

بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی فشاری دانه برنج قهوه‌ای

علی ماشاءاله کرمانی*، تیمور توکلی هاشجین و سعید مینایی**

* نگارنده مسئول، نشانی: قزوین، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی قزوین، ص. پ. ۶۱۸-۳۴۱۸۵، تلفن: ۰۲۸۱)۳۳۳۶۱۱۶.

پیام‌نگار: a_m_kermani@yahoo.com

** به‌ترتیب استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی قزوین؛ استاد؛ و دانشیار دانشگاه

تربیت مدرس

تاریخ دریافت مقاله: ۸۶/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۲/۲۸

چکیده

شناخت خواص گسیختگی دانه برنج و اثر رطوبت و دما بر آن در تحلیل و پیش‌بینی رفتار شکستگی آنها در هنگام انتقال و فراوری، مهم است. مقادیر این خواص همچنین برای طراحی دقیق ماشین‌آلات برنج‌کوبی به‌منظور کمینه کردن صدمات ضروری است. در این تحقیق، خواص مکانیکی فشاری دانه‌های دو رقم برنج قهوه‌ای هاشمی و خزر در رطوبت‌ها و دماهای متفاوت مطالعه شد. آزمایش‌ها در دو حالت بارگذاری فشاری شامل آزمون فشار دانه کامل و آزمون فشار محوری روی نمونه‌های استوانه‌ای از دانه در سه سطح رطوبت (۱۰/۲، ۱۲/۲، و ۱۳/۲۵ درصد بر پایه تر) و چهار سطح دمای دانه (۳۵، ۴۵، ۵۵، و ۶۵ درجه سانتی‌گراد) بررسی شد. در آزمون فشاری دانه کامل، پارامترهای نیروی لازم برای شکست دانه، تغییر شکل در نقطه شکست، انرژی شکست، و مدول الاستیسیته ظاهری اندازه‌گیری شدند. در آزمون فشار محوری نمونه استوانه‌ای نیز تنش و کرنش گسیختگی، مدول چگرمگی، و مدول الاستیسیته فشاری تعیین شدند. نتایج نشان می‌دهند که رطوبت و دمای دانه اثری معنی‌دار بر مقادیر خواص مکانیکی فشاری برنج قهوه‌ای دارند. مقادیر کلیه خواص مکانیکی، به‌جز کرنش گسیختگی فشاری، با کاهش رطوبت و دمای دانه افزایش نشان می‌دهد. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که رقم تأثیری معنی‌دار بر کلیه خواص گسیختگی فشاری ندارد. برای هر دو رقم مورد مطالعه، مقدار متوسط نیروی لازم برای شکست دانه‌های برنج قهوه‌ای در محدوده ۳۷/۰۱ تا ۸۹/۹۶ نیوتن متغیر بود. در ضمن، در این شرایط تغییرات تنش گسیختگی فشاری دانه‌های این دو رقم در محدوده ۱۶/۴۳ تا ۴۲/۴۲ مگاپاسکال متغیر بود.

واژه‌های کلیدی

برنج قهوه‌ای، تنش گسیختگی فشاری، خواص مکانیکی، دما، رطوبت، مدول الاستیسیته

مقدمه

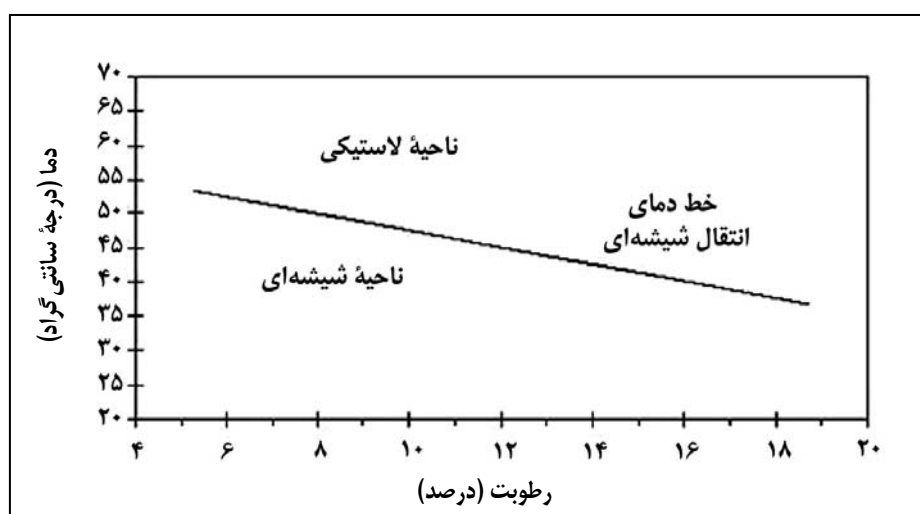
شود، اما دلیل عمده شکستن دانه‌های برنج به‌وجود آمدن دانه‌های ترک‌دار در مرحله خشک‌کردن است که در نتیجه آن دانه‌ها در مراحل تولید یا فراوری مستعد شکستن می‌شوند (Sarker et al., 1996). در فرایند خشک‌کردن، اختلاف فشار بخار در بخش‌های مرکزی و سطحی دانه سبب ایجاد شیب‌های دمایی و رطوبتی در درون دانه می‌شود که عامل ایجاد تنش‌های حرارتی و رطوبتی و در

دانه شلتوک طی عملیات انتقال و فراوری تحت اثر مجموعه‌ای از بارهای استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرد که در نتیجه آن ترک و شکستگی‌هایی در آن بروز می‌کند (Prasad & Gupta, 1973) و کیفیت محصول کاهش می‌یابد. نوع ماشین‌های فراوری و فقدان تنظیمات آنها ممکن است سبب شکستگی درصد بالایی از دانه‌های سالم

آندوسپرم دانه برنج به هنگام خشک شدن یا فرایند خشک شدن، دچار انتقال از وضعیت شیشه‌ای^۱ به وضعیت لاستیکی^۲ یا برعکس می‌شود. طی این تغییر وضعیت، خواص فیزیکی آندوسپرم به‌طور چشم‌گیر تغییر می‌کند (Cnossen & Siebenmorgen, 2000). انتقال شیشه‌ای ویژگی ذاتی مواد پلیمری است. از آنجایی که حدود ۹۰ درصد ماده خشک دانه برنج سفید نشاسته است، آندوسپرم دانه برنج ماده‌ای پلیمری محسوب می‌شود. دمای انتقال شیشه‌ای^۳، در هر رطوبت دانه، به دمایی گفته می‌شود که وضعیت آندوسپرم دانه بالاتر از آن لاستیکی و پایین‌تر از آن شیشه‌ای است. نمودار وضعیت دانه بر حسب دما و رطوبت، خطی است به نام خط انتقال شیشه‌ای^۴ (شکل ۱). نوسن و همکاران (Cnossen *et al.*, 2001) مفهوم دمای انتقال شیشه‌ای را برای تفسیر تشکیل ترک دانه برنج به کار بردند. تحقیقات دیگر نیز این مفهوم را برای بررسی فرایند خشک کردن برنج به کار برده‌اند (Cnossen *et al.*, 2003).

نهایت تشکیل ترک درون دانه است. این تنش‌ها، بسته به مقدار و سرعت برداشت رطوبت پس از مرحله خشک کردن در دانه توسعه می‌یابند (Kunze, 1979). در این صورت در هر نقطه درون دانه که مقدار تنش‌های رطوبتی و دمایی از تنش گسیختگی دانه بزرگ‌تر شود، ترک ایجاد می‌شود (Waananen & Okos, 1988).

مطالعات زیادی برای بررسی و شناخت مکانیزم تشکیل ترک در درون دانه و به روش‌های مختلف صورت گرفته است. حصول شناخت بیشتر از شرایط تشکیل ترک یا پدیده ترک خوردگی دانه شلتوک می‌تواند راه‌کارهایی مفید در جهت افزایش عملکرد برنج سالم پیش‌پای مؤسسات فراوری برنج قرار دهد. به دلیل کوچکی اندازه دانه برنج، امکان اندازه‌گیری توزیع دما، رطوبت، و تنش در درون آن وجود ندارد. اخیراً روش‌های شبیه‌سازی به کمک روش اجزای محدود و رایانه به‌عنوان ابزاری قدرتمند در اختیار هستند که می‌توانند برای این منظور به کار روند (Jia *et al.*, 2002).



شکل ۱- نمودار انتقال شیشه‌ای دانه برنج (Cnossen & Siebenmorgen, 2000)

1- Glassy State

2- Rubbery State

3- Glass Transition Temperature (Tg)

4- Glass Transition Line

بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی...

بعد یک دانه ارائه شد. پراساد و گوپتا (Prasad & Gupta, 1973) رفتار دانه‌های شلتوک دو رقم برنج تحت بارگذاری فشاری در وضعیت به پهلوی در سرعت‌ها، بارگذاری، و رطوبت‌های مختلف دانه بررسی و گزارش کردند که رطوبت دانه مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر خواص مکانیکی است. آنان همچنین دریافتند که در رطوبت‌های بالا، دانه‌ها بیشتر خواص ویسکوز دارند ولی در رطوبت‌های پایین رفتارشان بیشتر شبیه رفتار مواد الاستیک است. ووترز و دبائردماکر (Wouters & de Baerdemaeker, 1988) اثر رطوبت را بر خواص مکانیکی دانه برنج در بارگذاری فشاری روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل تهیه شده از برش دو انتهای دانه مطالعه کردند. این محققان مدول الاستیسیته ظاهری، تنش، و کرنش گسیختگی دانه برنج را در محدوده رطوبت ۵ تا ۳۰ درصد بر پایه خشک و دو سرعت بارگذاری ۵ و ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه تعیین کردند. تحلیل آماری نتایج نشان داد که رطوبت اثری معنی‌دار بر خواص مطالعه شده (به ویژه در محدوده رطوبت ۱۲ تا ۱۸ درصد بر پایه خشک) دارد. بر اساس نتایج بررسی‌های این محققان، تأثیر سرعت بارگذاری بر خواص مکانیکی دانه‌ها معنی‌داری نبوده است. به‌منظور شبیه‌سازی توزیع تنش و مکانیزم تشکیل ترک در درون دانه، تعیین و بررسی خواص گسیختگی دانه‌ها در دماها و رطوبت‌های مختلف ضروری است. برای دانه‌های ذرت این خواص را وانانن و اُکوز (Waananen & Okos, 1992) و همکاران (Liu et al., 1989 & 1990) تعیین کرده‌اند.

شناخت خواص مکانیکی دانه تحت اثر دو عامل رطوبت و دما به‌منظور تحلیل تنش‌های درون دانه و بررسی پدیده ترک‌خوردگی دانه برنج در فرایند

ارقام مختلف برنج ممکن است شکل‌های مشابه داشته باشند، اما مقاومت به ترک‌خوردگی آنها می‌تواند متفاوت باشد (Lan & Kunze, 1996). خواص دانه‌ها ویژگی‌های فراوریشان را به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mohsenin, 1986; Sitkei, 1986). از این‌رو، فرموله کردن قوانین حاکم بر رفتار مکانیکی آنها در طراحی برای استفاده از حداکثر بازده ماشین و تأمین حداکثر کیفیت محصول نهایی مهم است (Husain et al., 1971). در تحلیل گسیختگی و شکست دانه برنج به هنگام فراوری، شناخت خواص مکانیکی آن ضروری است. این خواص شامل خواص گسیختگی^۱ (تنش گسیختگی^۲، کرنش گسیختگی^۳، و مدول چغرمگی^۴) و مدول کاهش تنش^۵ هستند. خواص گسیختگی و مدول کاهش تنش دانه بیشترین استفاده را در توصیف مقاومت دانه دارند و وابستگی آنها با دما و رطوبت مورد توجه متخصصان بوده است (Hammerle & Mohsenin, 1970; Haghghi & Segerlind, 1988; Liu et al., 1990).

روی خواص مکانیکی دانه برنج در آزمون‌های فشاری، کششی، و خمشی، محققان زیادی مطالعه کرده‌اند. کونزی و چودهری (Kunze & Choudhary, 1972) مقاومت کششی دانه‌های برنج قهوه‌ای و سفید دو رقم برنج را در شرایط جذب رطوبت از طریق آزمون کشش تک محوری مطالعه کردند. برای این منظور آنان تغییرات مقاومت کششی دانه‌های برنج را در فواصل زمانی مختلف بعد از قرارگیری در محیط با رطوبت نسبی بالاتر تعیین کردند و دریافتند که با افزایش زمان قرارگیری دانه‌ها در محیط مرطوب، تغییرات بزرگی در مقاومت کششی آنها به‌وجود می‌آید. در این تحقیق به‌منظور تشریح مشاهدات فیزیکی، تحلیل فرضی تنش‌ها^۶ در دو

1- Failure Properties
4- Toughness Modulus

2- Failure Stress
5- Stress Relaxation Modulus

3- Failure Strain
6- Hypothetical Analysis of Stresses

محصول خزر انجام شدند. شلتوک‌های این دو رقم در فصل زراعی ۱۳۸۲ از شالیزارهای مرکز تحقیقات برنج کشور واقع در رشت تهیه شد که به ترتیب با کمباین دو ردیفه DaeDong و دستی برداشت و درو شده بودند. نمونه‌های تر پس از برداشت در کیسه‌های پلاستیکی در بسته قرار داده شدند و پس از انتقال به آزمایشگاه در یخچال و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد (Chen & Kunze, 1983) تا زمان اجرای آزمایش‌ها نگهداری شدند. دو رقم هاشمی و خزر طبق دسته‌بندی مؤسسه بین‌المللی تحقیقات برنج^۱ به ترتیب در دسته ارقام دانه بلندتر^۲ و دانه بلند^۳ قرار می‌گیرند. رطوبت دانه‌های شلتوک با قرار دادن سه نمونه ۱۵ گرمی از آنها در آون با دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۹ ساعت (Nalladurai et al., 2003) تعیین شد که میانگین آنها برای دانه‌ها هاشمی و خزر به ترتیب ۲۲/۲۶ و ۲۰/۳۴ درصد بر پایه تر^۴ بود. جدول ۱ مشخصات فیزیکی دو رقم مذکور را نشان می‌دهد.

خشک‌کردن ضروری است. در این خصوص داده‌های کافی وجود ندارد و به همین دلیل این تحقیق با هدف‌های زیر به اجرا درآمد که نقیصه یاد شده تا حدودی مرتفع شود:

- تعیین خواص گسیختگی فشاری (تنش گسیختگی فشاری، کرنش گسیختگی فشاری، و مدول چغرمگی) دانه‌های برنج قهوه‌ای دو رقم هاشمی و خزر در سطوح مختلف رطوبت و دمای دانه.
- تعیین نیروی شکست، تغییرشکل تا نقطه شکست، و انرژی لازم برای شکست دانه‌های برنج قهوه‌ای دو رقم هاشمی و خزر در سطوح مختلف رطوبت و دمای دانه.

مواد و روش‌ها

انتخاب و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق آزمایش‌ها روی دو رقم برنج متداول داخلی یکی رقم محلی هاشمی و دیگری اصلاح‌شده و پر

جدول ۱- مشخصات فیزیکی دانه‌های شلتوک

رطوبت اولیه	ابعاد (میلی‌متر)*			رقم
	ضخامت	عرض	طول	
۲۲/۲۶	۱/۷۶	۲/۱۴	۷/۷۳	هاشمی
۲۰/۳۴	۱/۷۴	۲/۱۷	۷/۵۰	خزر

* هر بعد میانگین اندازه‌گیری از ۵۰ دانه برنج قهوه‌ای است.

آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشی

شلتوک از طریق خشک کردن دانه‌ها به صورت لایه نازک (لایه‌هایی به ضخامت سه دانه شلتوک) با یک خشک‌کن آزمایشگاهی و در دماهای مذکور به دست آمد. در هر آزمایش، پس از رسیدن رطوبتشان به سطوح مورد نظر و به منظور جلوگیری از پایین آمدن رطوبت، بلافاصله به

برای تعیین خواص مکانیکی فشاری دانه برنج، سه سطح رطوبت دانه (۱۲، ۱۴، و ۱۶ درصد) و چهار سطح دمای خشک کردن (۳۵، ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد) انتخاب شد. سطوح رطوبت مورد نظر دانه‌های

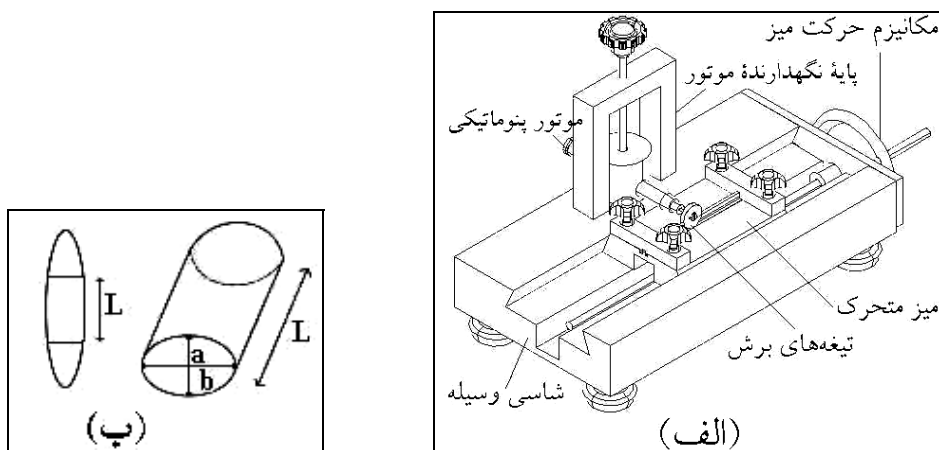
1- International Rice Research Institute (IRRI)
3- Long-Kernel

2- Longer-Kernel
4- Wet Basis

بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی...

دور در دقیقه و دو تیغه بود که در فاصله حدود ۳٫۷ میلی‌متر از یک دیگر روی محور آن واقع شده بودند. برای به‌دست آوردن نمونه‌های استوانه‌ای با انتهای کاملاً صاف، هر نمونه با دقت بسیار برش داده شد؛ نمونه‌های برش خورده به درون توده‌ای ۱۰ گرمی از دانه‌های شلتوک همان تیمار قرار داده شدند. نمونه‌ها، سپس برای حفظ رطوبتشان تا زمان اجرای آزمایش‌های مکانیکی، درون کیسه‌های پلاستیکی ضخیم دو جداره و بدون درز قرار داده شدند.

درون کیسه پلاستیکی ضخیم و دوجداره منتقل می‌شدند. بدین ترتیب برای اجرای آزمایش‌های مکانیکی، ۱۲ تیمار تهیه شد. پس از گذشت چند روز و بعد از متعادل شدن رطوبت دانه‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای برای آزمون فشار تک محوری (از هر تیمار حدود ۶۰ نمونه) تهیه شد. دو انتهای دانه با دستگاه برش دانه (شکل ۲-الف) برش داده شد. و استوانه‌ایی از هر دو رقم هاشمی و خزر (شکل ۲-ب) تهیه شد. دستگاه برش شامل یک موتور بادی با سرعت دورانی ۵۴۰۰۰



شکل ۲-الف) دستگاه برش دو انتهای دانه برنج، ب) موقعیت‌های برش و نمونه استوانه‌ای

است و می‌تواند برای اجرای آزمایش‌های مکانیکی دانه قابلیت نصب روی ماشین آزمون مواد هانسفیلد^۱ مدل H50K-s ساخت انگلستان نصب شود (شکل ۳). محفظه کنترل محیطی دارای واحدهای مولد حرارت و رطوبت نسبی با حسگرهای مربوطه در درون محفظه و مجهز به کنترل‌کننده‌های دیجیتالی دما و رطوبت نسبی است.

محفظه کنترل محیطی

برای حفظ رطوبت نمونه‌ها حین اجرای آزمایش‌های مکانیکی دانه برنج در شرایط رطوبت و دمای مورد نظر، یک محفظه محیطی ساخته شد. در این محفظه در دماهای مختلف، امکان ایجاد رطوبت‌های نسبی مطلوب برای حفظ رطوبت تعادلی دانه وجود دارد. این محفظه مکعب شکل



شکل ۳- ماشین آزمون مواد هانسفیلد مدل H50K-s مجهز به محفظه کنترل محیطی

دلیل تفاوت رطوبت تعادلی مورد انتظار با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری، به باز و بسته شدن پی در پی در پیچه محفظه کنترل محیطی و خروج هوای مرطوب حین اجرای آزمایش‌ها مربوط می‌شود. این امر فشار بخار هوای داخل محفظه را نسبت به شرایط مورد نظر تغییر می‌داد که تا حدودی سبب پایین آمدن رطوبت دانه‌ها می‌شد. این موضوع برای تیمارهای دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر بود. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده (جدول ۲) سطح رطوبتی ۱۲ درصد برای کلیه دماهای دانه را می‌توان به‌طور متوسط برابر ۱۰٫۲ درصد در نظر گرفت. به همین ترتیب رطوبت ۱۴ درصد برابر ۱۲٫۲ درصد و ۱۶ درصد برابر ۱۳٫۲ درصد در نظر گرفته شد.

برای آماده کردن شرایط محیطی مطلوب هر تیمار، دما و رطوبت نسبی محاسبه شده از رابطه چانگ^۱ (Stroshine & Hamann, 1994) متناظر آن در محیط داخلی محفظه کنترل از طریق نمایشگرهای روی تابلوی کنترل تنظیم شد. پس از گذشت چند ساعت که شرایط محیطی به تعادل رسید، نمونه تیمار مورد نظر که شامل نمونه‌های برش خورده بود، درون محفظه مزبور قرار داده شدند و بعد از ۴ تا ۵ روز از قرارگیری نمونه‌ها در شرایط محیطی مربوط، آزمون‌های فشاری روی برنج قهوه‌ای اجرا شد. در پایان هر تیمار آزمایش نشان داده شد که مقدار رطوبت دانه‌ها کم‌تر از مقدار مورد انتظار است (جدول ۲).

بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی...

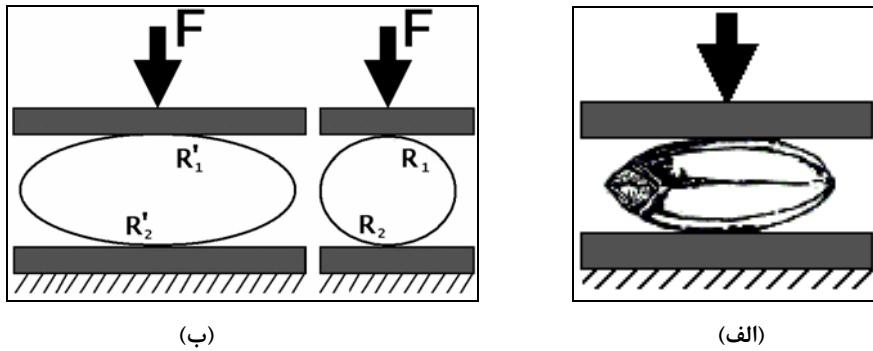
جدول ۲- مقادیر رطوبت‌های تعادلی مورد انتظار و اندازه‌گیری شده برای تیمارهای مختلف

رطوبت تعادلی اندازه‌گیری شده برای رقم خزر	رطوبت تعادلی اندازه‌گیری شده برای رقم هاشمی	رطوبت تعادلی مورد انتظار، (درصد)	شرایط محیطی	
			رطوبت نسبی (درصد)	دما (درجه سانتی‌گراد)
۱۰٫۴	۱۰٫۴	۱۲	۶۴٫۷	
۱۲٫۴	۱۲٫۲	۱۴	۷۸٫۳	۳۵
۱۳٫۴	۱۳٫۳	۱۶	۸۷٫۴	
۱۰٫۴	۱۰٫۳	۱۲	۶۸٫۳	
۱۲٫۴	۱۲٫۴	۱۴	۸۰٫۷	۴۵
۱۳٫۳	۱۳٫۲	۱۶	۸۸٫۹	
۱۰٫۳	۱۰٫۱	۱۲	۷۱٫۳	
۱۲٫۳	۱۲٫۲	۱۴	۸۲٫۶	۵۵
۱۳٫۲	۱۳٫۲	۱۶	۹۰٫۱	
۹٫۹	۹٫۹	۱۲	۷۳٫۷	
۱۱٫۹	۱۱٫۹	۱۴	۸۴٫۲	۶۵
۱۲٫۹	۱۲٫۹	۱۶	۹۱	

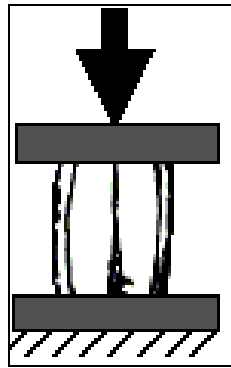
آزمون بارگذاری فشاری

دو آزمون مکانیکی، شامل آزمون بارگذاری فشاری روی دانه کامل و آزمون فشار تک محوری (فشار محوری) روی نمونه‌های استوانه‌ای حاصل از برش دو انتهای دانه برنج با ماشین آزمون مواد اجرا شد (شکل ۳). این ماشین به رایانه متصل است و از طریق نرم‌افزار مربوطه تنظیمات آزمایش اعمال شده و داده‌های نیرو- تغییر شکل برای هر آزمایش ثبت می‌شود. آزمایش‌ها در یک محفظه کنترل محیطی قابل نصب روی ماشین آزمون مواد اجرا شد (شکل ۳). در آزمون فشار روی دانه کامل (شکل ۴- الف)، دانه برنج قهوه‌ای در وضعیت به‌پهلوی روی فک ثابت و

مسطح دستگاه و با صفحه صاف نصب شده روی فک متحرک دستگاه تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گرفت. آزمون فشار تک محوری روی نمونه‌های استوانه‌ای دانه برنج قهوه‌ای در جهت محور طولی اجرا شد. شکل ۵، طرحواره این حالت بارگذاری را نشان می‌دهد. هر دو آزمون مکانیکی فشاری در شرایط بارگذاری شبه استاتیک انجام شدند. طبق استاندارد ASAE S386.4 سرعت بارگذاری برای شرایط شبه‌استاتیک ۱/۲۴ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد (Anon, 1998). در این تحقیق آزمایش‌های هر تیمار در ده تکرار اجرا گردید.



شکل ۴- الف) طرح‌واره حالت بارگذاری فشاری روی دانه کامل برنج قهوه‌ای،
ب) طرح‌واره دانه برنج بین سطوح تخت و شعاع‌های انحنا در نقاط تماس



شکل ۵- طرح‌واره آزمون فشار محوری

زیر منحنی نیرو- تغییر شکل تا نقطه گسیختگی محاسبه شد (Tavakoli Hashjin, 2003). برای تعیین مدول الاستیسیته ظاهری^۴ دانه از روابط تئوری هرتز استفاده شد. برای این منظور با توجه به حالت بارگذاری و شکل متقارن و بیضی دانه برنج (شکل ۲- ب)، مقادیر $R'_1 = R'_2$ و $R_1 = R_2$ در نتیجه معادله مربوط به صورت رابطه ۱ ساده شد (Mohesnin, 1986; Stroshine & Hamann, 1994).

$$E = [0.956 K^{3/2} F (1-\mu^2)] / D^{3/2} \times [1/R_1 + 1/R'_1]^{1/3} \quad (1)$$

که در آن، E = مدول الاستیسیته ظاهری دانه؛ Pa = (بر حسب پاسکال)؛ F = مقدار نیروی فشاری از منحنی

استخراج خواص مکانیکی در آزمون‌های فشار دانه کامل و فشار تک محوری

منحنی نیرو- تغییر شکل و داده‌های خام آن به صورت فایل Excel برای هر آزمایش از طریق برنامه دستگام گرفته شد. از روی این داده‌ها اولین نقطه‌ای که با افزایش تغییر شکل، افت نیرو مشاهده شود، شروع شکستگی است که به عنوان نقطه شکست^۱ مشخص می‌شود. مقدار نیرو در این نقطه، نیروی گسیختگی^۲ است. خواص مکانیکی دانه در آزمون فشار دانه کامل شامل نیروی گسیختگی دانه و تغییر شکل دانه تا نقطه شکست از روی داده‌های خام تعیین شد. انرژی شکست^۳ دانه از محاسبه مساحت

1- Rupture Point

2- Failure Force

3- Breaking Energy

4- Apparent Elasticity Modulus

بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی...

تغییر شکل دانه در نقطه گسیختگی و تقسیم آن بر طول اولیه نمونه، کرنش گسیختگی محاسبه می‌شود. ابعاد مورد نیاز دانه و نمونه (شکل ۲-ب) با کولیس دیجیتالی Mitutoyo ساخت ژاپن با دقت ۰٫۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مدول چغرمگی دانه برنج از محاسبه انرژی شکست به ازای واحد حجم نمونه (استوانه با مقطع بیضی شکل) و مدول الاستیسیته فشاری از معادله ۴ محاسبه شد.

$$E = [\Delta F.L] / [\Delta L.A] \quad (4)$$

که در آن، E = مدول الاستیسیته فشاری (بر حسب مگاپاسکال)؛ L = طول نمونه (بر حسب میلی‌متر)؛ و A = مساحت متوسط مقطع نمونه استوانه‌ای (بر حسب میلی‌متر مربع) است.

مقادیر ΔF و ΔL برای بخش $\frac{1}{3}$ میانی منحنی نیرو-

تغییر شکل (شکل ۶-ب) استفاده شد که خطی و در ناحیه الاستیکی بارگذاری است.

تحلیل نتایج

نتایج حاصل از آزمایش‌ها به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط برنامه‌های Minitab V.13 و MSTAT-C تحلیل شدند. روابط رگرسیونی برای بعضی خواص مکانیکی به کمک برنامه StatGraphics Plus 2.1 به دست آمدند.

نتایج و بحث

شکل ۶ نمونه‌ای از منحنی‌های نیرو- تغییر شکل را برای آزمون فشار روی دانه کامل برنج قهوه‌ای و فشاری محوری را روی نمونه‌های آماده شده حاصل از برش دو انتهای دانه (نمونه استوانه‌ای) نشان می‌دهد. در

نیرو- تغییر شکل (بر حسب نیوتن)؛ D = مقدار تغییر شکل متناظر با نیروی قرائت شده از منحنی نیرو- تغییر شکل (بر حسب متر)؛ R_1 = شعاع انحناء کمینه دانه در نقاط تماس با عامل بارگذاری (بر حسب متر)؛ R'_1 = شعاع انحنای بیشینه دانه در نقاط تماس با عامل بارگذاری (بر حسب متر)؛ K = فاکتور بدون بعد وابسته به ویژگی هندسی عامل بارگذاری و دانه برابر ۱٫۰۷۵؛ و μ = نسبت پواسون برابر ۰٫۴۵، (بدون بعد) (Kamst et al., 1999) است.

مقادیر شعاع‌های بیشینه و کمینه سطح دانه برنج در نقطه تماس با سطح تخت با توجه به ابعاد دانه برنج قهوه‌ای (به‌طور مثال برای رقم هاشمی طول متوسط $l=7,73$ (بر حسب میلی‌متر)، پهنا متوسط $a=2,14$ (بر حسب میلی‌متر)، ضخامت متوسط $b=1,76$ (بر حسب میلی‌متر) از روابط ۲ و ۳ به دست می‌آید:

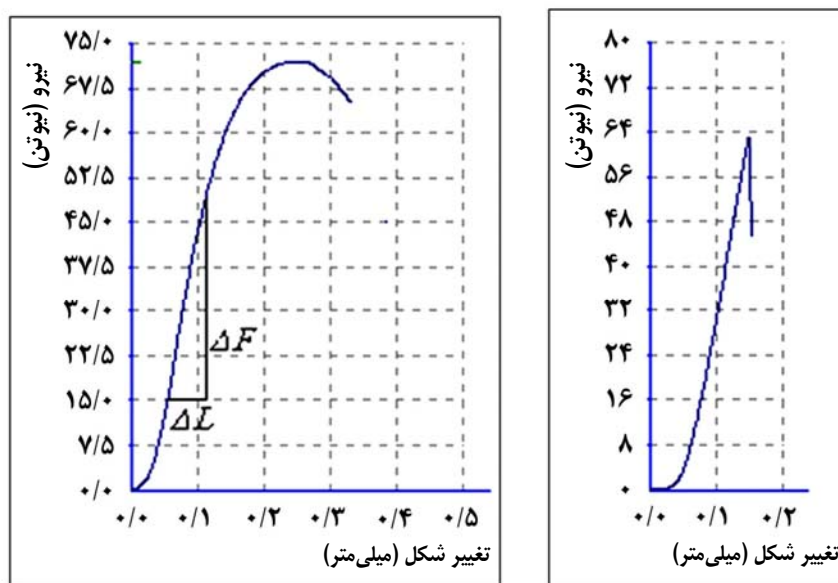
$$R_1 = \frac{a^2 + b^2}{4b} = R_{\min} = 1,097 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (2)$$

$$R'_1 = \frac{l^2 + b^2}{4b} = R_{\max} = 9,163 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (3)$$

خواص مکانیکی دانه برنج که از آزمون فشار محوری تعیین شدند عبارت‌اند از تنش گسیختگی کرنش گسیختگی، مدول چغرمگی، و مدول الاستیسیته فشاری. از تقسیم نیروی گسیختگی بر سطح مقطع متوسط نمونه، تنش گسیختگی محاسبه می‌شود. اندازه متوسط سطح مقطع نمونه استوانه‌ای شکل از محاسبه میانگین مساحت دو انتهای آن که تقریباً بیضی شکل است (Arora et al., 1972) به دست می‌آید. با تعیین میزان

گزارش کرده‌اند. در هر دو نوع بارگذاری، بخش اول منحنی تقعری کوچک به‌سوی بالا دارد. این وضعیت به‌دلیل تماس ناتمام به‌هنگام شروع بارگذاری ناشی از ناهمواری سطح دانه یا انتهای برش خورده است که اجتناب‌ناپذیر و در تحقیقات محققان دیگر نیز بدان اشاره شده است.

شکل ۶ مشخص است که در بارگذاری روی دانه کامل، نمودار تا نقطه شکست خطی است. درحالی‌که برای بارگذاری محوری روی نمونه استوانه‌ای بعد از قسمتی که به‌صورت خطی است، در ادامه تا نقطه شکست دارای انحنا با تقعر به‌طرف پایین می‌شود. لی و کونزی (Lee & Kunze, 1972) نیز نتایج مشابهی



(ب)

(الف)

شکل ۶- منحنی‌های نیرو- تغییر شکل دانه برنج قهوه‌ای در دو حالت بارگذاری فشاری (رطوبت ۱۳/۲۵ درصد) (الف) دانه سالم و کامل رقم هاشمی (دما ۴۵ درجه سانتی‌گراد)، (ب) نمونه استوانه‌ای رقم خزر (دما ۳۵ درجه سانتی‌گراد)

تجزیه و آریانس خواص مکانیکی فشاری دانه کامل برنج قهوه‌ای (Yazdi Samadi et al., 1996)، تبدیل‌های مطلوب روی داده‌های هر پارامتر گرفت. اکثر پارامترهای اندازه‌گیری شده، با تبدیل لگاریتم طبیعی (Ln) برای تجزیه و آریانس آماده شدند. تجزیه و آریانس (جدول ۳) نشان می‌دهد که رطوبت و دما بر کلیه خواص مکانیکی دانه کامل اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد دارند. رقم برنج اثر معنی‌دار بر هیچ یک از پارامترها نداشت. اثر متقابل دوگانه رطوبت و دما بر نیروی شکست و مدول الاستیسیته ظاهری فشاری معنی‌دار بود، ولی بر

تجزیه و آریانس خواص مکانیکی فشاری دانه کامل برنج قهوه‌ای به‌منظور بررسی اثر دما و رطوبت دانه بر مقادیر نیروی شکست، تغییرشکل تا نقطه شکست، انرژی شکست، و مدول الاستیسیته ظاهری، داده‌های حاصل از آزمون فشار برای تیمارهای مختلف دانه‌های کامل برنج قهوه‌ای مورد تجزیه و آریانس قرار گرفتند. به‌منظور برآورده کردن دو شرط نرمال بودن توزیع و یکسان بودن آریانس‌ها برای تجزیه و آریانس

بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی...

تغییر شکل تا نقطه شکست و انرژی شکست معنی‌دار خواص مکانیکی دانه کامل معنی‌دار در سطح احتمال ۱ نبود. اثر متقابل سه گانه رقم × رطوبت × دما برای کلیه درصد بوده است.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس خواص مکانیکی دانه برنج قهوه‌ای در آزمون فشار دانه کامل دو رقم هاشمی و خزر در اثر دو عامل دما و رطوبت

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
مدول الاستیسیته	تغییر شکل در نقطه شکست	انرژی شکست	نیروی شکست		
ظاهر فشاری					
۰/۰۰۱ns	۰/۰۲۳ns	۰/۱۵۰ns	۰/۰۵۳ns	۱	رقم
۰/۰۳۳**	۰/۱۵۸**	۶/۴۰۸**	۴/۲۴۷**	۲	رطوبت
۰/۰۰۱ns	۰/۰۱۵ns	۰/۲۳۵*	۰/۱۶۱**	۲	رقم × رطوبت
۰/۰۱۳**	۰/۰۶۲*	۰/۸۶۴**	۰/۸۳۲**	۳	دما
۰/۰۰۱ns	۰/۰۱۹ns	۰/۰۱۹ns	۰/۰۰۴ns	۳	رقم × دما
۰/۰۰۷**	۰/۰۳۵ns	۰/۱۰۰ns	۰/۲۱۳**	۶	رطوبت × دما
۰/۰۰۱ns	۰/۰۴۷*	۰/۲۴۲**	۰/۱۰۲**	۶	رقم × رطوبت × دما
۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۱۸	۰/۰۷۳	۰/۰۱۵	۲۱۶	خطا
۶/۷۸	۵/۷۰	۱۵/۸۶	۳/۰۲	—	ضریب تغییرات (درصد)

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ns: نبود اختلاف معنی‌دار

دما و بالعکس اجرا شد (جدول ۵). در جدول ۴ مشاهده می‌شود که رطوبت بیشترین اثر را بر نیروی شکست و انرژی شکست دانه دارد. با کاهش رطوبت، مقادیر نیروی لازم برای شکست دانه به‌طور چشم‌گیر افزایش می‌یابد. مقدار متوسط نیروی لازم برای شکست دانه‌های برنج قهوه‌ای دو رقم هاشمی و خزر در رطوبت ۱۳/۲۵ درصد در کلیه دماهای آزمایشی به ترتیب از ۴۵/۸۱ و ۴۶/۸۱ نیوتن به ۷۶/۲۰ و ۷۵/۷۷ نیوتن در رطوبت ۱۰/۲ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۷- الف). با افزایش دمای دانه از ۳۵ به ۶۵ درجه سانتی‌گراد، نیروی لازم برای شکست دانه‌های برنج قهوه‌ای رقم هاشمی و خزر به ترتیب از ۶۷/۶۸ و ۷۱/۴۲ نیوتن به ۵۳/۷۳ و ۵۶/۲۵ نیوتن کاهش می‌یابد (شکل ۷- ب). جدول ۴ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار نیروی لازم برای شکست دانه در هر سطح

مقایسه میانگین مقادیر خواص مکانیکی دانه کامل برنج قهوه‌ای

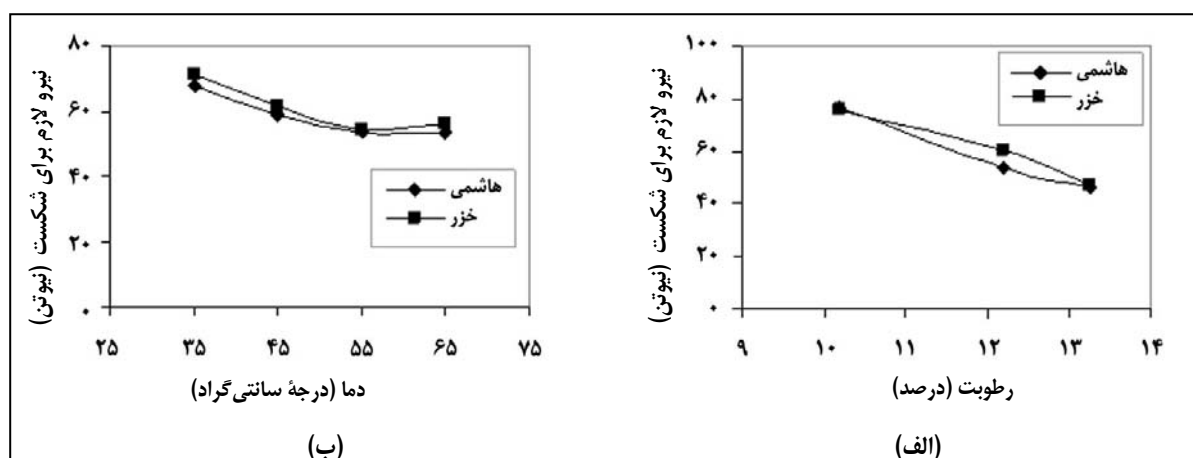
با توجه به معنی‌دار بودن اثر متقابل سه گانه رقم × رطوبت × دما برای مقادیر میانگین نیروی شکست، تغییر شکل تا نقطه شکست، و انرژی شکست دانه کامل، آزمون چند دامنه‌ای دانکن برای سطوح مختلف رطوبت در هر سطح دمای دانه و نیز سطوح مختلف دما در هر سطح رطوبت دانه برای هر دو رقم اجرا شد. نتایج این مقایسه میانگین‌ها به‌طور یکجا در جدول ۴ آمده است. این اثر متقابل سه گانه بر مدول الاستیسیته ظاهری فشاری دانه کامل معنی‌دار نیست، در حالی که اثر متقابل دوگانه رطوبت × دما معنی‌دار است. از این‌رو، آزمون چند دامنه‌ای دانکن مقادیر میانگین آن برای سطوح مختلف رطوبت در هر سطح

رطوبت دانه مربوط به دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد است. با در نظر گرفتن تئوری انتقال شیشه‌ای دانه برنج (شکل ۱) مشخص می‌شود که دانه برنج در این دما در محدوده رطوبتی گسترده‌تری حالت شیشه‌ای دارد. دانه برنج قهوه‌ای برای دمای حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد به بالا در محدوده رطوبتی مورد مطالعه وضعیت لاستیکی دارد. از این رو مقادیر متوسط نیروی شکست در دماهای ۵۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد در هر یک از سطوح رطوبتی کم‌ترین مقدار را دارد.

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین مقادیر خواص مکانیکی فشاری دانه کامل برنج قهوه‌ای دو رقم هاشمی و خزر

رقم	دمای دانه (درجه سانتی‌گراد)	نیروی شکست (نیوتن)			تغییر شکل تا نقطه شکست (میلی‌متر)			انرژی شکست دانه (مگا ژول)		
		رطوبت دانه (درصد)			رطوبت دانه (درصد)			رطوبت دانه (درصد)		
		۱۳٫۲۵	۱۲٫۲	۱۰٫۲	۱۳٫۲۵	۱۲٫۲	۱۰٫۲	۱۳٫۲۵	۱۲٫۲	۱۰٫۲
هاشمی	۳۵	۵۴/۹۲Ca	۶۳/۰۵Ba	۸۵/۸۹Aa	۰/۰۹۹Aa	۰/۰۹۴Aab	۰/۰۹۹Aa	۲/۰۴۴Ba	۲/۲۹۷Aa	۳/۵۵۸Aa
	۴۵	۴۷/۰۹Cb	۵۲/۶۲Bb	۷۶/۶۹Aab	۰/۰۷۹Bb	۰/۰۹۷Ab	۰/۰۹۹Aa	۱/۵۴۸Ca	۲/۰۳۵Ba	۳/۱۶۰Aa
	۵۵	۳۷/۴۲Cc	۵۰/۱۸Bb	۷۳/۶۹Ab	۰/۱۰۲Aa	۰/۰۸۶Bab	۰/۰۹۶Aa	۱/۷۲۹Ba	۱/۸۲۷Ba	۲/۸۸۹Aa
	۶۵	۴۳/۸۰Cb	۴۸/۸۷Bb	۶۸/۵۱Ab	۰/۰۹۲Aab	۰/۰۹۳Aa	۰/۱۰۴Aa	۱/۷۵۷Ba	۱/۹۷۷Ba	۲/۸۵۷Aa
خزر	۳۵	۵۱/۷۹Cb	۷۲/۵۰Ba	۸۹/۹۶Aa	۰/۰۹۱Bab	۰/۰۹۷ABab	۰/۱۰۶Aa	۲/۸۳۹Bab	۲/۹۰۹Ba	۳/۹۷۰Aa
	۴۵	۵۳/۵۲Ca	۵۷/۱۴Bb	۷۵/۰۰Ab	۰/۰۸۸Ab	۰/۰۹۱Aab	۰/۰۹۴Aa	۲/۰۰۰Ba	۲/۷۹۶Bc	۲/۷۱۲Ab
	۵۵	۳۷/۰۱Cc	۵۴/۷۰Bb	۷۰/۶۹Ab	۰/۰۹۸Aa	۰/۱۰۶Ab	۰/۱۰۱Aa	۱/۵۸۰Bb	۲/۳۷۲Ab	۳/۰۰۲Ab
	۶۵	۴۴/۸۹Cb	۵۶/۴۳Bb	۶۷/۴۲Ac	۰/۰۸۹Aab	۰/۰۹۵Aa	۰/۱۰۴Aa	۱/۷۹۷Aab	۲/۴۰۶Ab	۳/۴۶۷Ab

- حروف لاتین بزرگ، مقایسه میانگین مقادیر هر ویژگی مکانیکی در سطوح مختلف رطوبت برای هر سطح دمای یک رقم برنج (سطر)، و حروف لاتین کوچک، مقایسه میانگین سطوح مختلف دما برای هر سطح رطوبت برای یک رقم برنج (ستون).
- میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.



بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی...

شکست، مربوط به دانه‌های رقم هاشمی در رطوبت ۱۳/۲۵ درصد و دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد (تقریباً روی خط انتقال شیشه‌ای) است.

نتایج حاصل از آزمون چند دامنه‌ای دانکن برای بررسی تغییرات میانگین مقادیر مدول الاستیسیته ظاهری دانه برنج قهوه‌ای با دما و رطوبت (جدول ۵) نشان می‌دهد که با کاهش رطوبت برای هر دمای دانه، مقادیر مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار انتقال شیشه‌ای، در این شرایط دانه حالت شیشه‌ای دارد و از این‌رو الاستیک‌تر محسوب می‌شود. داده‌ها نشان می‌دهد که افزایش دما سبب کاهش مدول الاستیسیته ظاهری فشاری می‌شود. طبق نمودار انتقال شیشه‌ای دانه برنج، در دماهای بالا دانه برنج در حالت لاستیکی قرار می‌گیرد و از این‌رو خاصیت الاستیکی کم‌تری دارد.

در اغلب تیمارها، مقادیر میانگین تغییرشکل دانه تا نقطه شکست برای رطوبت‌های ۱۳/۲۵ و ۱۲/۲ درصد در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقدار را نشان می‌دهد (جدول ۴). با توجه به نمودار انتقال شیشه‌ای دانه برنج (شکل ۱) این نقطه تقریباً روی خط انتقال وضعیت دانه قرار می‌گیرد.

انرژی شکست دانه برای هر دو رقم در هر سطح دمای دانه با افزایش رطوبت، افزایش نشان می‌دهد. انرژی شکست دانه‌های برنج هاشمی بیشتر از انرژی شکست برای رقم خزر است. دلیل آن‌را می‌توان به بزرگ‌تر بودن اندازه دانه‌های برنج قهوه‌ای رقم هاشمی، نسبت به رقم خزر، مربوط کرد. همچنین افزایش انرژی شکست با دما برای رقم هاشمی معنی‌دار نیست، در حالی‌که برای رقم خزر این افزایش معنی‌دار است. بیشترین مقدار انرژی

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین مقادیر مدول الاستیسیته ظاهری فشاری (گیگاپاسکال) برنج قهوه‌ای

رطوبت دانه (درصد)			دمای دانه (درجه سانتی‌گراد)
۱۳/۲۵	۱۲/۲	۱۰/۲	
۱/۷۳۲Ca	۲/۱۲۵Ba	۲/۴۰۷Aa	۳۵
۱/۶۴۲Cb	۲/۰۰۵Bb	۲/۳۲۶Ab	۴۵
۱/۱۷۶Cc	۱/۶۹۰Bb	۲/۱۶۵Abc	۵۵
۱/۶۲۳Ab	۱/۷۹۷Ab	۱/۷۳۹Ac	۶۵

- حروف لاتین بزرگ، مقایسه میانگین مقادیر هر ویژگی مکانیکی در سطوح مختلف رطوبت برای هر سطح دمای یک رقم برنج (سطر)، و حروف لاتین کوچک، مقایسه میانگین سطوح مختلف دما برای هر سطح رطوبت برای یک رقم برنج (ستون).
- میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

فشار محوری، نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای تیمارهای مختلف مورد تجزیه واریانس قرار گرفتند. به‌منظور برآورده کردن دو شرط نرمال بودن توزیع پارامتر و یکسان بودن واریانس پارامترهای تیمارهای مختلف،

تجزیه واریانس خواص مکانیکی آزمون فشار محوری
به‌منظور بررسی اثر دما و رطوبت دانه بر مقادیر تنش گسیختگی فشاری (مقاومت فشاری)، کرنش گسیختگی، مدول چگرمگی، و مدول الاستیسیته فشاری در آزمون

تبدیل‌های مطلوب روی داده‌های هر پارامتر اجرا شد (Yazdi Samadi *et al.*, 1996). داده‌های مربوط به هر صفت اندازه‌گیری شده به کمک تبدیل لگاریتم طبیعی (Ln) و Arc cos برای تجزیه واریانس آماده شدند. نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۶) نشان می‌دهد که رقم، اثر معنی‌داری بر هیچ‌یک از خواص مکانیکی فشار محوری ندارد. رطوبت و دما بر تنش گسیختگی و مدول الاستیسیته فشاری در سطح احتمال ۱ درصد اثر معنی‌دار نشان می‌دهد. رطوبت بر کرنش گسیختگی و دما بر مدول چقرمگی اثر معنی‌دار ندارند. اثر متقابل دوگانه رقم و رطوبت بر کلیه صفات، به جز مدول چقرمگی، معنی‌دار نیست. اثر دوگانه رطوبت × دما بر تمام خواص گسیختگی معنی‌دار است و اثر متقابل سه‌گانه رقم × رطوبت × دما بر تنش و کرنش گسیختگی فشاری دانه برنج قهوه‌ای دو رقم هاشمی و خزر معنی‌دار است.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس خواص مکانیکی مورد بررسی آزمون فشار محوری روی نمونه‌های استوانه‌ای از دانه برنج قهوه‌ای دو رقم هاشمی و خزر در اثر دو عامل دما و رطوبت

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
مدول الاستیسیته فشاری	مدول چقرمگی	کرنش گسیختگی	تنش گسیختگی		
۰/۰۰۱ns	۰/۰۰۴ns	۰/۰۰۱ns	۰/۰۲۱ns	۱	رقم
۰/۰۳۰**	۰/۴۷۵**	۰/۰۲۴ns	۶/۷۶۶**	۲	رطوبت
۰/۰۰۰ns	۰/۰۹۷*	۰/۰۰۷ns	۰/۰۶۴ns	۲	رقم × رطوبت
۰/۰۲۲**	۰/۰۵۱ns	۰/۰۳۶**	۱/۳۰۲**	۳	دما
۰/۰۰۰ns	۰/۱۲۴**	۰/۰۳۷**	۰/۱۰۴**	۳	رقم × دما
۰/۰۰۳**	۰/۱۶۲**	۰/۰۸۲**	۰/۳۷۹**	۶	رطوبت × دما
۰/۰۰۱ns	۰/۰۳۷ns	۰/۰۲۵*	۰/۰۶۶**	۶	رقم × رطوبت × دما
۰/۰۰۰۲	۰/۰۲۴	۰/۰۰۹	۰/۰۲۳	۲۱۶	خطا
۱/۰۶	۱۳/۷۹	۶/۰۸	۴/۵۴	—	ضریب تغییرات (درصد)

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns: نبود اختلاف معنی‌دار

مقایسه میانگین مقادیر خواص مکانیکی فشار محوری برنج قهوه‌ای میانگین داده‌های تنش و کرنش فشاری گسیختگی، به دلیل معنی‌دار بودن اثر متقابل سه‌گانه رقم × رطوبت × دما برای سطوح مختلف رطوبت در هر سطح دمای دانه و نیز سطوح مختلف دما در هر سطح رطوبت دانه برای هر دو رقم جداگانه مقایسه شد. نتایج این مقایسه به‌طور یکجا در جدول ۷ ارائه شده است. این اثر سه‌گانه بر مدول چقرمگی و مدول الاستیسیته فشاری دو رقم برنج هاشمی و خزر معنی‌دار نیست اما اثر متقابل دوگانه

بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی...

رطوبت × دما معنی‌دار شد، مقایسه میانگین مقادیر مدول چغرمگی و مدول الاستیسیته دانه برنج قهوه‌ای برای سطوح مختلف رطوبت در هر سطح دما و بالعکس مقایسه شد که نتایج آن در جدول ۸ آمده است.

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین مقادیر تنش و کرنش گسیختگی فشاری دانه برنج قهوه‌ای ارقام هاشمی و خزر

رقم	دمای دانه (درجه سانتی‌گراد)	تنش گسیختگی فشاری (مگاپاسکال)			کرنش گسیختگی فشاری (میلی‌متر در میلی‌متر)		
		رطوبت دانه (درصد)			رطوبت دانه (درصد)		
		۱۰٫۲	۱۲٫۲	۱۳٫۲۵	۱۰٫۲	۱۲٫۲	۱۳٫۲۵
هاشمی	۳۵	۴۲/۴۲Aa	۳۴/۰۶Ba	۲۸/۲۵Ca	۰/۰۴۸Ac	۰/۰۵۱۲Aa	۰/۰۵۲۹Aab
	۴۵	۴۳/۰۱Aa	۲۷/۸۲Bb	۲۵/۷۶Ba	۰/۰۵۱۸Abc	۰/۰۵۴۹Aa	۰/۰۵۷۶Aab
	۵۵	۳۳/۹۴Ab	۲۲/۹۹Bc	۱۶/۴۳Cb	۰/۰۵۳۷Aab	۰/۰۶۳۲Aa	۰/۰۶۵۱Ab
	۶۵	۲۸/۲۹Ac	۲۵/۲۸Ab	۱۷/۱۰Bb	۰/۰۵۸Ba	۰/۰۶۴۶Aa	۰/۰۷Aa
خزر	۳۵	۴۱/۷۴Aa	۲۶/۷۶Ba	۲۵/۱۵Ba	۰/۰۵۰۱Bb	۰/۰۵۰۴Ac	۰/۰۵۱۸Ab
	۴۵	۴۱/۹۲Aa	۲۷/۱۳Ba	۲۵/۲۹Ba	۰/۰۵۱Bab	۰/۰۵۱۶Abc	۰/۰۵۲۱Ab
	۵۵	۳۸/۶۲Aa	۲۵/۱۵Ba	۱۶/۷۸Cb	۰/۰۵۱۱Bab	۰/۰۵۳۶Abb	۰/۰۵۶Ab
	۶۵	۳۱/۶۹Ab	۲۵/۹۶Ba	۱۶/۹۳Cb	۰/۰۵۴۲Ba	۰/۰۶۲۸Aa	۰/۰۶۳۷Aa

- حروف لاتین بزرگ، مقایسه میانگین مقادیر هر ویژگی مکانیکی در سطوح مختلف رطوبت برای هر سطح دمای یک رقم برنج (سطر)، و حروف لاتین کوچک، مقایسه میانگین سطوح مختلف دما برای هر سطح رطوبت برای یک رقم برنج (ستون).
- میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

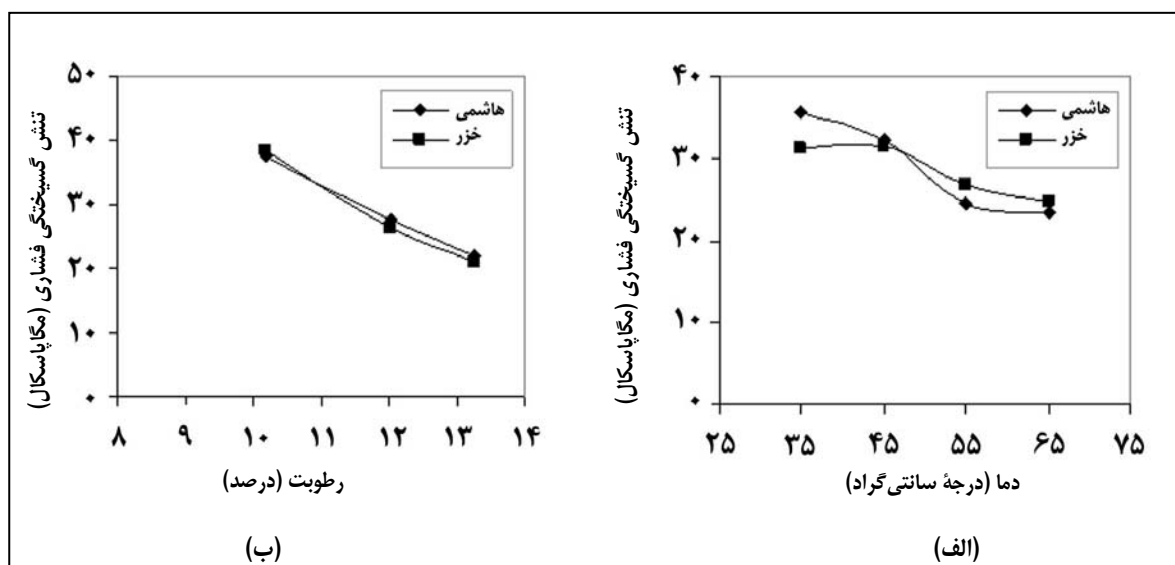
جدول ۸- نتایج مقایسه میانگین مقادیر مدول الاستیسیته فشاری و مدول چغرمگی فشاری دانه‌های برنج قهوه‌ای

رقم	دمای دانه (درجه سانتی‌گراد)	مدول الاستیسیته فشاری (مگاپاسکال)			مدول چغرمگی فشاری (ژول بر میلی‌متر مکعب)		
		رطوبت دانه (درصد)			رطوبت دانه (درصد)		
		۱۰٫۲	۱۲٫۲	۱۳٫۲۵	۱۰٫۲	۱۲٫۲	۱۳٫۲۵
هاشمی	۳۵	۱۲۵۶/۰۲۵Aa	۱۱۲۹/۵۲۹Ba	۱۰۸۲/۶۷۱Ba	۱/۳۷۳۴Aa	۰/۶۰۹۴Ba	۰/۶۶۰۲Ba
	۴۵	۱۱۶۹/۱۹۵Aa	۱۰۰۳/۰۹۳Ba	۸۹۸/۴۳۳Bb	۱/۶۵۴۰Aab	۰/۷۶۷۵Ba	۰/۷۳۳۰Bab
	۵۵	۱۰۷۵/۲۵۵Aa	۷۹۱/۲۱۷Bb	۶۱۰/۶۰۴Cc	۱/۰۸۳۰Ab	۰/۸۱۶۷Aa	۰/۶۰۰۰Bb
	۶۵	۹۵۸/۱۵۹Ab	۶۶۵/۴۲Bc	۴۵۹/۷۴۰Cd	۰/۹۶۲۱Ac	۱/۰۲۲۱Aa	۰/۸۶۸۸Aa

- حروف لاتین بزرگ، مقایسه میانگین مقادیر هر ویژگی مکانیکی در سطوح مختلف رطوبت برای هر سطح دمای یک رقم برنج (سطر)، و حروف لاتین کوچک، مقایسه میانگین سطوح مختلف دما برای هر سطح رطوبت برای یک رقم برنج (ستون).
- میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

گسیختگی فشاری دانه برنج قهوه‌ای برای ارقام هاشمی و خزر به ترتیب از ۴۲/۴۲ و ۴۱/۷۴ مگاپاسکال در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۱۰/۲ درصد به مقادیر ۱۷/۱۰ و ۱۶/۹۳ مگاپاسکال در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۱۳/۲ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۸ نشان می‌دهد که مقادیر تنش گسیختگی فشاری (مقاومت فشاری) دانه‌های برنج قهوه‌ای در شرایط مختلف رطوبت و دما تغییرات زیادی دارد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با کاهش رطوبت و دمای دانه تنش گسیختگی فشاری دانه برنج قهوه‌ای افزایش می‌یابد. تنش



شکل ۸- تغییرات تنش گسیختگی فشاری دانه برنج قهوه‌ای، (الف) در اثر دما، (ب) در اثر رطوبت

از این رو مقاومت در دو دمای ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد نزدیک به هم و به مقدار بزرگ (به علت حالت شیشه‌ای) اما در دمای ۵۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد هرچند نزدیک به هم اما به مقدار کوچک (به علت وضعیت لاستیکی) دیده می‌شود. وانانن و اکوز (Waananen & Okos, 1992) گزارش کردند که افزایش رطوبت دانه و دمای دانه سبب کاهش تنش گسیختگی فشاری دانه‌های ذرت می‌شود.

با افزایش رطوبت و دمای دانه، کرنش گسیختگی فشاری به آرامی افزایش می‌یابد. داده‌های جدول ۷ نشان می‌دهد که در سطح رطوبت ۱۰/۲ درصد، افزایش دمای دانه باعث افزایش کرنش گسیختگی فشاری دانه شده است. در این مقدار رطوبت، برای دماهای ۳۵ و ۴۵ درجه

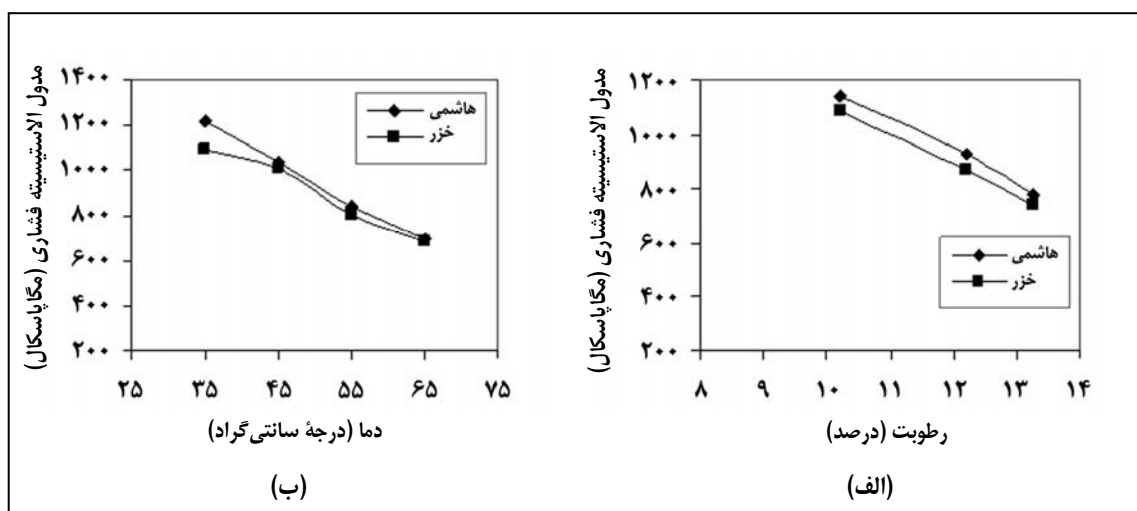
داده‌های جدول ۷ نشان می‌دهد که در هر سطح رطوبت دانه، افزایش دمای دانه سبب کاهش معنی‌دار تنش گسیختگی فشاری دانه شده است. دامنه تغییرات مقادیر تنش گسیختگی فشاری با دما در رطوبت پایین دانه (۱۰/۲ درصد) بیشتر از رطوبت بالا (۱۳/۲۵ درصد) است. این تغییرات را می‌توان با توجه به نمودار انتقال شیشه‌ای (شکل ۱) تفسیر کرد. در سطح رطوبت ۱۰/۲ درصد، افزایش دما از ۳۵ درجه سانتی‌گراد به ۶۵ درجه سانتی‌گراد سبب تغییر وضعیت دانه از حالت شیشه‌ای به لاستیکی می‌شود. برای رطوبت ۱۳/۲۵ درصد در دو دمای ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد دانه وضعیت شیشه‌ای و برای دماهای ۵۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد وضعیت لاستیکی دارد.

بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی...

۷۶۲٫۸۶ تا ۱۱۱۴٫۶۶ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. مقادیر میانگین مدول الاستیسیته در هر سطح رطوبت با کاهش دما به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. مدول الاستیسیته در دماهای بالا (۵۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد) کم‌ترین مقادیر و بیشترین تغییرات را نشان دادند (شیب کاهش مقادیر با افزایش رطوبت در دمای بالا بزرگ‌تر بود). دلیل این است که دانه برنج در دماهای بالاتر حالت پلاستیکی دارد. دانه برنج در رطوبت‌های پایین و دماهای کمتر حالت شیشه‌ای و الاستیک‌تر دارد، از این‌رو مدول الاستیسیته در این شرایط محیطی بیشترین مقدار را دارد. لی و کونزی (Lee & Kunze, 1972) در مقادیر مدول الاستیسیته فشاری محوری دو رقم برنج تفاوتی معنی‌دار مشاهده نکردند و دریافتند که با افزایش رطوبت مقادیر آنها کاهش می‌یابد. برای مواد دانه‌ای دیگر نیز کاهش مقادیر مدول الاستیسیته ظاهری با رطوبت گزارش شده است (Bargale et al., 1994 & 1995a, b).

سانتی‌گراد دانه برنج قهوه‌ای حالت شیشه‌ای دارد و تغییر وضعیت وجود ندارد، در نتیجه مقدار افزایش کرنش گسیختگی کمتر است. در رطوبت ۱۳٫۲ درصد، افزایش دما از ۳۵ به ۶۵ درجه سانتی‌گراد باعث تغییر وضعیت دانه و انتقال از حالت شیشه‌ای به لاستیکی می‌شود، از این‌رو تغییرات کرنش گسیختگی با دما در رطوبت ۱۳٫۲ درصد بیشترین افزایش را نشان می‌دهد. وانان و اکوز (Waananen & Okos, 1992) مشاهده کرده‌اند که افزایش رطوبت و دما باعث افزایش کرنش گسیختگی فشاری در ذرت شده است.

شکل ۹ نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته فشاری دانه‌های برنج قهوه‌ای دو رقم هاشمی و خزر تفاوت معنی‌دار با هم ندارند و با افزایش رطوبت و دمای دانه مقدار آن به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. جدول ۸ نشان می‌دهد که به‌طور متوسط با کاهش رطوبت دانه از ۱۳٫۲۵ به ۱۰٫۲ درصد میانگین مقدار مدول الاستیسیته فشاری از



شکل ۹- تغییرات مدول الاستیسیته فشاری دانه برنج قهوه‌ای، (الف) در اثر رطوبت، (ب) در اثر دما

مدل پیشگویی برخی خواص مکانیکی فشاری دانه برنج قهوه‌ای

در جدول ۹ معادلات رگرسیونی بین متغیرهای دما و رطوبت برای پیشگویی اثر ترکیبی آنها بر نیروی لازم برای شکست دانه و تنش گسیختگی فشاری دو رقم برنج هاشمی و خزر ارائه شده است. این معادلات بر اساس مقادیر میانگین نیروی لازم برای شکست دانه و تنش گسیختگی فشاری برای تیمارهای مختلف هر رقم به دست آمده‌اند.

جدول تجزیه واریانس ۶ نشان می‌دهد که رطوبت و دما به صورت معنی‌دار (به ترتیب در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد) مدول چغرمگی فشاری دانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. داده‌های جدول ۸ نشان می‌دهد که میانگین مقادیر مدول چغرمگی فشاری دانه برنج قهوه‌ای با افزایش رطوبت دانه به طور معنی‌دار کاهش می‌یابد. این تغییرات در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد کم‌تر است و برای دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد اثر رطوبت بر مدول چغرمگی معنی‌دار نیست.

جدول ۹- معادلات رگرسیونی برای پیشگویی اثر رطوبت و دما بر خصوصیات مکانیکی دانه برنج

خواص مکانیکی	رقم	R^2 (درصد)	معادله رگرسیونی*
نیروی لازم برای شکست	هاشمی	۹۵	$F = 227/27 - 12/1894 M - 0/9657 T + 0/0411 M \times T$
دانه (نیوتن)	خزر	۷۶/۹۷	$F = 350/934 - 22/2871 M - 3/9854 T + 0/2915 M \times T$
تنش گسیختگی فشاری	هاشمی	۹۳/۳۶	$S_c = 146/297 - 8/0314 M - 1/1416 T + 0/0592 M \times T$
(مگاپاسکال)	خزر	۹۲/۶۵	$S_c = 120/94 - 6/7748 M - 0/4742 T + 0/01199 M \times T$

* در معادلات M رطوبت دانه به صورت درصد (بر پایه تر) و T دمای دانه (درجه سانتی‌گراد) است.

نتیجه‌گیری

رطوبت به ۱۰/۲ درصد به ترتیب به ۷۶/۲۰ و ۷۵/۷۷ نیوتن افزایش می‌یابد.

- با افزایش دمای دانه نیروی لازم برای شکست دانه کاهش می‌یابد. در محدوده مورد مطالعه، نیروی شکست در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقدار را نشان می‌دهد.
- انرژی شکست دانه با افزایش رطوبت و دمای دانه افزایش می‌یابد. انرژی شکست دانه هاشمی بزرگ‌تر از انرژی شکست رقم خزر است.

نتایج آزمون‌های فشاری (آزمون فشار دانه کامل و آزمون فشار محوری نمونه استوانه‌ای) برای تعیین خواص مکانیکی دانه‌های برنج قهوه‌ای دو رقم هاشمی و خزر در شرایط خشک‌شدن به صورت زیر است:

- رطوبت، بیشترین اثر را بر نیرو و انرژی شکست دانه دارد. به طور میانگین، نیروی لازم برای شکست دانه در رطوبت ۱۳/۲۵ درصد از ۴۵/۸۱ نیوتن برای رقم هاشمی و ۴۶/۸۱ نیوتن برای رقم خزر با کاهش

بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی...

- مدول الاستیسیته ظاهری دانه کامل برنج قهوه‌ای با افزایش رطوبت و کاهش دمای دانه افزایش می‌یابد. رقم، اثری معنی‌دار بر خواص مکانیکی فشاری دانه برنج دارد.
- تغییرات شرایط محیطی دانه اثر زیادی بر تنش گسیختگی فشاری دانه برنج قهوه‌ای نشان می‌دهد. در سطوح دمای ۳۵، ۴۵، ۵۵، و ۶۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۱۰/۲، ۱۲/۲، و ۱۳/۲۵ درصد بر پایه تر، تنش گسیختگی فشاری (مقاومت فشاری) از ۱۶/۴۳ تا ۴۲/۴۲ مگاپاسکال (بیش از ۳ برابر) تغییر می‌کند. با کاهش رطوبت و دمای دانه مقدار تنش گسیختگی فشاری افزایش می‌یابد.
- افزایش رطوبت و دمای دانه باعث افزایش کرنش گسیختگی فشاری می‌شود.
- مدول الاستیسیته فشاری با افزایش رطوبت و دما به صورت خطی کاهش می‌یابد. کاهش مدول الاستیسیته با رطوبت برای دماهای بالا (۵۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد) نسبت به دمای (۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد) بیشتر است.
- مدول چغرمگی با کاهش رطوبت افزایش می‌یابد. این تغییرات مدول چغرمگی با رطوبت در دماهای ۵۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد کوچکتر است.

مراجع

- Anon. 1998. ASAE Standard: ASAE S368.1. Compression tests of food materials of convex shape. ASAE. St. Joseph. MI 49085-9659. USA.
- Arora, V. K., Henderson, S. M. and Burkhardt, T. H. 1973. Rice drying cracking versus thermal and mechanical properties. *Trans. ASAE*. 16(2): 320-327.
- Bargale, P. C. and Irudayaraj, J. M. 1995a. Mechanical strength and rheological behavior of barley kernels. *Int. J. Food Sci. Technol.* 30, 609-623.
- Bargale, P. C., Irudayaraj, J. M. and Marquis, B. 1994. Some mechanical properties and stress relaxation characteristics of lentil. *Can. Agric. Eng.* 36(4): 247-254.
- Bargale, P. C., Irudayaraj, J. M. and Marquis, B. 1995b. Studies on rheological behavior of canola and wheat. *J. Agric. Eng. Res.* 61, 267-274.
- Chen, Y. L. and Kunze, O. R. 1983. Effect of environmental changes on rice yield and particle size of broken kernels. *Cereal Chem.* 60(3): 238-241.
- Cnossen, A. G. and Siebenmorgen, T. J. 2000. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect on milling quality. *Trans. ASAE*. 43(6): 1661-1667.
- Cnossen, A. G., Jimenez, M. J. and Siebenmorgen, T. J. 2003. Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. *J. Food Eng.* 59(1): 61-69.
- Cnossen, A. G., Siebenmorgen, T. J., Yang, W. and Bautista, R. C. 2001. An application of glass transition temperature to explain rice kernel fissure occurrence during the drying process. *Drying Technol.* 19(8): 1661-1682.

- Gustafson, R. J., Thompson, D. R. and Sokhansanj, S. 1979. Temperature and stress analysis of corn kernel - Finite element analysis. *Trans. ASAE.* 22, 995-960.
- Haghighi, K. and Segerlind, L. J. 1988. Failure of biomaterials subjected to temperature and moisture gradients using the finite element method: II- stress analysis of an isotropic sphere during drying. *Trans. ASAE.* 31(3): 938-946.
- Hammerle, J. R. and Mohsenin, N. N. 1970. Tensile relaxation modulus of corn horny endosperm as a function of time, temperature and moisture content. *Trans. ASAE.* 13(3): 372-375.
- Husain, A. K., Agarwal, K., Ojha, T. P. and Bohle, N. G. 1971. Viscoelastic behavior of rough rice. *Trans. ASAE.* 14(2): 313-318.
- Jia, C. C., Yang, W., Siebenmorgen, T. J. and Clossen, A. G. 2002. Development of computer simulation software for single grain kernel drying, tempering, and stress analysis. *Trans. ASAE.* 45(5): 1485-1492.
- Kamst, G. F., Bonazzi, C., Vasseur, J. and Bimbenent, J. J. 2002. Effect of deformation rate and moisture content of the mechanical properties of rice grains. *Trans. ASAE.* 45(1): 145-151.
- Kunze, O. R. 1979. Fissuring of the rice grain after heated air drying. *Trans. ASAE.* 22(5): 1197-1207.
- Kunze, O. R. and Choudhury, M. S. U. 1972. Moisture adsorption related to the tensile strength of rice. *Cereal Chem.* 49(6): 684-696.
- Lan, Y. and Kunze, O. R. 1996. Fissure resistance of rice varieties. *Appl. Eng. Agric.* 12(3): 365-368.
- Lee, K. W. and Kunze, O. R. 1972. Temperature and moisture effects on mechanical properties of rice. Paper No. 72-338. ASAE. St. Joseph. MI. 49085-9659. USA.
- Liu, M., Haghighi, K. and Stroshine, R. L. 1989. Viscoelastic characterization of the soybean seedcoat. *Trans. ASAE.* 32(3): 946-952.
- Liu, M., Haghighi, K., Stroshine, R. L. and Ting, E. C. 1990. Mechanical properties of the soybean cotyledon and failure strength of soybean kernels. *Trans. ASAE.* 33(2): 559-566.
- Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Pub. New York.
- Nalladurai, K., Alagusundaram, K. and Gayathri, P. 2003. Effects of variety and moisture content on the engineering properties of paddy and rice. *AMA.* 34(2): 47-52.
- Prasad, S. and Gupta, C. P. 1973. Behavior of paddy grains under quasi-static compressive loading. *Trans. ASAE.* 16(2): 328-330.
- Sarker, N. N., Kunze, O. R. and Strouboulis, T. 1996. Transient moisture gradients rough rice mapped with finite element model and related to fissure after heated air drying. *Trans. ASAE.* 39(2): 625-631.

بررسی و تعیین تأثیر رطوبت و دمای دانه بر خواص مکانیکی...

Sitkei, G. 1986. Mechanics of agricultural materials. Elsevier Science Pub. Amsterdam.

Stroshine, R. and Hamann, D. 1994. Physical properties of agricultural materials and food products. Course Manual. Purdue University Press. West Lafayette. Indiana.

Tavakoli, T. (Translator). 2003. Mechanics of agricultural materials. Zanzan University Pub. Zanzan. Iran. (in Farsi)

Waananen, K. M. and Okos, M. R. 1988. Failure properties of yellow-dent corn kernels. Trans. ASAE. 31(6): 1816-1827.

Wouters, A. and de Baerdemaeker, J. 1988. Effect of moisture content on mechanical properties of rice kernels under quasi-static compressive loading. J. Food Eng. 7, 83-111.

Yazdi Samadi, B., Rezaei, A. and Valyzadeh, M. 1996. Statistical designs in agricultural research. Tehran University Pub. Tehran. Iran. (in Farsi)



Investigation and Determination of Moisture Content and Temperature Effects on the Mechanical Properties of Brown Rice

A. M. Kermani*, T. Tavakoli Hashjin and S. Minaei

* Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Agricultural and Natural Resources Research Center, P. O. Box: 34185-618, Ghazvin, Iran. E-mail: a_m_kermani@yahoo.com

An understanding of the strength of rice grains as affected by moisture content and temperature is important for analysis and prediction of cracking and/or breakage behavior during handling and processing. Further, the magnitude of these properties at various moisture contents and temperatures is needed for the accurate design of milling machinery so that grain damage is minimized. To determine the compressive mechanical properties of grains, two types of quasi-static compressive tests, whole kernel and uniaxial compressive tests, of core specimens were performed at three moisture contents, 10.2%, 12.2% and 13.25% (w.b.), at grain temperatures of 35, 45, 55 and 64°C. Failure force, deformation and energy at the breaking point and apparent elasticity modulus were determined for whole grain tests, and compressive strength, failure strain, toughness modulus and compression modulus of elasticity were determined for uniaxial compressive tests. Statistical analysis of the mechanical tests results indicated that moisture content and temperature have a strong influence on the properties examined. There was no significant effect on rice compressive failure properties. Moisture content had the greatest effect on the mechanical properties of rice. In general, all strength values except compressive strain increased as moisture content and/or temperature of grains decreased. For the different rice grain conditions studied, failure force varied from between 37.01 to 89.96N, while compressive strength varied from between 16.43 and 44.42MPa.

Key Words: Apparent Modulus of Elasticity, Breaking Force, Compression Strength, Mechanical Properties, Moisture Content, Temperature