر پایهٔ خشک) را به خود اختصاص داده است. بنابراین توانایی هیبرید ۷۰۴ در نگه‌داری آب بیشتر از هیبرید ۶۴۷ می‌باشد.

هم‌چنین مطابق جدول تجزیه واریانس، اثر فاکتور درجه حرارت محیط در پدیدهٔ جذب بر محتوای رطوبتی در سطح ۱٪ معنی‌دار است. شکل ۲ نشان می‌دهد که افزایش درجه حرارت از ۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد در تمام ۶ سطح، باعث کاهش معنی‌دار میانگین رطوبت تعادلی می‌شود، به طوری که میزان آن از ۱۴/۶۶٪ (بر پایهٔ خشک) در دمای ۵°C به ۱۰/۴۹٪ (بر پایهٔ خشک) در دمای ۵۵°C کاهش یافته است.

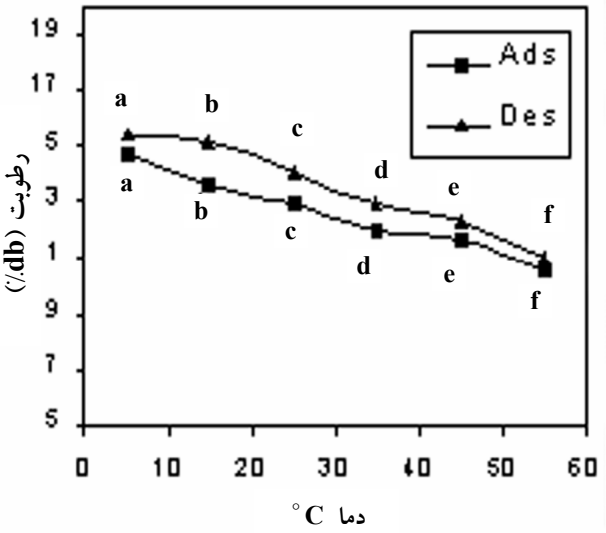
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]

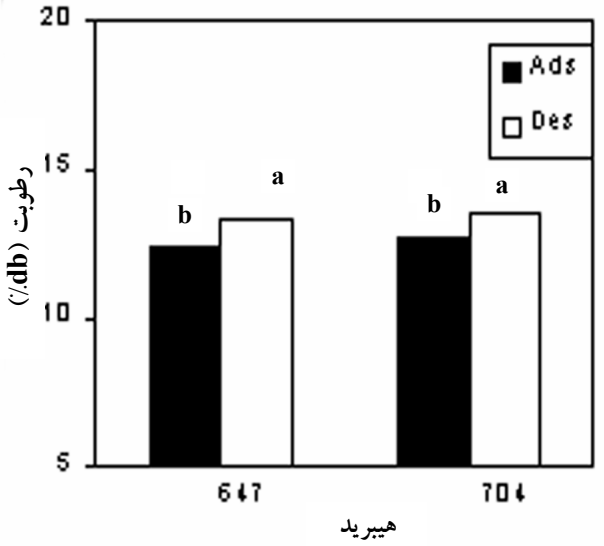
جدول ۲. تجزیه واریانس رطوبت تعادلی بذر در پدیده های جذب و دفع رطوبت

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (جذب)	میانگین مربعات (دفع)
هیبرید	۱	۱/۱۷۹**	۱/۰۵۴**
دما	۵	۴۲/۰۶۵**	۵۲/۰۳۴**
رطوبت نسبی	۴	۹۴۱/۹۲۱**	۹۲۳/۱۵۹**
هیبرید× دما	۵	۰/۰۳۱ns	۰/۰۴۷ns
هیبرید× رطوبت نسبی	۴	۰/۰۳۹ns	۰/۰۰۹ns
دما × رطوبت نسبی	۲۰	۰/۹۶۹**	۱/۰۶۵**
هیبرید× دما × رطوبت نسبی	۲۰	۰/۰۵۶ns	۰/۰۲۵ns
خطا	۱۲۰	۰/۰۶۳	۰/۰۵۵

** : معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ ns : غیرمعنی‌دار



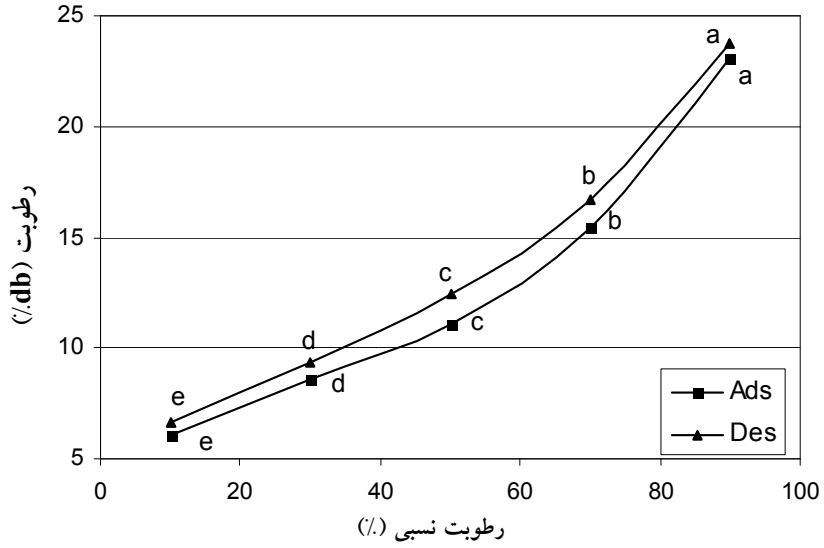
شکل ۲. مقایسه میانگین‌های رطوبت تعادلی ناشی از تغییرات دما در پدیده‌های جذب و دفع



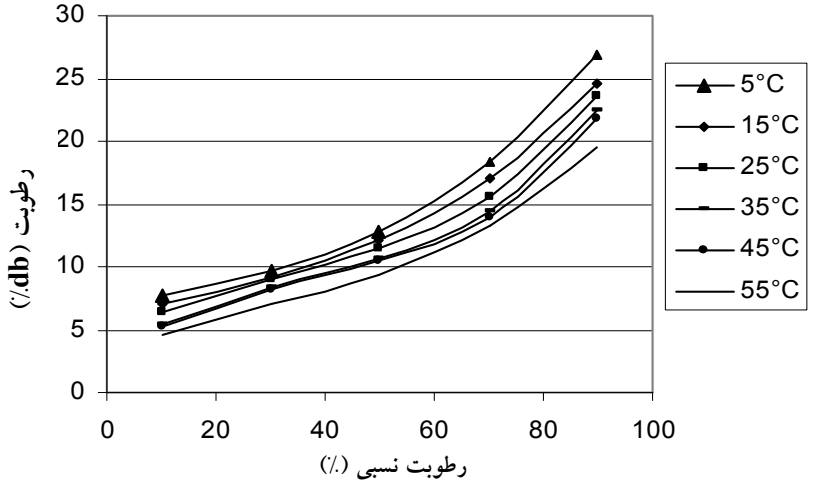
شکل ۳. مقایسه میانگین‌های رطوبت تعادلی هیبریدهای ذرت در پدیده‌های جذب و دفع (به طور مستقل)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]



شکل ۴. مقایسه میانگین‌های رطوبت تعادلی در اثر تغییرات رطوبت نسبی محیط در پدیده‌های جذب و دفع (به طور مستقل)



شکل ۵. مقایسه میانگین‌های رطوبت تعادلی در اثر تغییرات رطوبت نسبی محیط در پدیدهٔ جذب

اثر رطوبت نسبی محیط نیز مطابق جدول ۲ و شکل ۴ بر رطوبت تعادلی بذر در سطح ۱٪ معنی‌دار به دست آمده است. مقایسهٔ میانگین‌ها در شکل ۴ بیانگر این مطلب است که افزایش رطوبت نسبی در تمام سطوح به کار رفته در این پژوهش، باعث افزایش معنی‌دار رطوبت تعادلی محصول در پدیدهٔ جذب می‌گردد. میانگین‌ها نشان می‌دهد که تغییرات رطوبت نسبی (حاصل از تغییرات فشار بخار آب) در تغییرات رطوبت محصول، مؤثرتر از عامل محیطی دما در سطوح مورد مطالعه است، زیرا شیب منحنی تغییرات رطوبت تعادلی در اثر تغییرات رطوبت نسبی بیشتر است، بنابراین کنترل آن حائز اهمیت می‌باشد.

طبق جدول تجزیه واریانس، اثر متقابل دما در رطوبت نسبی در سطح ۱٪ معنی‌دار است. شکل ۵ بیانگر این مطلب است که در دمای ثابت با افزایش رطوبت نسبی، رطوبت تعادلی افزایش می‌یابد که البته این افزایش منطبق بر یک تابع نمایی سیگموئیدی است و بر عکس با افزایش درجه حرارت، رطوبت تعادلی، کاهش پیدا می‌کند. به عبارتی دیگر می‌توان با ترکیب مناسبی از این عوامل، رطوبت محصول را در سطح مطلوب حفظ کرد یا به سطح مورد نظر رساند. با توجه به شکل ۵،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]

مشخص می‌شود که با ثابت بودن رطوبت تعادلی (EMC)، میزان رطوبت نسبی در حال تعادل (ERH) با بذر در اثر افزایش دما افزایش پیدا می‌کند که این پدیده خود ناشی از افزایش فشار بخار در محیط و یا به عبارتی افزایش فعالیت آبی در محصول است که بر عمر نگه‌داری بذر تأثیر منفی دارد.

با توجه به جدول ۲، اثر متقابل هیبرید در دما و هیبرید در رطوبت نسبی و نیز اثر متقابل سه طرفه فاکتورها، فاقد اثر معنی‌دار است.

پدیده دفع رطوبت

اطلاع از منحنی همدمای رطوبتی در پدیدهٔ دفع، بیشتر در مرحلهٔ کاهش رطوبت بذر در فرایند خشک کردن و در برآورد سرعت و زمان خشک شدن و تعیین ظرفیت خشک‌کن حائز اهمیت است.

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس رطوبت تعادلی در پدیدهٔ دفع در جدول ۲ ارائه شده است.

طبق این جدول و شکل‌های ۲، ۳ و ۴ اثر سادهٔ فاکتورهای هیبرید، درجه حرارت و رطوبت نسبی محیط بر رطوبت تعادلی محصول در سطح ۱٪ معنی‌دار است. مقایسهٔ میانگین‌ها در مورد اثر هیبرید نشان می‌دهد که هیبرید ۷۰۴ با متوسط رطوبت تعادلی ۱۳/۵۷٪ (بر پایهٔ خشک) نسبت به هیبرید ۶۴۷ با متوسط رطوبت تعادلی ۱۳/۳۷٪ (بر پایهٔ خشک) از قابلیت حفظ و نگه‌داری آب بیشتر برخوردار است. این مقایسه نشان می‌دهد در وضعیتی که هر دو رقم، رطوبت یکسان داشته باشند و در محیطی محدود قرار گیرند، هیبرید ۷۰۴ رطوبت نسبی پایین‌تری ایجاد می‌کند که ناشی از فعالیت آبی و فشار بخار پایین‌تر است و این مسأله خود باعث افزایش عمر نگه‌داری بذر می‌شود.

مقایسهٔ میانگین‌ها در مورد اثر سادهٔ هریک از فاکتورهای درجه حرارت و رطوبت نسبی نشان می‌دهد که افزایش درجه حرارت در تمام سطوح، باعث کاهش معنی‌دار رطوبت تعادلی و برعکس، افزایش رطوبت نسبی در تمام سطوح، باعث افزایش معنی‌دار رطوبت تعادلی محصول می‌شود. البته مشاهدهٔ مقادیر در شکل‌ها بیانگر مؤثرتر بودن رطوبت نسبی در تغییرات رطوبت تعادلی بذر می‌باشد زیرا شیب تغییرات رطوبت تعادلی بذر در اثر تغییر رطوبت نسبی از شیب منحنی تغییرات رطوبت تعادلی محصول در اثر تغییرات دما بیشتر است.

اثر متقابل فاکتورهای درجه حرارت در رطوبت نسبی نیز طبق جدول ۳ بر رطوبت تعادلی بذر در سطح ۱٪ معنی‌دار است و میانگین‌های مربوطه در شکل ۶ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که افزایش دما باعث کاهش شیب متوسط منحنی‌های سیگموئیدی می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که در EMC ثابت، افزایش دما موجب افزایش رطوبت نسبی تعادلی ناشی از افزایش فعالیت آبی و فشار بخار در بذر می‌شود.

اثر متقابل هیبرید در دما، هیبرید در رطوبت نسبی و اثر سه طرفهٔ فاکتورها با توجه به جدول ۲ در سطح ۱٪ معنی‌دار نیست.

پدیدهٔ پسماند

تغییرات پسماند (تفاوت میان رطوبت تعادلی محصول در حالت جذب و رطوبت تعادلی در حالت دفع در ERH یکسان) برای هیبریدهای ۷۰۴ و ۶۴۷ در شکل‌های ۷ و ۸ برحسب دما ارائه شده است. این تغییرات نشان می‌دهد که برای هر دو رقم در دمای ثابت، افزایش رطوبت نسبی تا حدی موجب افزایش پدیدهٔ پسماند و سپس موجب کاهش آن می‌شود. افزایش درجه حرارت (به جز دمای $5^{\circ}C$) از ۱۵ تا ۵۵ درجه‌سانتی‌گراد باعث کاهش این پدیده می‌شود.

تعیین ضرایب مدل‌های غیر خطی و انتخاب مدل مناسب

پس از انطباق داده‌های به دست آمده برای هریک از هیبریدهای ۷۰۴ و ۶۴۷ در دامنهٔ دمای ۵ الی ۵۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۱۰ الی ۹۰ درصد بر روی معادلات هندرسن، چانگ- فاست و اسوین، ضرایب مشخص شد که در جدول ۳ ارئه شده است.

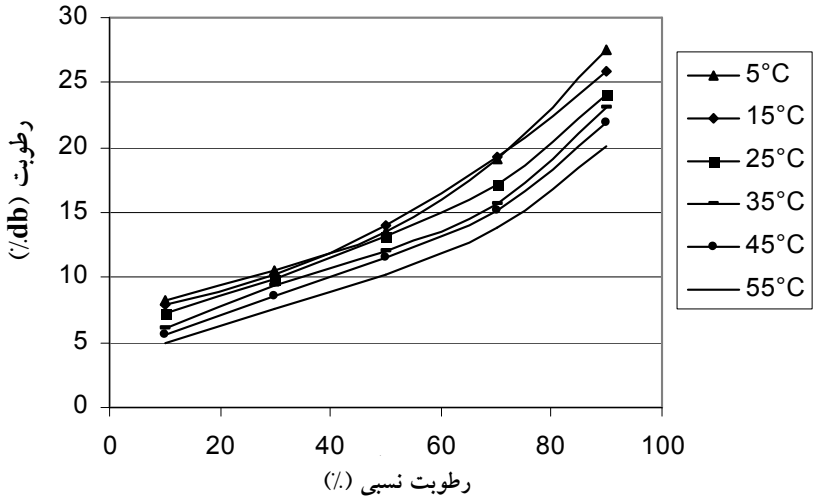
چنانچه در این جدول ذکر شده دیده می‌شود با توجه به مقادیر خطای استاندارد برآورد و انحراف نسبی میانگین برای

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]

جدول ۳. ضرایب معادلات هندرسن، چانگ- فاست و اسوین در پدیده‌های جذب و دفع رطوبت

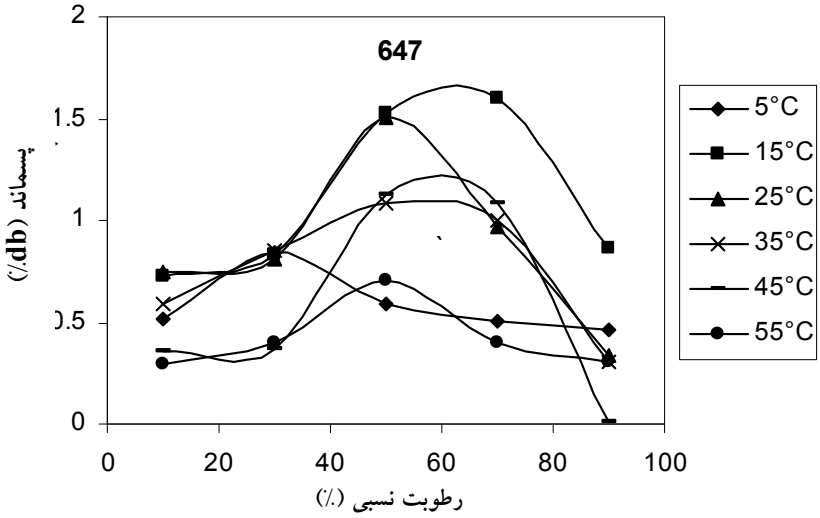
مدل	نوع پدیده	رقم	A	B	C	R^2	SEE	MRD
هندرسن	جذب	۶۴۷	۰/۷۹۷	۲/۰۶۰	۴۴/۶۴۹	۰/۹۹۴	۱/۲۲۴	۰/۰۸۳
		۷۰۴	۰/۷۱۷	۲/۰۷۵	۵۱/۴۱۲	۰/۹۹۵	۱/۱۵۶	۰/۰۵۲
	دفع	۶۴۷	۰/۸۴۷	۲/۱۶۴	۴۳/۱۱۲	۰/۹۹۴	۱/۰۴۶	۰/۰۷۰
		۷۰۴	۰/۷۱۷	۲/۱۴۶	۵۰/۹۱۸	۰/۹۹۴	۱/۰۵۵	۰/۰۶۸
چانگ- فاست	جذب	۶۴۷	۴۹۳/۱۸	۱۹/۰۵۶	۵۱/۲۶۹	۰/۹۹۶	۱/۱۱۲	۰/۰۶۹
		۷۰۴	۵۴۲/۹۵	۱۸/۷۸۲	۵۷/۹۸۵	۰/۹۹۶	۱/۰۶۴	۰/۰۶۲
	دفع	۶۴۷	۵۲۲/۷۳	۱۸/۳۰۵	۴۸/۳۸۷	۰/۹۹۶	۰/۹۶۵	۰/۰۵۶
		۷۰۴	۵۶۰/۷۳	۱۸/۰۱۱	۵۴/۹۹۱	۰/۹۹۶	۰/۹۸۲	۰/۰۵۶
اسوین	جذب	۶۴۷	۰/۱۳۶	-۰/۰۰۰۷۵	۳/۰۶۷	۰/۹۹۸	۰/۵۳۱	۰/۰۳۹
		۷۰۴	۰/۱۳۷	-۰/۰۰۰۷۱	۳/۰۷۹	۰/۹۹۸	۰/۵۳۳	۰/۰۳۸
	دفع	۶۴۷	۰/۱۴۸	-۰/۰۰۰۸۳	۳/۲۰۷	۰/۹۹۷	۱/۱۸۶	۰/۰۵۶
		۷۰۴	۰/۱۴۸	-۰/۰۰۰۷۸	۳/۱۸۶	۰/۹۹۷	۰/۷۰۵	۰/۰۴۳



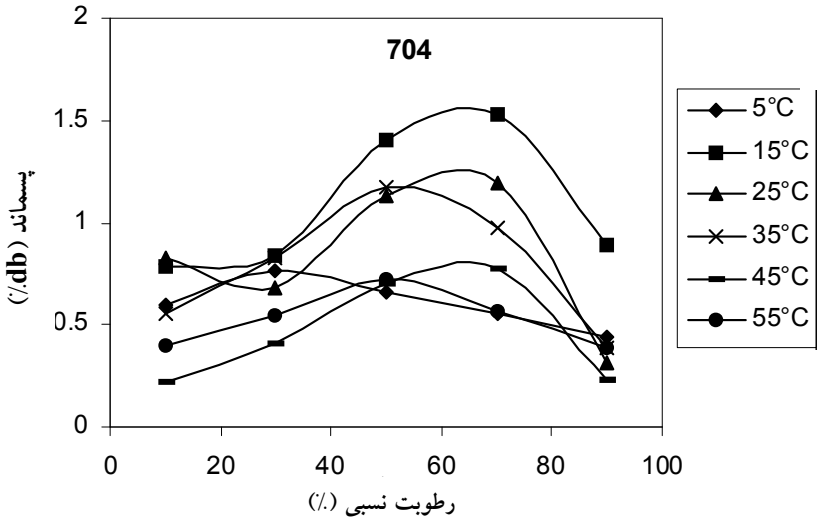
شکل ۶. مقایسه میانگین‌های رطوبت تعادلی در اثر تغییرات رطوبت نسبی محیط در پدیدهٔ دفع

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]



شکل ۷. تغییرات پسماند در هیبرید ۶۴۷ در اثر تغییرات دما و رطوبت نسبی



شکل ۸ . تغییرات پسماند در هیبرید ۷۰۴ در اثر تغییرات دما و رطوبت نسبی

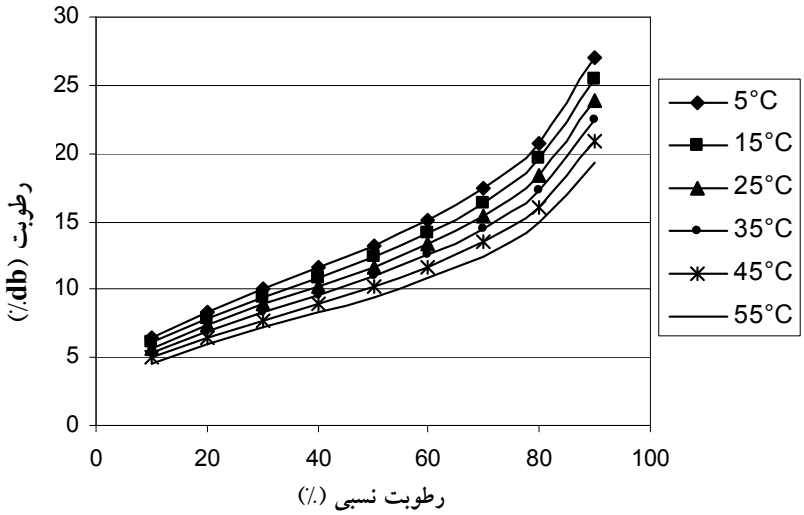
هیبرید ۷۰۴ در هر دوحالت جذب و دفع، رطوبت بهترین مدل، مدل اسوین می‌باشد و برای هیبرید ۶۴۷ بهترین مدل در حالت جذب، مدل اسوین است، درحالی که در حالت دفع رطوبت؛ مدل چانگ- فاست دارای کمترین خطا را دارد. منحنی‌های حاصل از مدل‌های منتخب در شکل‌های ۹ تا ۱۲ ارائه شده است.

بحث

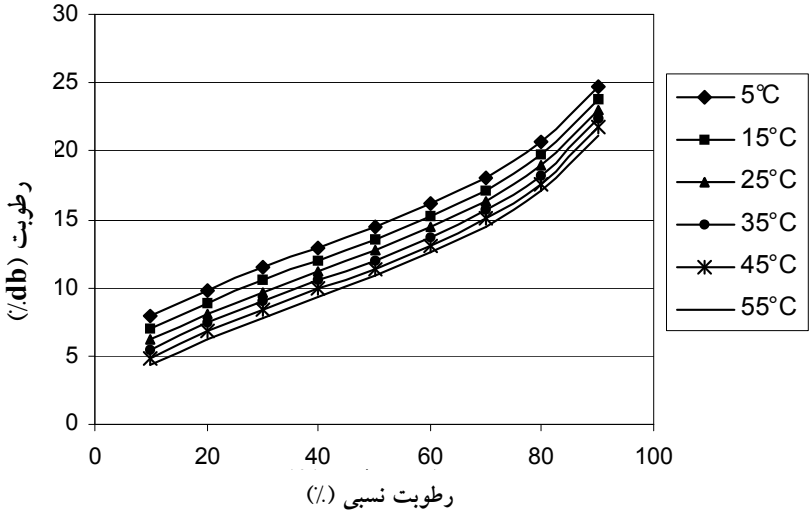
نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که رطوبت تعادلی بذر با افزایش درجه حرارت، کاهش و با افزایش رطوبت نسبی، به صورت تابعی سیگوئیدی افزایش می‌یابد که البته اثر رطوبت نسبی بر این تغییرات خیلی محسوس‌تر است. در آزمایش چن و همکار و هم‌چنین سوپید و همکار نتایج مشابه به دست آمده است (۴ و ۱۲).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

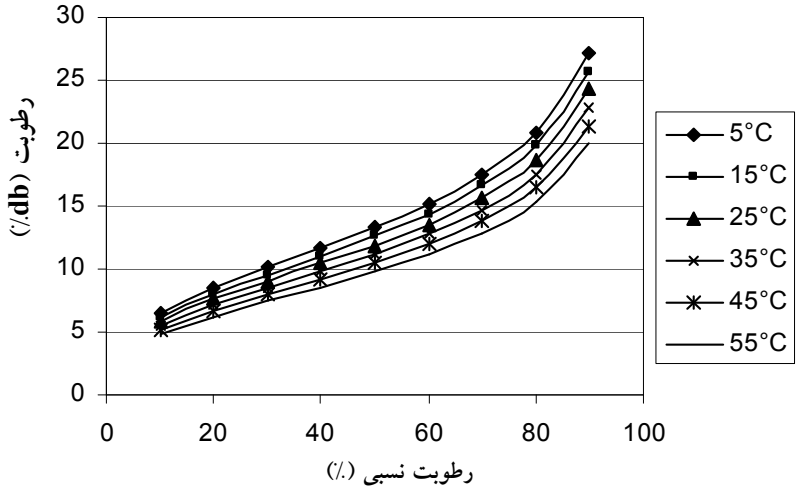
[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]



شکل ۹. منحنی‌های همدمای جذب هیبرید ۶۴۷ محاسبه شده بر اساس مدل اسوین پس از تعیین ضرایب



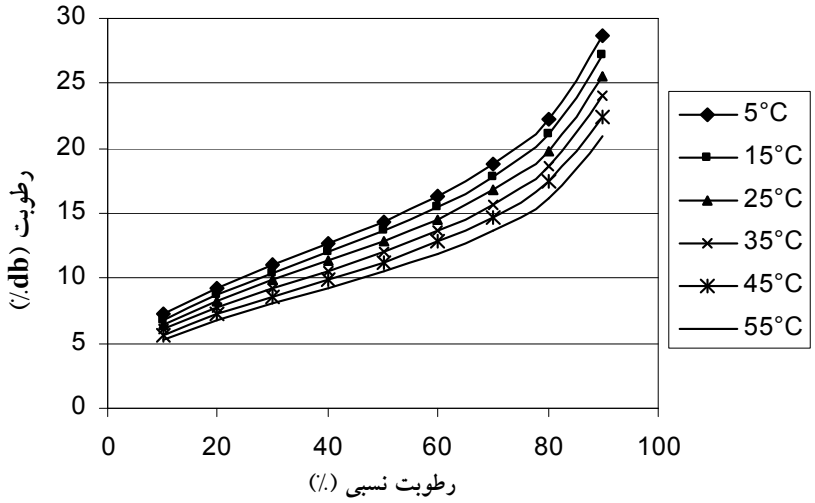
شکل ۱۰. منحنی‌های همدمای دفع هیبرید ۶۴۷ محاسبه شده بر اساس مدل چانگ- فاست پس از تعیین ضرایب



شکل ۱۱. منحنی‌های همدمای جذب هیبرید ۷۰۴ محاسبه شده بر اساس مدل اسوین پس از تعیین ضرایب

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]



شکل ۱۲. منحنی‌های همدمای دفع هیبرید ۷۰۴ محاسبه شده بر اساس مدل اسوین پس از تعیین ضرایب

هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که در شرایط محیطی یکسان، هیبرید ۷۰۴ نسبت به هیبرید ۶۴۷ رطوبت تعادلی بالاتر و در نتیجه قابلیت نگه‌داری آب بالاتری را دارد. به عبارتی دیگر چنانچه به منحنی‌ها مراجعه شود، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که در رطوبت تعادلی یکسان، هیبرید ۷۰۴، رطوبت نسبی تعادلی بالاتر ایجاد می‌کند که این مساله خود ناشی از افزایش فشار بخار و فعالیت آبی محصول است. بنابراین در شرایط یکسان از نظر محتوای رطوبتی، هیبرید ۷۰۴ می‌تواند از دوام و قابلیت نگه‌داری بهتری برخوردار باشد.

پدیدهٔ پسماند که باعث ایجاد منحنی‌های جذب و دفع رطوبتی می‌شود با توجه به نتایج، با افزایش دما از $15^{\circ}C$ میزان آن کاهش پیدا می‌کند و غالباً در رطوبت نسبی ۱۰ و ۹۰ درصد، میزان آن در طول تغییرات رطوبت نسبی به حداقل خود می‌رسد. نتایج حاصل از بررسی چن و همکاران نیز مؤید این مطلب است (۴).

مقایسهٔ مدل‌های غیر خطی با ضرایب تصحیح شده، نشان می‌دهد که مدل اسوین از میان مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش، از دقت بیشتری برای هیبرید ۷۰۴ در هر دو پدیدهٔ جذب و دفع رطوبت برخوردار است در حالی که برای هیبرید ۶۴۷ مدل اسوین تنها برای برآورد رطوبت تعادلی جذب، دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. مدل برتر در پدیدهٔ دفع برای این هیبرید، مدل چانگ- فاست است. سوپید و همکار نیز رفتار ارقام مختلف را در انطباق بر مدل‌های موجود، متفاوت از یکدیگر گزارش کردند که البته در اغلب موارد، مدل هندرسن به عنوان بهترین مدل معرفی شده است (۱۲).

نتیجه‌گیری

۱. با استفاده از منحنی‌های ارائه شده در این پژوهش (منحنی‌های ۹ تا ۱۲) و با استفاده از مدل‌های منطبق شده برای هیبریدهای ۷۰۴ و ۶۴۷ می‌توان رطوبت بذر را در شرایط محیطی متفاوت به دست آورد و با کنترل عوامل محیطی، رطوبت بذر را تا حد مطلوب و مورد نظر تغییر داد.

۲. با توجه به این که مطالعات نشان داده‌اند که در رطوبت نسبی کمتر از ۷۰٪ (که برای هیبرید ۷۰۴ در پدیدهٔ جذب و دفع به ترتیب رطوبت تعادلی معادل ۱۵/۷۵ و ۱۷/۱۵ درصد برپایه خشک و برای هیبرید ۶۴۷ در پدیده‌های جذب و دفع به ترتیب رطوبت تعادلی معادل ۱۵/۵۴ و ۱۷/۰۵ درصد بر پایه خشک ایجاد می‌کند) از فعالیت کپک‌ها جلوگیری می‌شود و نیز با توجه به این که کاهش رطوبت تودهٔ بذر تا حد خیلی پایین، مستلزم صرف انرژی خیلی زیاد است، حتی‌الامکان سعی شود مطالعه‌ای دقیق در خصوص حد بحرانی رطوبت بذر به منظور نگه‌داری سالم آن صورت گیرد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]

منابع مورد استفاده

۱. زمردیان،ع. و ر.توکلی. ۱۳۸۳. دستیابی به منحنی‌های تعادلی و پیشنهاد مدل ریاضی مناسب برای پیش‌بینی رطوبت تعادلی برای سه رقم پستهٔ ایرانی. علوم کشاورزی ایران ۳۵ (۲):۳۷۹ –۳۹۲.

2. Anon. 1983. Maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions. Annual book of ASTM standards. Standard E 104. Amer. Soc. Testing and Materials, Philadelphia.
3. Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema and C. W. Hall. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. AVI Pub., Van Nostrand, Reinhold.
4. Chen, C. and R. Vance Morey. 1989. Equilibrium relative humidity (ERH) relationships for yellow-dent corn. Trans. ASAE 32(3) : 999-1006.
5. Chen, C. and R. Vance Morey. 1989. Comparison of four EMC/ERH equations. Trans. ASAE 32(3) : 983-990.
6. Christensen, C. M. and H. H. Kaufman. 1974. Storage of cereal grains and their products. 2nd ed., AACC, St. Paul, MN.
7. Copeland, L. O. and M. B. McDonald.1995. Seed Science and Technology. 3rd ed., Chapman and Hall, USA.
8. Lewis, M. J. 1990. Physical Properties of Food Processing Systems. Ellis Horwood, UK.
9. Neuber, E. E. 1980. Critical considerations of moisture sorption isotherms for cereals. ASAE Paper No. 80-3015. St. Joseph, MI, ASAE.
10. Perry, R. H. and D. Green. 1984. Perry's Chemical Engineer's Handbook. 6th ed., McGraw Hill Pub., USA.
11. Singh, R. P. and D. R. Heldman. 1993. Introduction to Food Engineering. 2nd ed., Harcourt Brace and Company, USA.
12. Sopade, P. A. and E. S. Ajisegiri. 1994. Moisture sorption study on Nigerian foods: maize and sorghum. J. Food Process Eng. 17(1): 33-56.
13. Thompson, T. L. 1972. Temporary storage of high-moisture shelled corn using continuous aeration. Trans. ASAE 15: 333-337.
14. Tuite, J. and G. H. Foster. 1963. Effect of artificial drying on the hygroscopic properties of corn. Cereal Chem. 40: 630-637.
15. Tuite, J., C. Koh-Knox, R. Stroshine, F. A. Cantone and L. F. Bauman. 1985. Effect of physical damage to corn kernels on the development of *Penicillium* species and *Aspergillus flavus* in storage. Phytopathol. 75: 1137-1140.
16. Young, J. H. 1976. Evaluation of molds to describe sorption equlibrium moisture content isotherm. Trans. ASAE 9 (1): 21-30.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.17.4]