

بررسی تأثیر نرخ خشک شدن و طول دوره‌ی استراحت‌دهی در خشک کردن شلتوک به روش لایه نازک

رحمت‌الله اشتواد^۱، داود کلانتری^{۲*}، سیدجعفر هاشمی^۳، همت‌اله پیردشتی^۴

۱- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲-۳- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
* نویسنده مسئول (dkalantari2000@yahoo.com)
۴- دانشیار پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۷

واژه‌های کلیدی

استراحت‌دهی
جذب رطوبت
خشک کردن
شلتوک
نرخ ضریب نفوذ موثر

چکیده

با توجه به اهمیت فرایند خشک کردن شلتوک در فرآوری برنج و به منظور به دست آوردن زمان بهینه برای رسیدن به تعادل رطوبتی در مرحله‌ی استراحت‌دهی، در کار تحقیقاتی حاضر تأثیر دماهای مختلف خشک کردن (۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و مدت زمان خشک شدن دانه‌های شلتوک چهار رقم برنج نعمت، ندا، پژوهش و پردیس در گستره‌ی زمانی ۵/۸ تا ۸ ساعت به روش طرح آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی و در ۳ تکرار مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج بدست‌آمده، شیب تغییرات ضریب نفوذ موثر (K_1)، در مراحل اولیه استراحت‌دهی (پس از اتمام گرمادهی تا یک ساعت استراحت) بسیار بیشتر از مراحل بعدی استراحت‌دهی (از یک ساعت تا ۲ ساعت استراحت‌دهی) می‌باشد. همچنین مقدار عددی ضریب نفوذ موثر برای ارقام ندا و نعمت که از نظر ژنوتیپ جزو یک خانواده محسوب می‌شوند، بزرگتر از ارقام پژوهش و پردیس به دست آمد. طبق نتایج بدست‌آمده در این تحقیق، زمان ۱ ساعت استراحت‌دهی پس از خروج از خشک‌کن برای خشک کردن لایه نازک در دمای کمتر از ۵۰ درجه سلسیوس و زمان ۲ ساعت استراحت‌دهی برای دماهای بالاتر از ۵۰ درجه سلسیوس توصیه می‌شود. سرعت جذب و دفع رطوبت سطحی در دوره استراحت‌دهی، تأثیر مستقیمی بر شکستگی دانه برنج دارد.

مقدمه

در فرآیند تبدیل و فرآوری برنج، مرحله‌ی خشک کردن مرحله‌ی بسیار حساسی محسوب می‌شود، به طوری که مهمترین عامل ضایعات برنج در مرحله‌ی پس از برداشت ناشی از خشک کردن نادرست آنهاست (Kunze, 1979). چنانچه در حین پایین آوردن درصد رطوبت شلتوک دو پارامتر دما و زمان خشک کردن به

درستی تنظیم نشوند، باعث ایجاد تنش‌های حرارتی ناخواسته گشته و بر کیفیت تبدیل شلتوک اثر منفی خواهد گذاشت (Kunze & Hall, 1965; Kunze, 1979).

ارتباط تنگاتنگ و پیچیده بین پارامترهای حیاتی در خشک کردن شلتوک از جمله دما و زمان خشک کردن، موجب پیدایش روابط و شیوه‌های مختلفی در

اجرای فرآیند خشک کردن شده است. طاهریان و پارسا ضمن حل معادلات مربوط به انتقال حرارت و جرم در شلتوک و مدل سازی دینامیکی فرآیند خشک کردن، مشخصات یک خشک کن بهینه را به منظور کاهش ضایعات، معرفی کردند که بر این اساس و طی ۲۲۰ دقیقه، رطوبت ۷۶۵ کیلوگرم شالی از ۲۴ به ۱۵ درصد رسید (طاهریان و پارسا، ۱۳۸۲). در مطالعه‌ی دیگر، زمردیان و علامه با بهره‌گیری از معادلات رطوبت تعادلی نیوتن و پیچ، ضخامت بهینه برای خشک کردن در شرایط لایه نازک را دو سانتی‌متر عنوان کرده‌اند (زمردیان و علامه، ۱۳۸۱).

طی فرآیند خشک کردن، دلایل مختلفی برای ایجاد ترک در دانه برنج ذکر شده است. عمده‌ی ترک‌های ایجاد شده در دانه برنج به صورت میکروسکوپی بوده و تا قبل از مرحله‌ی تبدیل خود را نشان نمی‌دهد. این ترک‌های ریز^۱ در اثر جذب و دفع رطوبت سطحی در دانه ایجاد شده و در اثر فشارهای مکانیکی وارد بر دانه برنج در مرحله‌ی تبدیل به ترک‌های بزرگ‌تر^۲ قابل رویت تبدیل می‌شوند. در بررسی عوامل فیزیکی به وجود آورنده‌ی ترک در دانه برنج، عوامل متعددی مانند ایجاد تنش کششی در سطح دانه برنج و تنش فشاری در مرکز دانه در اثر گرادیان حرارتی بین سطح و مرکز دانه در حین خشک کردن (به علت دمای بیشتر در سطح دانه) و جذب مجدد رطوبت سطحی توسط دانه پس از مرحله حرارت دهی و نیز شرایط نگهداری پس از خشک شدن یا دوره‌ی استراحت (تمپرینگ) تاثیر گذار هستند (Fan et al., 2000).

لذا با توجه به اهمیت دوره استراحت‌دهی در کاهش ضایعات برنج و به منظور به دست آوردن زمان بهینه برای رسیدن به تعادل رطوبتی در مرحله‌ی استراحت‌دهی، چهار رقم از ارقام اصلاح شده (نعمت، ندا، پژوهش و پردیس) انتخاب و مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در ادامه تاثیر نوع رقم، نسبت وزنی پوسته به وزن کل دانه، دمای خشک کردن و طول دوره استراحت‌دهی در تعیین خصوصیات حرارتی و انتقال جرم برنج‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت طول مدت زمان مورد نیاز استراحت‌دهی دانه پس از خشک کردن و مقدار بهینه آن معرفی شده است.

مواد و روش‌ها

برنج‌های مورد استفاده در این تحقیق از ارقام نعمت، ندا، پژوهش و پردیس (از ارقام اصلاح شده و پر محصول) انتخاب گردید (شکل ۱). مشخصات ارقام مورد استفاده به طور خلاصه به شرح زیر است:

رقم نعمت: اصلاح شده در سال ۱۳۷۴ با عملکرد بالای حدود ۷۴۲۶ کیلوگرم در هکتار، طول متوسط دانه ۸/۱۵ میلی‌متر و عرض دانه ۱/۷۸ میلی‌متر (زمانی و علیزاده، ۱۳۸۶).

بنابراین استراحت‌دهی مرحله‌ای مهم پس از خشک کردن برنج می‌باشد که طی آن فرصت کافی داده می‌شود تا تعادل دمایی و رطوبتی سطحی و میان‌بافتی دانه به وجود آید. اهمیت مرحله استراحت‌دهی و مدت زمان این دوره به این دلیل است که بسیاری از ترک‌های به وجود آمده در دانه برنج بلافاصله پس از خشک شدن ظاهر نشده، بلکه در مرحله‌ی پس از خشک کردن و در دوره استراحت‌دهی شروع به نمایان شدن می‌کنند

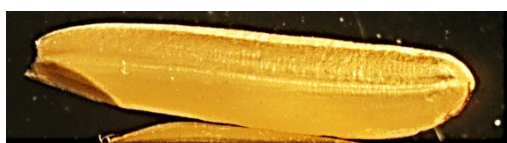
¹ Fissure

² Crack

³ Head Rice Yield: HRY

عملکرد این رقم بالغ بر ۶/۶۵ تن در هکتار عنوان شده است (نعمت‌زاده و اولادی، ۱۳۹۰).

رقم پردیس: دارای مشخصات فیزیکی نزدیک به رقم پژوهش بوده (معرفی شده در سال ۱۳۸۹) و متوسط عملکرد آن بیش از ۵ تن در هکتار می‌باشد (نعمت‌زاده و اولادی، ۱۳۹۰).



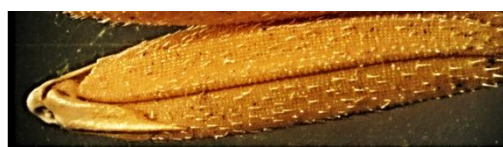
نعمت



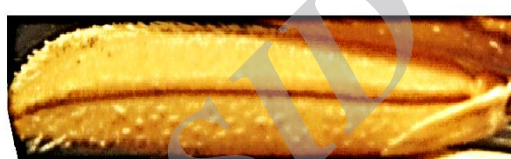
ندا

رقم ندا: دارای بیشترین سطح زیر کشت بین ارقام پر محصول برنج در استان مازندران با طول ۷ تا ۹/۵۹ میلی‌متر و عرض متوسط ۱/۹۵ میلی‌متر. متوسط عملکرد این رقم حدود ۷/۵ تن شلتوک در هکتار می‌باشد (زمانی و عزیزاده، ۱۳۸۶).

رقم پژوهش: از ارقام اصلاح شده در سال ۱۳۸۹، طول دانه ۶/۹ و عرض دانه ۱/۹ میلی‌متر است.



پژوهش



پردیس

شکل ۱- تصویر استریومیکروسکوپی از ارقام مورد تحقیق

(Korea) با دقت ۰/۰۱ گرم استفاده شد. سپس رطوبت نمونه‌ها در ۹ مرحله در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه، بلافاصله پس از خروج از آون تا ۲ ساعت پس از خروج اندازه‌گیری گردید.

طبق استاندارد انجمن مهندسان کشاورزی آمریکا^۲، در خشک کردن غلات به روش لایه نازک مواد باید به طور کامل در معرض هوای خشک قرار گرفته و دارای ضخامت یکنواخت باشند، به طوری که ضخامت لایه مواد از ضخامت سه لایه دانه غله مربوطه تجاوز نکند (ASAE S448, 1998). در شرایط خشک کردن به روش بستر نازک، معمولاً دبی جرمی هوای عبوری از دانه‌ها آنقدر بالاست که تغییر رطوبت و دمای هوای خروجی از خشک‌کن به شرط ناچیز بودن اتلاف حرارتی از دیواره‌های خشک‌کن به طور بسیار جزئی تغییر می‌کند.

برای بررسی و اندازه‌گیری ترک‌های ناشی از تنش‌های حرارتی در مرحله خشک کردن و ترک‌های ایجاد شده در اثر جذب رطوبت محیطی در مرحله استراحت از یک دستگاه استریومیکروسکوپ^۳

رطوبت نمونه‌ها قبل از خشک کردن به روش باز آبیوشی^۱ به میزان 21 ± 1 درصد بر مبنای وزن خشک رسانیده شد (اشتواد و کلانتری، ۱۳۹۲). برای خشک کردن نمونه‌ها به روش بستر نازک از دستگاه آون آزمایشگاهی (فن‌آزما گستر. ساخت ایران) مجهز به سنسور دما (PID Controller (Atbin Mega 600 با دقت ۰/۵ درجه سلسیوس استفاده شد. نمونه‌ها به میزان مساوی برای هر ۴ رقم و در محفظه‌هایی به ابعاد 22×18 سانتی‌متر و با ضخامت لایه شلتوک ۳ تا ۵ میلی‌متر به خشک‌کن منتقل گردید. آزمایش‌ها طی سه مرحله تکرار و در ۴ دمای هوای داغ ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس صورت گرفت. مدت زمان خشک شدن در آون برای نمونه‌ها در گستره‌ی زمانی ۰/۵ تا ۸ ساعت در ۱۰ سطح شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ ساعت تعیین گردید. در هر یک از این بازه‌ها درصد رطوبت نمونه‌ها توسط رطوبت سنج دیجیتال (GMK-303/303RS, Korea) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری برحسب وزن خشک به روش توزین به کمک ترازوی دیجیتال (Jadever-Sky600،)

² American Society of Agricultural Engineers

³ Stereo Microscope

¹ Rewetting

برای تعیین رطوبت تعادلی دانه‌ها (M_e)، از استاندارد انجمن مهندسان کشاورزی آمریکا استفاده شد. در این استاندارد رطوبت تعادلی دانه‌ها بر اساس رطوبت نسبی (RH) توده هوای محیط اطراف دانه‌ها در موقعیت استراحت‌دهی و دمای محیط (T) تعیین می‌گردد (ASAE, 2000).

رابطه (۳)

$$M_e = \left(\frac{-\ln(1 - RH)}{4.127 \times 10^{-5}(T + 49.828)} \right)^{1/2.1191}$$

برای ساده‌تر کردن رابطه ۲، عبارت داخل تابع نمایی (ضریب زمان) به صورت نرخ ضریب نفوذ موثر (s^{-1}) تعریف شده است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۳). نرخ ضریب نفوذ موثر رطوبتی یا ثابت سرعت خشک شدن (K_1) پارامتر مهمی است که نشان می‌دهد آب با چه سرعتی بین قسمت‌های داخلی دانه (مغز دانه) و سطح خارجی دانه (پوسته) مبادله می‌شود.

رابطه (۴)

$$K_1 = \frac{\beta^2 D_{eff}}{r^2}$$

مزیتی که استفاده از K_1 نسبت به D_{eff} دارد، به دیمانسیون یا بعد آنها بر می‌گردد. به طوری که K_1 دارای دیمانسیون (s^{-1}) بوده و ملموس می‌باشد، در صورتی که D_{eff} دارای دیمانسیون m^2/s بوده و درک آن ساده نیست. برای تعیین عملی نرخ ضریب نفوذ موثر K_1 در مراحل مختلف آزمایش معمولاً از شیب نمودار "نسبت رطوبت- زمان" استفاده می‌شود. با مشتق‌گیری از رابطه ۲ خواهیم داشت:

رابطه (۵)

$$K_1 = -\frac{1}{MR} \left(\frac{\partial MR}{\partial t} \right)$$

برای تعیین رطوبت تعادلی در مرحله استراحت‌دهی از نرم‌افزار استاندارد EMC Calculator (2002) V.1.0 استفاده شد. نگارش این نرم‌افزار بر اساس چارت سایکرومتری چانگ-پی فاست تهیه شده است (Jia, 2006).

آزمایشگاهی مدل نیکن (Nikon SMZ 645) استفاده گردید. در این آزمایش، در دو مرحله (قبل از خشک کردن و پس از خشک کردن) ۵۰ عدد دانه به طور تصادفی از هر نمونه انتخاب شده و به دقت با دست پوسته‌ی شلتوک از آن جدا گردید. سپس دانه‌های پوست کنده شده توسط دستگاه استریومیکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفته و دانه‌های ترک خورده و شکسته شده تفکیک و شمارش شدند.

چنانچه مقاومت سطحی دانه نسبت به مقاومت داخلی دانه در مقابل انتقال رطوبت ناچیز باشد، قانون انتشار فیک برای جابجایی رطوبت در داخل دانه صادق خواهد بود. قانون دوم فیک برای انتشار (نفوذ) به صورت زیر تعریف می‌شود.

رابطه (۱)

$$\frac{\partial MC}{\partial t} = D_{eff} \cdot \nabla^2 MC$$

که در آن MC رطوبت لحظه‌ای (برحسب وزن خشک d.b)، t زمان بر حسب ثانیه، D_{eff} ضریب نفوذ موثر هیگروسکپی بر حسب $m^2 s^{-1}$ و ∇^2 عملگر مشتق جزئی مرتبه دوم است.

با فرض فرم استوانه‌ای شکل برای برنج‌های مورد مطالعه، و با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی $MC(r, 0) = M_0$ و $MC(r, \infty) = M_e$ ، حل رابطه ۱ به صورت یک سری نمایی با همگرایی سریع می‌انجامد که پس از گذشت اندک زمانی به سرعت همگرا شده و جمله اول آن برای تخمین نسبت رطوبت دانه (MR) کفایت می‌کند (عباسی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Singh & Heldman, 2009). در شرایط داده شده فوق، M_0 رطوبت در لحظه صفر و M_e رطوبت تعادلی دانه (برحسب وزن خشک d.b) می‌باشد.

رابطه (۲)

$$MR = \frac{(MC - M_e)}{(M_0 - M_e)} = A \cdot \exp\left(-\frac{\beta^2 D_{eff}}{r^2} t\right)$$

در این رابطه، MR نسبت رطوبت دانه (بی بعد) در زمان t (ساعت)، MC رطوبت لحظه‌ای (رطوبت در لحظه اندازه‌گیری برحسب وزن خشک d.b)، A ضریب ثابت (فاکتور شکل بی بعد) و β ریشه اول تابع بسل مرتبه صفر با مقدار عددی ۲/۴۰ می‌باشد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای دما و مدت زمان استراحت‌دهی بر روی ضریب نفوذ موثر از طرح آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار استفاده گردید. مقایسه میانگین‌ها به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت پذیرفت. برای این منظور از نرم‌افزار آماری SPSS.16 استفاده گردید. از آنجایی که داده‌های مربوط به نرخ ضریب نفوذ موثر K_1 بر حسب h^{-1} محاسبه شده بودند به دلیل کوچک بودن اعداد بدست‌آمده از تبدیل $\sin^{-1}\sqrt{x}$ استفاده شد. بنابراین مقادیر میانگین‌های مقایسه شده در جداول شامل داده‌های تبدیل شده می‌باشند. در نهایت منحنی‌های بدست‌آمده از نتایج این بخش توسط نرم‌افزار Excel رسم شد.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱، تجزیه

واریانس داده‌های بدست‌آمده تفاوت معنی‌داری برای تمامی عوامل اصلی یعنی ارقام برنج، دمای خشک کردن و زمان استراحت‌دهی و اثر متقابل عوامل یاد شده نشان می‌دهد $P < 0.01$. به دلیل نزدیک بودن دقایق ثبت رطوبت در زمان استراحت (بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای) و برای نشان دادن تمایز در تغییرات آن، داده‌های مربوط به زمان استراحت‌دهی در سه بازه‌ی زمانی: ۱- بلافاصله پس از خروج از خشک‌کن ۲- پس از یک ساعت مرحله استراحت‌دهی (تمپرینگ) و ۳- پس از دو ساعت استراحت‌دهی (تمپرینگ) تقسیم بندی گردید که به ترتیب با اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ مشخص شده‌اند. از معنی‌دار بودن اثر تمامی تیمارها بر روی نرخ ضریب نفوذ موثر K_1 می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر در دمای خشک کردن، مدت زمان استراحت‌دهی یا نوع رقم برنج، تغییر محسوسی در مقدار K_1 مشاهده خواهد شد.

جدول ۱- تجزیه واریانس مربوط به فاکتورهای رقم، دمای خشک کردن و زمان تمپرینگ بر روی ثابت K_1

میانگین مربعات (MS)	درجه آزادی (DF)	منابع تغییرات
$9/342E^{-7}$ ns	۲	تکرار (R)
$0/007$ **	۳	رقم (VAR)
$0/092$ **	۳	دمای خشک کردن (T)
$0/029$ **	۲	زمان تمپرینگ (TEMP)
$0/002$ **	۹	VAR×T
$3/824E^{-5}$ **	۶	VAR×TEMP
$0/001$ **	۶	T×TEMP
$5/717E^{-5}$ **	۱۸	VAR×T×TEMP
$1/882E^{-6}$ **	۹۴	خطا (Error)
	۱۴۴	کل (Total)

ns و ** به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ را نشان می‌دهد.

یکدیگر اختلاف معنی‌دار داشتند که با ترسیم منحنی‌های رطوبتی دلایل تغییر در فرآیندهای مذکور مورد بحث قرار خواهد گرفت.

اثر ساده مقایسه میانگین‌ها بر روی شیب ضریب نفوذ موثر K_1 در جدول ۲ آمده است. بر طبق نتایج بدست‌آمده از مقایسه میانگین‌ها، تمامی فاکتورهای موثر بر ثابت K_1 در سطوح یاد شده در این آزمایش با

جدول ۲- اثر ساده مقایسه میانگین‌ها بر روی ثابت K_1

منابع تغییرات			اندیس فرآیند
زمان تمپرینگ (TEMP)	دمای خشک کردن (T)	رقم (VAR)	
۰/۲۹۱۱ ^a	۰/۱۹۸۳ ^d	۰/۲۷۰۳ ^b	۱
۰/۲۵۲۴ ^b	۰/۲۵۰۷ ^c	۰/۲۷۸۸ ^a	۲
۰/۲۴۵۷ ^c	۰/۲۸۸۵ ^b	۰/۲۵۶۴ ^c	۳
-	۰/۳۱۴۶ ^a	۰/۲۴۶۷ ^d	۴

حروف مشترک لاتین در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ است.

VAR₁=Nemat, VAR₂=Neda, VAR₃=Pajouhesh, VAR₄=Pardis

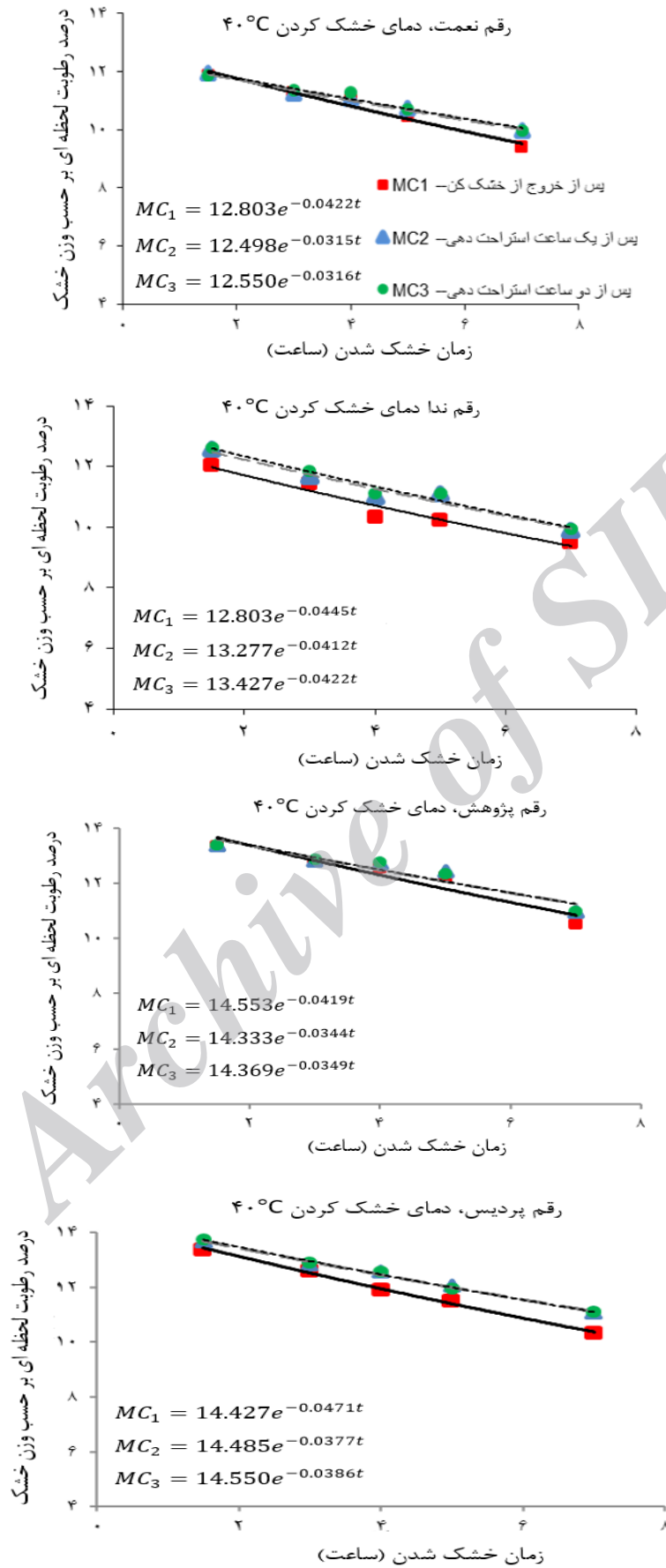
T₁=40°C, T₂=50°C, T₃=60°C, T₄=70°C

TEMP₁=No Relaxation, TEMP₂=1 hr Relaxation, TEMP₃=2 hr Relaxation

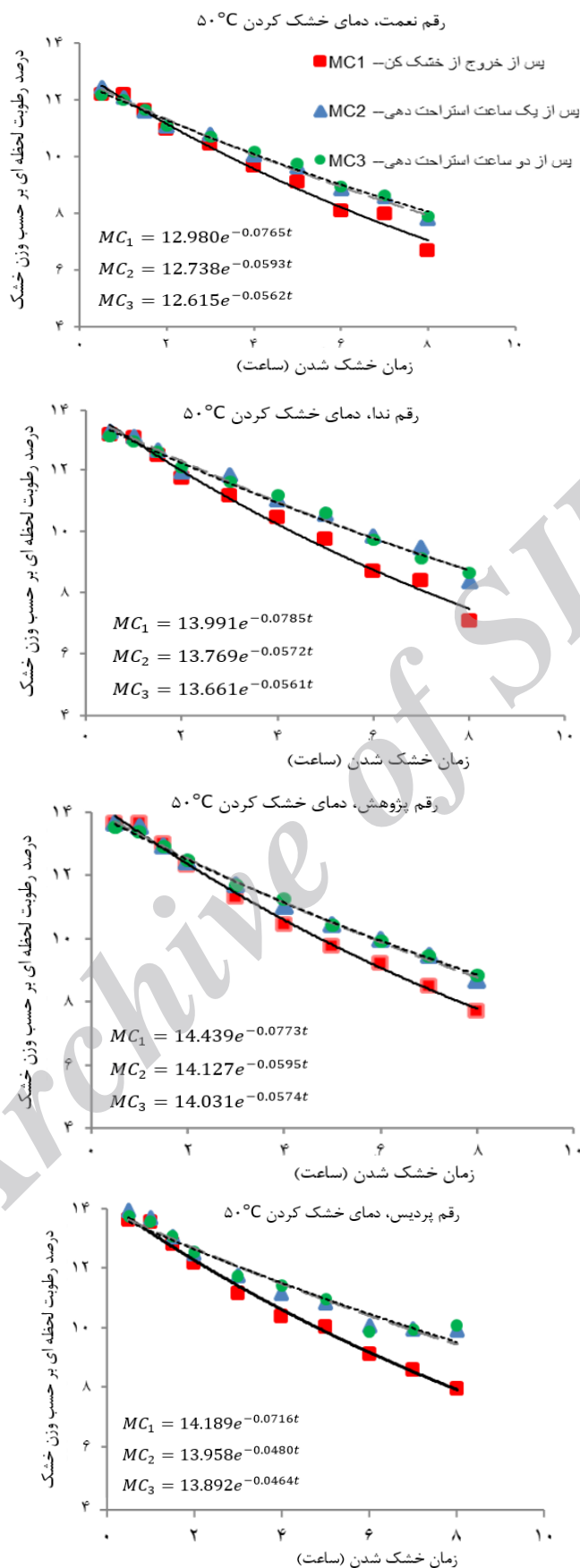
نتیجه‌ی دیگری که از نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های ۲ تا ۵ قابل استنتاج می‌باشد این است که در دماهای پایین منحنی‌های MC3 (دو ساعت استراحت‌دهی) و MC2 (یک ساعت استراحت‌دهی) تقریباً بر روی هم منطبق می‌باشند ولی با افزایش دمای خشک کردن و نیز افزایش زمان خشک کردن، فاصله‌ی بین MC2 و MC3 بیشتر می‌شود که این امر به دلیل بالاتر رفتن سرعت کاهش رطوبت یا سرعت خشک شدن همراه با افزایش دما و زمان خشک شدن می‌باشد. از همین رو می‌توان نتیجه گرفت که در دماها و زمان‌های بالاتر خشک کردن، نیاز به بازه زمانی بیشتری در مرحله استراحت‌دهی می‌باشد تا نمونه‌ها به تعادل حرارتی و رطوبتی برسند.

با توجه به رابطه ۲ و به منظور تعیین ثابت K_1 ، نمودار رطوبت- زمان برای خشک شدن لایه نازک بر اساس داده‌های بدست‌آمده از نتایج آزمایشات در ۱۰ بازه‌ی زمانی ۰/۵ تا ۸ ساعت و در ۴ سطح دما به صورت نمودارهای مجزا ترسیم گردید (شکل‌های ۲ تا ۵).

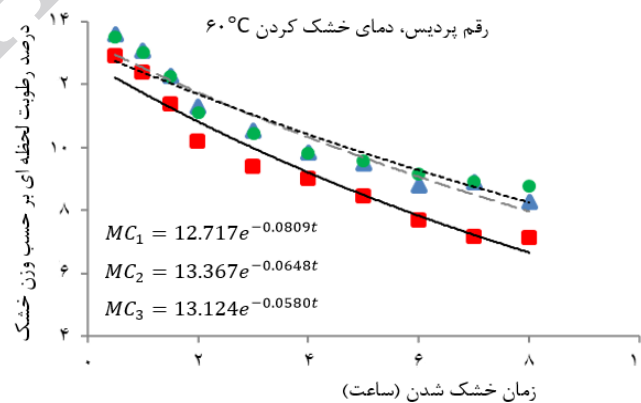
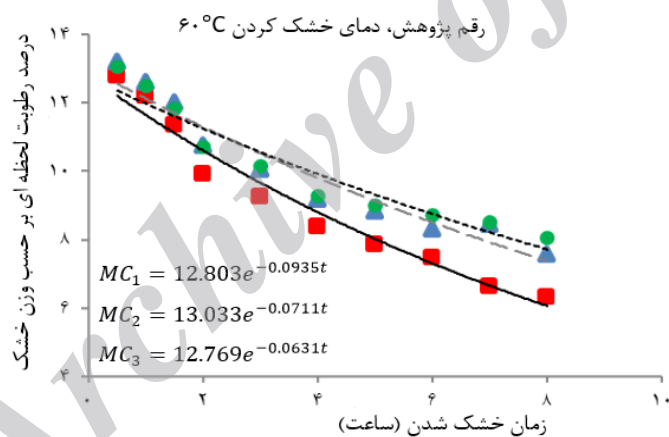
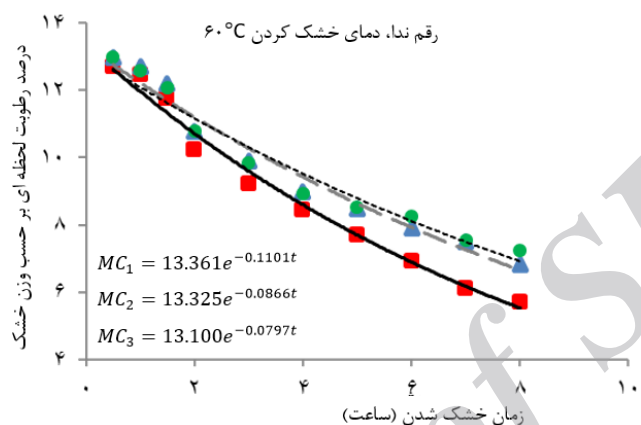
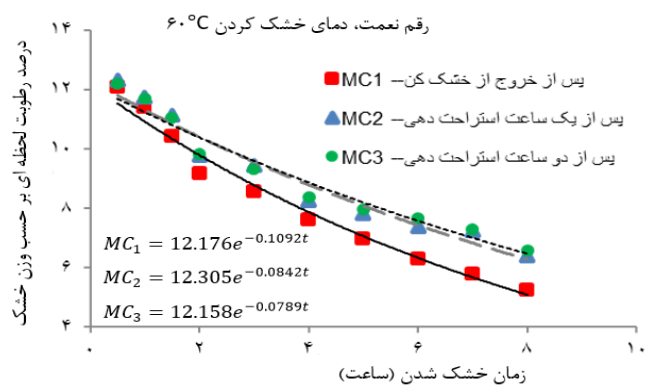
شکل‌های ۲ تا ۵ نشان می‌دهد که با افزایش دمای خشک کردن از ۴۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس، شیب درصد تغییر رطوبت برنج در مبنای خشک نسبت به زمان در مرحله استراحت‌دهی افزایش می‌یابد. به طوری که در دمای خشک کردن ۷۰ درجه سلسیوس (شکل ۵) شیب کاهش رطوبت نسبت به زمان به طور معنی‌داری بالاتر از بقیه دماها (شکل‌های ۲ تا ۴) قرار دارد. برای نمونه قدر مطلق شیب نمودار تغییر رطوبت نسبت به زمان در مرحله استراحت‌دهی (بلافاصله پس از خروج از خشک‌کن) برای رقم نعمت با زمان ۴ ساعت خشک شدن در ۴۰ درجه سلسیوس برابر با ۰/۴۳ و با زمان ۴ ساعت خشک شدن در ۷۰ درجه سلسیوس برابر با ۰/۹۵ می‌باشد. نتیجه فوق نشان‌دهنده این است که در فرآیند خشک کردن طی یک بازه زمانی ثابت، هر قدر دمای خشک کردن بالاتر باشد، میزان رطوبت بیشتری از سطح دانه خارج می‌گردد و این موضوع ممکن است باعث ایجاد تنش‌های حرارتی در لایه‌های با گرادیان دما و رطوبت بالاتر شده و در نهایت منجر به ایجاد ترک و شکستگی در دانه گردد.



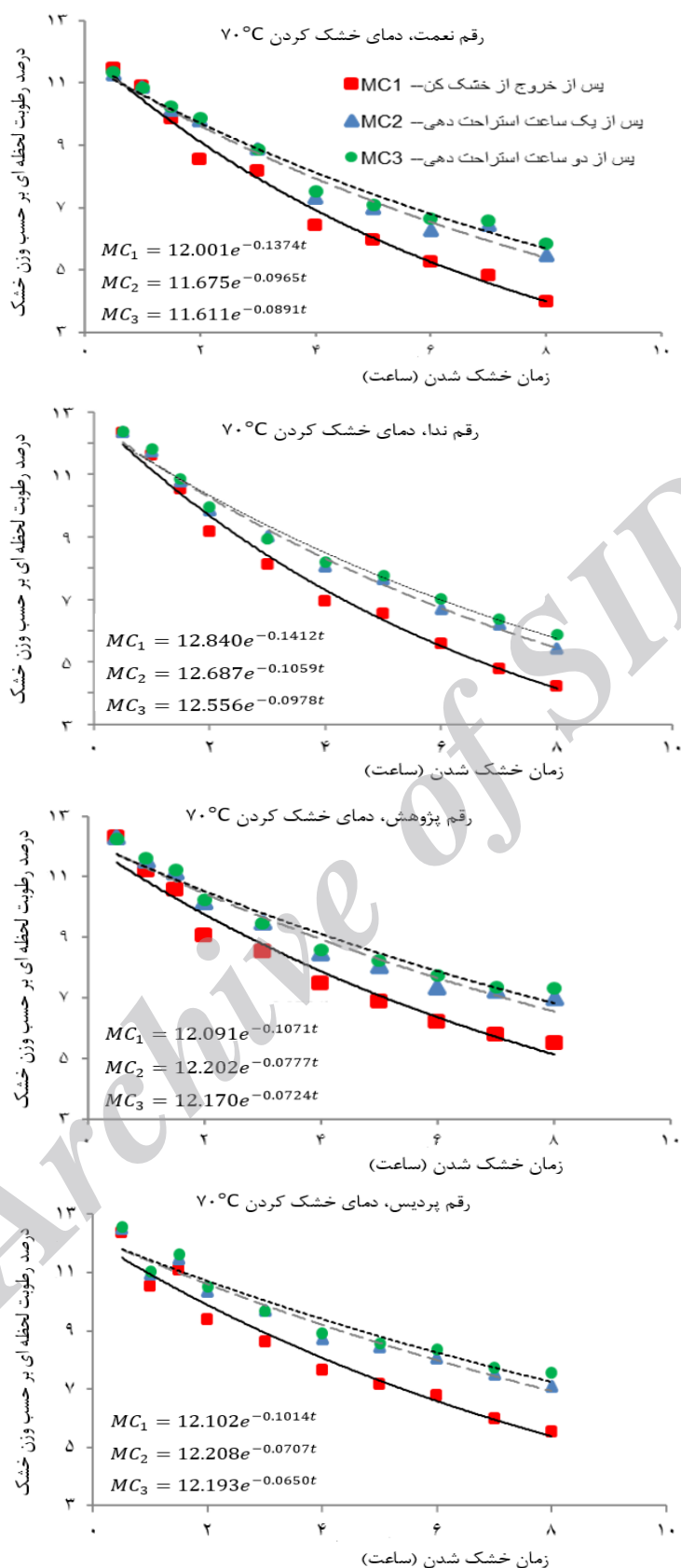
شکل ۲- رابطه زمان و دمای خشک کردن در دمای ۴۰ درجه برای رقم برنج در سه وضعیت



شکل ۳- رابطه زمان و دمای خشک کردن در دمای ۵۰ درجه برای ۴ رقم برنج در سه وضعیت



شکل ۴- رابطه زمان و دمای خشک کردن در دمای ۶۰ درجه برای ۴ رقم برنج در سه وضعیت



شکل ۵- رابطه زمان و دمای خشک کردن در دمای ۷۰ درجه برای ۴ رقه برنج در سه وضعیت

تغییرات ضریب نفوذ موثر در مراحل اولیه استراحت‌دهی (پس از گرمادهی تا پس از ۱ ساعت استراحت) بسیار بیشتر از مراحل بعدی استراحت‌دهی (از یک ساعت تا ۲ ساعت استراحت‌دهی) می‌باشد. نمونه‌ای از مقادیر عددی تغییرات K_1 در مرحله استراحت‌دهی اولیه (لحظه خروج از آون تا یک ساعت استراحت‌دهی) و در مرحله استراحت‌دهی ثانویه (فاصله زمانی یک تا دو ساعت استراحت‌دهی) برای رقم نعمت در جدول ۳ نشان داده شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که برای رسیدن به رطوبت تعادلی EMC در دماهای بالاتر خشک کردن، نیاز به زمان بیشتری برای استراحت دانه برنج است، چرا که در دماهای بالاتر خشک کردن، رطوبت دانه در سطوح خارجی‌تر دانه به شدت کاهش یافته، در نتیجه با توجه به طبیعت گند بودن دیفیوژن در داخل مواد جامد، مدت زمان بیشتری برای جابجایی رطوبت و به تعادل رسیدن رطوبت در داخل دانه مورد نیاز است.

رابطه‌ی نرخ ضریب نفوذ موثر و مراحل رطوبت سنجی

نمودار مربوط به نرخ ثابت خشک شدن و مراحل رطوبت سنجی در سه مرحله‌ی ۱ (پس از گرمادهی)، ۲ (پس از ۱ ساعت استراحت) و ۳ (پس از ۲ ساعت استراحت) در شکل ۶ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۶، با افزایش دما نرخ ضریب نفوذ موثر K_1 افزایش یافته ولی با افزایش زمان استراحت‌دهی (پس از خشک کردن) میزان K_1 سیر نزولی پیدا می‌کند. این تغییرات ناشی از کاهش دفع رطوبت سطحی دانه پس از خروج از خشک‌کن و طی مرحله‌ی استراحت‌دهی می‌باشد که با افزایش زمان استراحت‌دهی، به مرور زمان کاهش می‌یابد تا به رطوبت تعادلی (EMC) برسد. پس از این محدوده مقادیر جذب و دفع رطوبت سطحی دانه به تعادل رسیده و منحنی‌های مربوط به ضریب نفوذ موثر به حالت تعادلی نزدیک می‌گردند (شکل ۶).

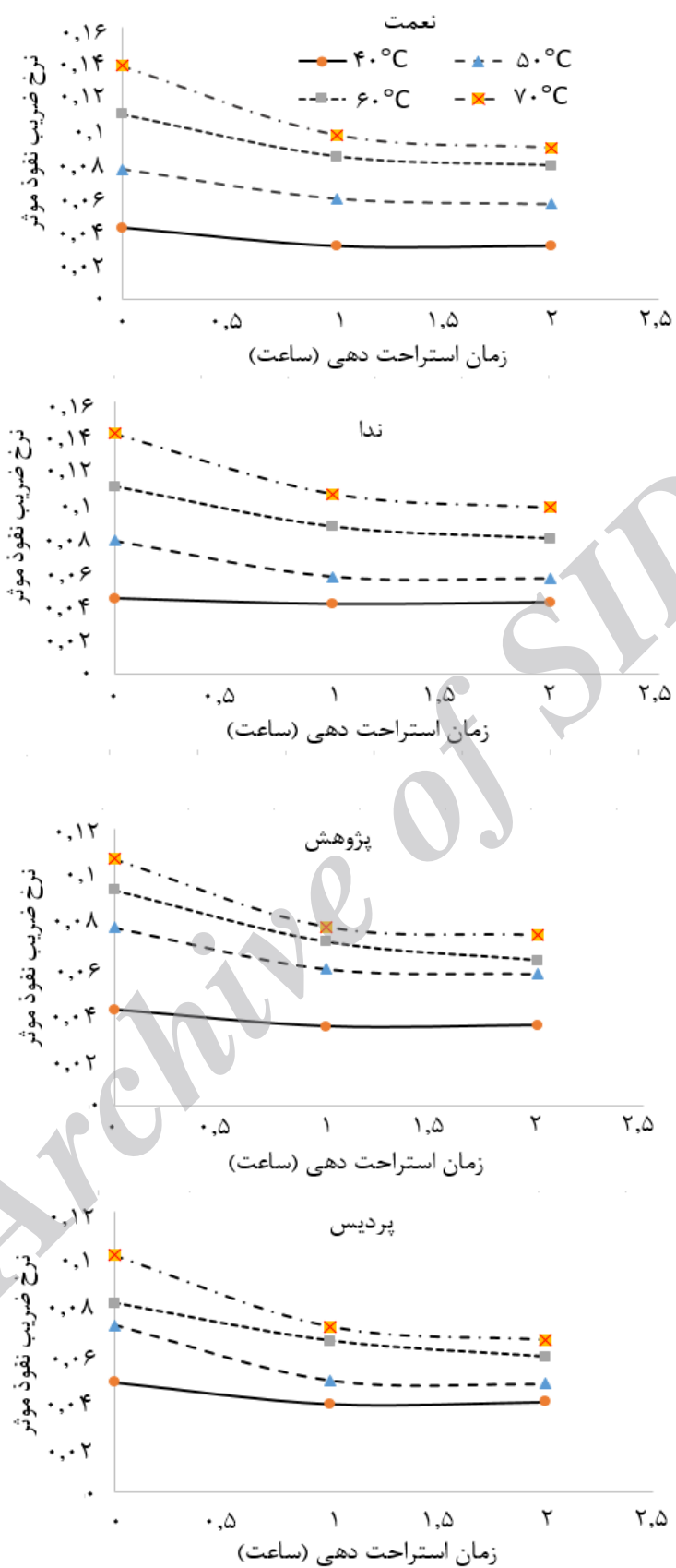
همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، شیب

جدول ۳- شیب تغییرات K_1 نسبت به زمان در مرحله استراحت‌دهی اولیه و ثانویه برای رقم نعمت

دمای خشک کردن			
۷۰°C	۶۰°C	۵۰°C	۴۰°C
۳٪	۲/۵٪	۲٪	۱٪
-۰/۸٪	-۰/۷٪	-۰/۲٪	۰
			مرحله استراحت‌دهی اولیه
			مرحله استراحت‌دهی ثانویه

این چهار رقم پرداخته شود، چرا که ضخامت پوسته می‌تواند در انتقال حرارت و انتقال جرم بین دانه و محیط بیرون موثر باشد. بدین منظور تعداد مشخصی از نمونه‌ها انتخاب و پس از جدایش پوست توسط دستگاه پوست‌کن آزمایشگاهی نسبت وزن پوسته به وزن کل برای این ۴ رقم به دست آمد که برای ارقام پردیس و پژوهش کمتر از ارقام نعمت و ندا به دست آمد (جدول ۴). همچنین در عکسبرداری‌هایی که پس از خشک شدن از آندوسپرم دانه این ۴ رقم گرفته شد، نسبت حجم این ناحیه که به صورت چروکیده در آمده برای ارقام پژوهش و پردیس بیشتر از ارقام نعمت و ندا بود.

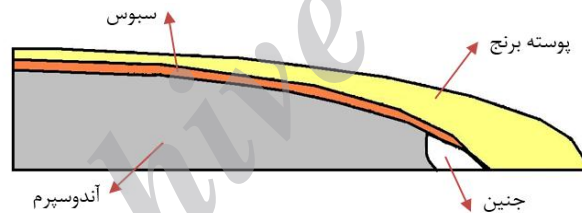
آنچه را که از نظر مقدار عددی برای نرخ ضریب نفوذ موثر K_1 در مقایسه‌ی ۴ رقم مورد مطالعه می‌توان ذکر کرد این است که ثابت K_1 برای دو رقم پژوهش و پردیس که از نظر ژنوتیپ جزو یک خانواده (یا سیسترلین) می‌باشند، بسیار نزدیک به هم و برای دو رقم نعمت و ندا نیز در یک محدوده نزدیک به هم قرار دارد. این نتیجه اهمیت نوع رقم در تعیین خصوصیات حرارتی و خصوصیات انتقال جرم در برنج را نشان می‌دهد که با نتایج ارائه شده در جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) مطابقت دارد. به همین دلیل در ادامه تحقیق تصمیم گرفته شد تا به بررسی نسبت ضخامت پوسته شلتوک به حجم کل دانه (شکل ۷) در



شکل ۶- تغییرات نرخ ضریب نفوذ موثر K_1 نسبت به زمان استراحت دهی و دماهای خشک کردن

بعد از یک ساعت استراحت‌دهی همچنان شیب ضریب نفوذ موثر منفی بوده و نشان‌دهنده ادامه داشتن دفع رطوبت سطحی از دانه است. برای دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، در نزدیکی ۲ ساعت استراحت‌دهی شیب ضریب نفوذ موثر از بین رفته و نشان‌دهنده عدم دفع رطوبت از دانه است، بدین معنی که استراحت‌دهی ۲ ساعت برای دمای خشک کردن بیش از ۵۰ درجه سلسیوس مناسب است. چنانچه در دماهای بالاتر از ۵۰ درجه سلسیوس بیش از ۲ ساعت صبر می‌کردیم، ممکن بود باز هم شیب ضریب نفوذ موثر اندکی افزایش یابد که نشان‌دهنده جذب مجدد رطوبت سطحی دانه است. از آنجایی که در تحقیق حاضر هدف پیدا کردن طول دوره استراحت‌دهی بهینه بود (یعنی جایی که شیب نمودار ضریب نفوذ موثر صفر می‌شد)، لذا در مقاله حاضر ضریب نفوذ موثر فقط برای دفع رطوبت ارائه شده است.

نکته دیگر در رابطه با نتایج نشان داده شده در شکل ۶ این است که در ابتدای خارج شدن شلتوک از داخل خشک‌کن همچنان به علت دمای بالای شلتوک نسبت به دمای محیط، پدیده دفع سطحی رطوبت ادامه می‌یابد. چنانچه دمای خشک کردن پایین‌تر از ۵۰ درجه سلسیوس باشد، پس از یک ساعت استراحت‌دهی دیگر پدیده دفع رطوبت سطحی از بین رفته و تغییرات ضریب نفوذ موثر ثابت خواهد شد (شیب نمودار صفر می‌گردد). به همین علت برای دماهای خشک کردن کمتر از ۵۰ درجه سلسیوس طول استراحت‌دهی ۱ ساعت مناسب می‌باشد. نکته جالب‌تر این که در دمای خشک کردن ۴۰ درجه سلسیوس، پس از یک ساعت استراحت‌دهی حتی شیب ضریب نفوذ موثر اندکی (بسیار جزئی) افزایش می‌یابد و این نشان‌دهنده جذب مجدد رطوبت سطحی از محیط توسط دانه است (شکل ۶)، با این پیام که دیگر استراحت‌دهی بیشتر از ۱ ساعت نیاز نیست. در دماهای خشک کردن بالاتر از ۵۰ درجه سلسیوس،



شکل ۷- نمایی از مقطع برش خورده یک دانه برنج

نرخ ضریب نفوذ موثر در مرحله استراحت‌دهی دارد. لذا در ادامه کار، نرخ ضریب نفوذ موثر ارقام مورد آزمون توسط دمای خشک کردن تعدیل و بهنجار^۱ شد تا روند تغییر ضریب نفوذ موثر در طی دوره استراحت‌دهی با وضوح بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. در این نمودارها نرخ ضریب نفوذ موثر از طریق رابطه ۶ نسبت به دمای خشک کردن تعدیل و بهنجار شده است.

جدول ۴- درصد نسبت وزنی پوسته به وزن کل دانه در چهار رقم مورد آزمون

رقم	درصد نسبت وزنی پوسته به وزن کل دانه
نعمت	۴۳/۱۵
ندا	۴۰/۸۱
پژوهش	۳۸/۶۲
پردیس	۳۴/۵۶

نتایج ارائه شده در شکل ۶ همچنان نشان می‌دهد که دمای خشک کردن تأثیر معنی‌داری بر روند تغییر

^۱ Normalized

رابطه (۶)

$$K_1^* = \frac{K_1}{aT - b} \quad a, b > 0$$

در این رابطه T دمای خشک کردن و نیز a و b ضرایب ثابت وابسته به رقم می‌باشند. مقادیر ضرایب a و b برای چهار رقم مورد آزمون در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵- مقادیر ضرایب ثابت a و b در رابطه (۶) برای چهار رقم برنج مورد

رقم ثابت	نعمت	ندا	پژوهش پردیس
a [1/(s °C)]	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۱۶ ۰/۰۰۱۳
b [1/s]	۰/۰۶۰۱	۰/۰۵۶۴	۰/۰۲۱۴ ۰/۰۰۸۶

پس از تعدیل و بهنجار کردن ضریب نفوذ موثر با دمای خشک کردن، تاثیر زمان استراحت‌دهی بر روی تغییرات ضریب نفوذ موثر بهنجار شده K_1^* در شکل ۸ برای چهار رقم مورد آزمون نشان داده شده است. در این نمودارها، تغییرات ضریب K_1^* پس از خروج از خشک‌کن تا زمان استراحت‌دهی ۱ ساعت اولیه دارای شیب بیشتری بوده و پس از آن شیب تغییرات K_1^* کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در مورد ضریب نفوذ موثر بهنجار شده برای هر چهار رقم مورد آزمون این است که تغییرات آن بدون توجه به رقم، از ۱/۲ در بدو خروج از خشک‌کن تا حدود ۰/۸۵ پس از ۲ ساعت استراحت‌دهی تغییر کرده است و این عدم وابستگی ضریب K_1^* نسبت به رقم قابل توجه است. البته به نظر می‌رسد آزمون‌های بیشتری با ارقام متعدد برنج لازم است تا این نتیجه به طور عموم برای کلیه ارقام برنج تایید گردد. طبق نتایج حاصل از این تحقیق، رابطه ۷ بین ضریب نفوذ موثر بهنجار شده K_1^* زمان استراحت‌دهی برای هر چهار رقم مورد آزمون برقرار است.

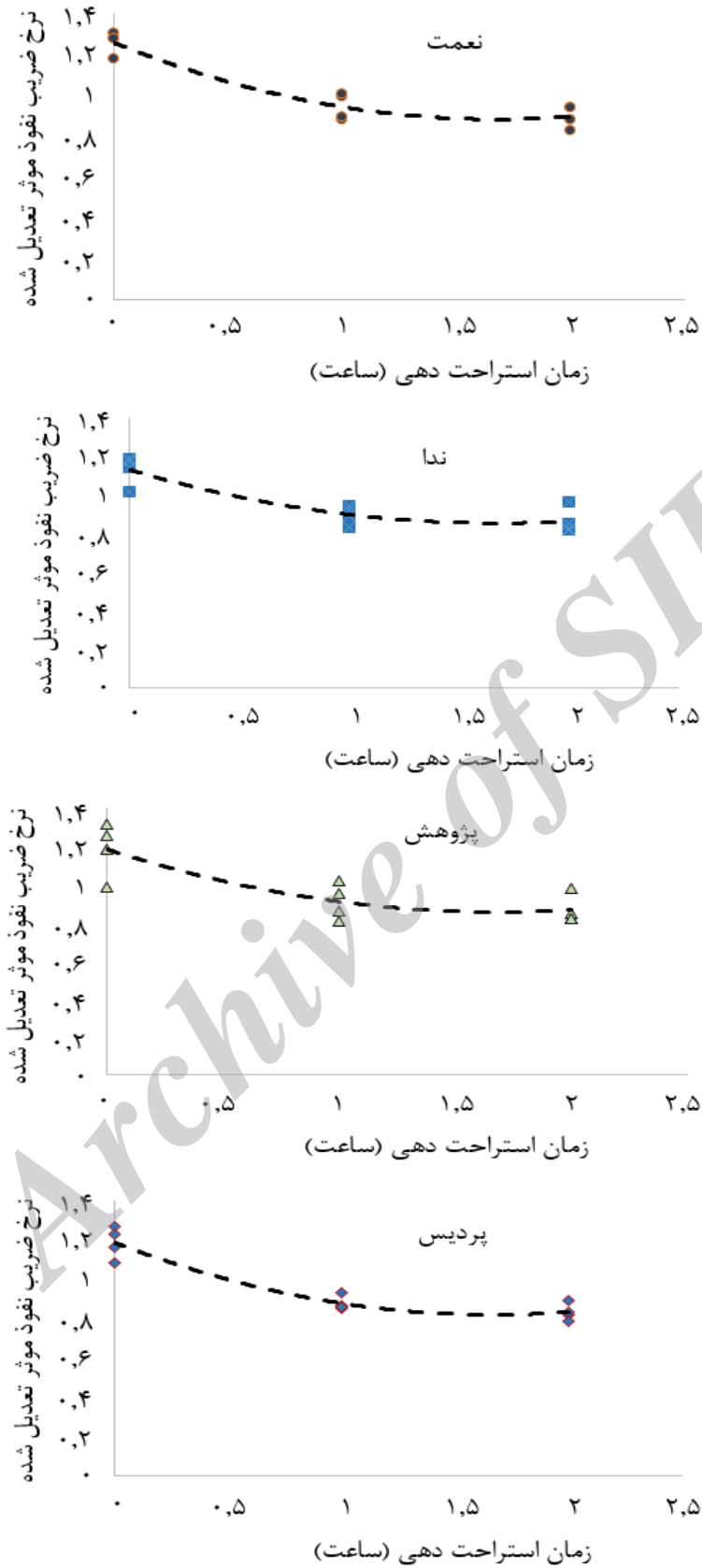
رابطه (۷)

$$K_1^* = 0.1212t_t^2 - 0.4051t_t + 1.1905$$

$$R^2 = 0.7981$$

در این رابطه t_t زمان استراحت‌دهی بر حسب ساعت می‌باشد.

همان طوری که در شکل ۶ نشان داده شده، ضریب نفوذ موثر برای ارقام آزمون شده و دماهای مختلف خشک کردن دارای منحنی‌های متفاوتی است. با تعدیل کردن ضریب نفوذ موثر (شکل ۸)، دیگر این تغییرات برای همه دماهای خشک کردن و همه ارقام یکسان شده است. به همین علت رابطه بدست‌آمده (۷) دارای اهمیت ویژه‌ای است. به طور مثال اگر قبلاً سوال می‌شد مقدار ضریب نفوذ موثر رقم نعمت در دمای خشک کردن ۴۵ درجه و پس از نیم ساعت استراحت‌دهی چقدر خواهد بود، پاسخ دقیقی نداشتیم. دو راه وجود داشت، یا آزمون تجربی برای این شرایط باید انجام می‌شد و یا میانگین‌گیری برای دو حالت نزدیکی که قبلاً آزمون شده بود. ولی اکنون با توجه به روابط (۴)، (۶) و (۷) به راحتی می‌توان ضریب نفوذ موثر در هر شرایط را به دست آورد.



شکل ۸- تغییرات نرخ ضریب نفوذ موثر بهنجار یا نرمال شده K_1^* نسبت به زمان استراحت‌دهی برای چهار رقم مورد آزمون

زمان بهینه برای استراحت‌دهی

با توجه به نتایج حاصل از آزمایشات تجربی و تجزیه و تحلیل نمودارهای رسم شده‌ی آن در شکل ۶ زمان ۱ ساعت استراحت‌دهی پس از خروج از خشک‌کن (طول دوره‌ی استراحت‌دهی) به عنوان بهترین شرایط برای خشک کردن لایه نازک در دمای کمتر از ۵۰ درجه سلسیوس به دست آمد.

برای دماهای بالاتر از ۵۰ درجه سلسیوس زمان ۲ ساعت استراحت‌دهی پس از خروج از خشک‌کن مناسب‌تر می‌باشد، زیرا در این فاصله زمانی دفع رطوبتی و حرارتی دانه با محیط به تعادل رسیده و شیب تغییرات K_1 از بین می‌رود. این مقدار با نتیجه گزارش شده در تحقیقات پیشین مانند Thakur و همکاران (۲۰۰۶) و Cnossen و همکاران (۲۰۰۱) که مدت زمان بین ۱ تا ۲ ساعت را برای روش خشک کردن دو مرحله‌ای پیشنهاد داده بودند، مطابقت دارد. در مطالعه‌ی دیگری توسط نصرنیا و همکاران (۱۳۹۱) ضمن بررسی طول دوره‌های مختلف عملیات استراحت‌دهی روی خواص کیفی برنج، نشان دادند که در شرایط خشک کردن ملایم؛ انجام عمل استراحت‌دهی معنی‌دار نمی‌باشد ولی در شرایط خشک کردن سریع، نیاز به عملیات استراحت‌دهی از ۱۶۰ تا ۲۴۰ دقیقه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در فرآیند تبدیل و فرآوری برنج، اهمیت سیستم مدیریتی مناسب در مرحله‌ی استراحت برنج پس از خشک شدن و خروج از دستگاه خشک‌کن به هیچ وجه کمتر از انتخاب یک مدل صحیح و دستگاه خشک‌کن متناظر با آن نمی‌باشد. چرا که بسیاری از ترک‌های ایجاد شده در دانه برنج در مرحله‌ی استراحت‌دهی روی می‌دهند. دانه پس از خروج از خشک‌کن تا رسیدن به رطوبت تعادلی شروع به جذب رطوبت می‌کند که این زمان برای دماهای بالای خشک کردن بیشتر می‌باشد. با توجه به دمای خشک کردن بهینه، این زمان برابر با ۱ ساعت برای دمای خشک کردن کمتر از ۵۰ درجه سلسیوس و ۲ ساعت برای دمای خشک کردن بالای ۵۰ درجه سلسیوس توصیه می‌گردد. نتیجه بدست‌آمده در این تحقیق با

نتایج دیگر محققین مانند Dong و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت دارد. این محققین زمان بهینه ۱۲۰ دقیقه را برای استراحت‌دهی برنج رقم آکیتاکوماچی^۱ پیشنهاد دادند. طبق تحقیقات Li و همکاران (۱۹۹۹) استراحت‌دهی شلتوک در طی فرآیند خشک کردن باعث کاهش تنش در دانه و کاهش مدت زمان خشک کردن آن می‌شود. تحقیقات Kent (۱۹۸۲) نیز نشان داد که بدون در نظر گرفتن طول استراحت‌دهی مناسب در طی فرآیند خشک کردن شلتوک، رطوبت سطحی شلتوک به سرعت کاهش یافته و لایه بیرونی دانه چروکیده و منقبض می‌گردد. در نتیجه اختلاف فشار دانه در قسمت داخلی نسبت به سطوح بیرونی افزایش یافته و باعث ایجاد ترک در دانه می‌گردد. این ترک‌ها در فرآیند تبدیل و سفید کردن منجر به شکست دانه می‌شود. طبق تحقیقات Cnossen و همکاران (۲۰۰۰) توقف عملیات خشک کردن برای مدت محدود و خشک کردن مجدد باعث انتقال رطوبت از بخش مرکزی دانه به سطح شده و گرادیان رطوبتی داخل دانه را کاهش می‌دهد. به عقیده ایشان همین موضوع باعث خشک شدن یکنواخت‌تر شلتوک و کاهش شکست دانه می‌گردد. طبق تحقیقات Elbert و همکاران (۲۰۰۱) افزایش زمان استراحت‌دهی در بین زمان‌های متناوب خشک کردن به طور معنی‌داری باعث افزایش درصد تولید برنج سالم می‌گردد. همچنین Cnossen و همکاران (۲۰۰۱) برای خشک کردن برنج‌هایی با رطوبت بالا، طول دوره استراحت‌دهی برنج‌های دانه بلند را ۸۰ تا ۱۶۰ دقیقه و برنج‌های دانه متوسط را ۱۶۰ تا ۲۴۰ دقیقه در دمای خشک کردن ۶۰ درجه پیشنهاد داده‌اند، که با توجه به دانه بلند بودن برنج‌های مورد آزمون مطابقت خوبی بین نتایج بدست‌آمده در تحقیق حاضر با نتایج ایشان مشاهده می‌گردد.

¹ Akitakomachi

منابع

- ۱- اشتواد، ر. و کلانتری، د. ۱۳۹۲. تعیین برخی از خواص فیزیکی ارقام برنج‌های اصلاح شده ایرانی. نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۹(۱):۴۰-۴۹.
- ۲- عباسی، س.، مینایی، س. و خوش تقاضا، م. ه. ۱۳۹۳. بررسی سینتیک خشک شدن و انرژی مصرفی لایه نازک ذرت. نشریه ماشین‌های کشاورزی، ۴(۱):۹۸-۱۰۷.
- ۳- زمانی، ق. و علیزاده، م. ر. ۱۳۸۶. خصوصیات و فرآوری ارقام مختلف برنج ایران. جلد اول، انتشارات پلک. تهران، ۲۲۲ صفحه
- ۴- زمردیان، ع. و علامه، ع. ر. ۱۳۸۱. بررسی خشک شدن شلتوک به روش لایه نازک و تعیین ضخامت بهینه با به‌کارگیری یک خشک‌کن خورشیدی آزمایشگاهی با جریان جابه‌جایی آزاد. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۶(۴):۲۰۹-۲۱۷.
- ۵- طاهریان، ح. و پارسا، ا. ۱۳۸۲. مدل‌سازی دینامیکی فرآیند خشک شدن شالی جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی. چهارمین همایش ملی انرژی، ۲۱-۲۰ اردیبهشت ماه، تهران.
- ۶- نصرنیا، ا.، صادقی، م. و معصومی، ا. ۱۳۹۱. اثر شرایط خشک کردن و تمپرینگ بر شاخص سفیدشدگی برنج طی عملیات خشک کردن دو مرحله‌ای، نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، ۸(۱):۴۸-۴۰.
- ۷- نعمت‌زاده، ق. و اولادی، م. ۱۳۹۰. دستورالعمل زراعی رقم جدید برنج پردیس. پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری طبرستان. ساری، نشریه فنی ترویجی، ۳۰ صفحه.
- ۸- نعمت‌زاده، ق. و اولادی، م. ۱۳۸۹. دستورالعمل زراعی رقم جدید برنج پژوهش. پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری طبرستان. ساری، نشریه فنی ترویجی، ۳۰ صفحه.
- 9- ASAE. 1995. Standards D448 Dec93. Thin-layer drying of grain and crops St Joseph, MI.
- 10- Cnossen, A.G., & Siebenmorgen, T.J. 2000. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect on milling quality. Transaction of the ASAE, 43(6):1661-1667.
- 11- Cnossen, A.G., Siebenmorgen, T.J., Yang, W., & Bautista, C. 2001. An application of glass transition temperature to explain rice kernel fissure occurrence during the drying process. Drying Technology, 19(8):1661-1682.
- 12- Dong, R., Lu, Z.h., Liu, Z.h., Koide, Sh., & Cao, W. 2010. Effect of drying and tempering on rice fissuring analysed by integrating intra-kernel moisture distribution. Journal of Food Engineering, 97(2):161-167.
- 13- Elbert, G., Tolaba, M., & Suarez, C. 2001. Effects of drying conditions on head rice yield and browning index of parboiled rice. Journal of Food Engineering, 47(1):37-41.
- 14- Fan, J., Siebenmorgen, T.J., & Yang, W. 2000. A study of head rice yield reduction of long- and medium-grain rice varieties in relation to various harvest and drying conditions. Transactions of the ASAE, 43(6):1709-1714.
- 15- Jia, C. 2006. Equilibrium Moisture Content Calculator V1.0 (EMC Calculator), Available at <http://uarpp.uark.edu/resources.htm> (Visited 20 May 2011).
- 16- Kent, N.L., & Evers, A.D. 1994. Technology of cereals: An introduction for students of food science and agriculture. 4th Edition, Woodhead Publishing Co., U.K.
- 17- Kunze, O.R., & Hall, C.W. 1965. Relative humidity changes that cause brown rice to crack. Transaction of the ASAE, 8(3):396-399.
- 18- Kunze, O.R. 1979. Fissuring of the rice grain after heated air drying. Transaction of the ASAE, 22(5):1197-1201.
- 19- Li, Y.B., Cao, C.W., Yu, Q.L., & Zhong, Q.X. 1999. Study on rough rice fissuring during intermittent drying. Drying Technology, 17(9):1779-1793.
- 20- Sharma, A.D., & Kunze, O.R., 1982. Post-drying fissure developments in rough rice. Transactions of the ASAE, 25(2):465-468.
- 21- Singh, P.R., & Heldman, D.R. 2009. Introduction to food engineering. Fourth Edition. Elsevier Publishing Co., USA.
- 22- Thakur, A.K., & Gupta, A.K., 2006. Two stage drying of high moisture paddy with intervening rest period. Energy Conversion and Management, 47:3069-3083.

Influence of Drying Rate and Tempering Period On the Paddy Breakage in The Thin Layer Drying Method

Rahmatollah Eshtavad¹, Davood Kalantari^{2*}, SeyedJafar Hashemi³,
Hematollah Pirdashti⁴

1-MSc. Graduated Student, Department of Biosystems Engineering, Sari Agriculture Sciences & Natural Resources University (SANRU), sari, Iran.

2,3-Assistance Professor, Department of Biosystems Engineering, Sari Agriculture Sciences & Natural Resources University (SANRU), sari, Iran.

* Corresponding Author (dkalantari2000@yahoo.com)

4-Associated professor, Tabarestan Institute of Genetics and Agricultural Biotechnology, Sari Agriculture Sciences & Natural Resources University (SANRU), sari, Iran

Abstract

Given the importance of drying process in the rice production and in order to obtain the optimum time to achieve moisture balance in the tempering, influence of different drying temperatures (40, 50, 60 and 70 ° C) and drying time have been studied for four different paddy cultivars (Nemat, Neda, Pagouhesh and Pardis) in the time range of 0.5 to 8 hours at 10 levels of 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8 hr (as independent variables) in a factorial experimental design based on randomized complete block with three replications. The results obtained in this study indicated that the gradient of the effective diffusion coefficient (K_1 , as dependent variable) in the early stages of tempering period (after completion of the heating up to one hour of rest) was much more than that of the later tempering stage (from one hour to two-hour relaxation time). The effective diffusion coefficient for the Nemat and Nedacultivers with a similar genotype was larger than that of Pagouhesh and Pardiscultivers. Based on the results obtained in this research, 1-hour relaxation time is recommended at drying temperatures less than 50 °C and 2 hours for drying temperatures higher than 50 °C. Adsorption and desorption of surface moisture in the relaxation period has a direct influence on grain fracture.

Key words: tempering, moisture absorption, drying, paddy, rate of effective diffusion coefficient