تعیین خواص مکانیکی دانهٔ برنج و بررسی اثر سرعت بارگذاری فشاری

علی‌ماشاءاله کرمانی[۱]، تیمور توکلی هشجین[۲*]، سعید مینایی[۲] و

محمدهادی خوش‌تقاضا[۲]

۱- دانش آموخته دوره دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

آزمون‌های فشاری شبه استاتیک برای تعیین خواص مکانیکی دانه‌های برنج قهوه‌ای روی دانه کامل رقم هاشمی و نمونه‌های آماده شده از برش دو انتهای دانهٔ برنج رقم خزر در امتداد محور طولی دانه انجام شد. مقادیر نیرو و انرژی شکست، مدول الاستیسیته ظاهری و تغییرشکل دانه‌های برنج هاشمی در دو سطح رطوبت ۱۱٪ و ۱۷٪ بر پایهٔ تر، تنش و کرنش گسیختگی، مدول الاستیسیتهٔ فشاری ظاهری و چغرمگی دانه‌های برنج خزر در رطوبت ۱٤٪ بر پایهٔ تر به ترتیب در چهار و پنج سطح سرعت بارگذاری در محدودهٔ ۰/۵ mm/min تا ۵/۵ mm/min تعیین شدند. تحلیل نتایج نشان داد که بطور کلی سرعت بارگذاری اثر معناداری بر مقادیر کلیهٔ خواص مکانیکی ندارد. در حالی‌که اثر رطوبت بر تمام خواص مکانیکی معنادار است. با کاهش رطوبت دانه مقادیر این خواص همگی افزایش می‌یابند. با کاهش رطوبت دانه‌های برنج رقم هاشمی از ۱۷٪ بر پایهٔ تر به ۱۱٪ مقادیر نیرو و انرژی شکست دانه بیش از دو برابر افزایش می‌یابند. نیروی شکست بطور متوسط از ۵۵/۹٦ تا ۱۱۵/۷٤ نیوتن و انرژی شکست دانه از ۲/۰۱ تا ۵/۲۳ میلی‌ژول افزایش می‌یابد. مدول متوسط الاستیسیته ظاهری دانهٔ برنج هاشمی از ۱/۷٦۲ GPa در رطوبت ۱۷٪ به ۲/۸۳۵ GPa در رطوبت ۱۱٪ افزایش می‌یابد. در رطوبت ۱٤٪ بر پایهٔ تر متوسط تنش و کرنش گسیختگی دانهٔ رقم خزر ۰/٦±۳٦/۳۹۲ MPa و ۰/۰۰۰۸±۰/٦ mm/mm تعیین شدند. مدول الاستیسیتهٔ ظاهری فشاری دانهٔ برنج خزر ۹۷۳/۳۵۷ MPa تعیین شد.

کلید واژگان: خواص مکانیکی، دانهٔ برنج، مقاومت نهایی، تنش گسیختگی، بارگذاری فشاری

۱- مقدمه

برنج در رژیم غذایی مردم جهان اهمیّت خاصی پیدا کرده و در کشور ما ، ایران ، پس از گندم دومیّن مادهٔ غذایی مورد مصرف اکثر مردم است. از این‌رو برنج به عنوان کالایی استراتژیک محسوب می‌شود. تفاوت برنج با سایر غلات که معمولاً بصورت آرد مصرف می‌شوند، این است که عمدتاً بصورت دانهٔ سالم مصرف می‌شود و ارزش اقتصادی آن به میزان زیادی به برنج سالم تولید شده دانه‌های برنج به هنگام انتقال و عملیات برنج‌کوبی تحت تأثیر بارهای فشاری زیادی قرار می‌گیرند. شناخت خواص مقاومتی دانه‌های برنج و اثر رطوبت دانه روی آن‌ها در تحلیل و پیشگویی رفتار شکستگی آن‌ها به هنگام انتقال وفرآوری مهّم است. مقادیراین خواص جهت طراحی دقیق ماشین‌آلات برنج کوبی جهت به حداقل رساندن صدمات، لازم وضروری است[۱] خواص مکانیکی مواد به عنوان هر چیزی که رفتار آن‌ها را تحت اثر نیروهای وارده بیان کند تعریف می‌شود [۲]. خواص مکانیکی دانهٔ برنج شامل ویژگی‌های فشاری ، کششی و خمشی توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

* مسئول مکاتبات: ttavakol@modares.ac.ir

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-18]

کونزی و چودهاری [۳] مقاومت کششی دانه‌های برنج قهوه‌ای دو رقم برنج را در شرایط جذب رطوبت از طریق آزمون کشش محوری تعیین کردند. آنان تغییرات مقاومت کششی دانه‌های برنج قهوه‌ای در فواصل زمانی مختلف بعد از قرارگیری در محیط با رطوبت نسبی بالاتر را تعیین کردند. نتایج آزمایش‌ها تغییرات بزرگی در مقاومت کششی نشان داد. آنان مشاهده کردند که مقاومت کششی از ۱٤/۳ MPa در محیط با رطوبت نسبی ٤٤٪ تا ۳/۱٤ MPa بعد از قرارگیری در محیط ۱۰۰٪ کاهش می‌یابد. لی و کونزی [٤] اثرات دما و رطوبت بر خواص مکانیکی کششی و فشاری (تنش و کرنش نهایی، حد تناسب، مدول الاستیسیته و چغرمگی) دانه‌های برنج دو رقم دانه بلند و دانه متوسط را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی برنج به رطوبت، رقم و دما بستگی دارد. رطوبت بزرگ‌ترین اثر را بر خواص مکانیکی دارد. بطورکلی مقاومت مکانیکی برنج با کاهش رطوبت دانه، افزایش می‌یابد. مقادیر مقاومت کششی برنج از ۱,۷٤٤ تا ۱۸,۹٦۰ کیلوپاسکال و مقادیر مقاومت فشاری از $۱۵/٤\times۱۰^{۳}$ کیلوپاسکال تا $۱۸۸/٦\times۱۰^{۳}$ کیلوپاسکال در محدودهٔ رطوبت ۱۹/۵ تا ٦ درصد (بر پایهٔ خشک) تغییر می‌کند. میزان تغییرات مقاومت کششی رقم دانه بلند بیشتر از رقم دانه متوسط بوده و رقم اثر معناداری بر مقاومت کششی دارد. مقاومت کششی رقم دانه بلند بیشتر از رقم دانه متوسط است. مدول الاستیسیته برنج دانه بلند بیشتر از برنج دانه متوسط بود. بیشترین مقدار مدول الاستیسیته در دانه‌های با رطوبت پایین مشاهده گردید. رطوبت دانه روی مدول چغرمگی دانه اثر معناداری دارد و شبیه اثر آن بر مدول الاستیسیته است. عموماً با افزایش رطوبت دانه مدول چغرمگی کششی و فشاری کاهش می‌یابند. پراساد و گوپتا [۵] دانه‌های شلتوک دو رقم برنج را در وضعیت به پهلو با سرعت‌های مختلف بارگذاری در محدودهٔ ۰/۵ تا ۱۰ میلی‌متر در دقیقه و رطوبت دانه‌ها در محدودهٔ ۱۲٪ تا ۲٤٪ بر پایه خشک تعیین کردند. آنان مشاهده کردند که رطوبت مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر خواص مکانیکی است. در رطوبت‌های بالا خواص ویسکوز غالب‌اند و در رطوبت‌های پایین خواص الاستیکی. آنان مشاهده کردند که تغییرات مقادیر نقطهٔ تسلیم در محدودهٔ رطوبت ۱۲٪ تا ۱۸٪ (بر پایهٔ خشک) بیشتر از تغییرات آن در محدوده ۱۸٪ تا ۲٤٪ (بر پایهٔ خشک) است. همچنین مقادیر آن برای سرعت‌های بارگذاری بیشتر، بزرگ‌تر است. نقطه تسلیم و مقاومت نهایی فشاری دانه‌های شلتوک در محدودهٔ رطوبت ۱۲ تا ۱٤٪ (بر پایهٔ خشک) به ترتیب از ۱۷/۸٤ تا ۱۰۰/۵۵ نیوتن و ٤۰/٦۱ تا ۱٦۰/٦۹ نیوتن تغییر می‌کند. ووترز و دِبائردمیکر [۱] اثر رطوبت بر خواص مکانیکی دانهٔ برنج را در بارگذاری فشاری بر روی نمونه‌های تهیّه شده از برش دو انتهای دانه‌های برنج را مطالعه کردند. آنان مدول الاستیسیته ظاهری، تنش و کرنش گسیختگی دانهٔ برنج را در ۵ یا ٦ سطح در محدوده ۵٪ تا ۳۰٪ بر پایهٔ خشک را در دو سرعت بارگذاری ۵ mm/min و ۱۰ mm/min تعیین کردند. تحلیل آماری نتایج نشان داد که رطوبت اثر معناداری بر خواص مطالعه شده، خصوصاً در محدودهٔ رطوبت ۱۲٪ تا ۱۸٪ بر پایهٔ خشک دارد. بر اساس نتایج آن‌ها سرعت بارگذاری بر خواص مکانیکی اثر معناداری ندارد.

متأسفانه اطلاعاتی پیرامون خواص مکانیکی دانه‌های برنج ارقام داخلی وجود ندارد. از این‌رو به لحاظ اهمّیت دانستن مقادیر این خواص، در تحقیق حاضر خواص مقاومت فشاری دو رقم برنج داخلی تعیین می‌گردد. بنابراین اهداف تحقیق عبارتند از:

۱- تعیین نیرو، تغییرشکل و انرژی شکست، مدول الاستیسیتهٔ ظاهری و تنش و کرنش گسیختگی دانه‌های برنج

۲- بررسی اثر سرعت بارگذاری و رطوبت بر این خواص

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده‌سازی دانه‌های برنج

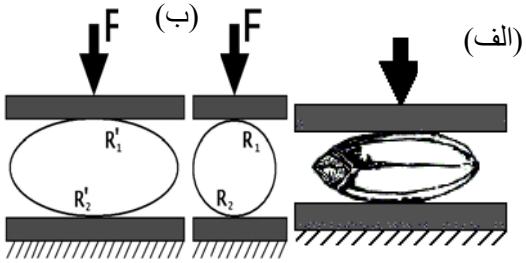
برای انجام آزمایش‌های فشاری دو رقم برنج متداول داخلی یکی رقم محلی هاشمی و دیگری رقم اصلاح‌شده و پر محصول خزر انتخاب گردید. رطوبت اولیهٔ شلتوک این دانه‌ها با قرار دادن سه نمونهٔ ۱۵ گرمی درون آون با دمای ۱۳۰°C به مدت ۲۰ ساعت [۷] به ترتیب ۱۸/٤٪ و ۱۷٪ بر پایهٔ تر تعیین شد. یکی از اهداف اصلی تحقیق، بررسی اثر سرعت بارگذاری (سرعت تغییرشکل) بر کلیهٔ خواص مکانیکی دانهٔ برنج بوده است. از این‌رو در تحقیق حاضر دو حالت بارگذاری فشاری بر دانهٔ برنج مورد توجّه قرار گرفت و برای هر حالت پارامترهای

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-18]

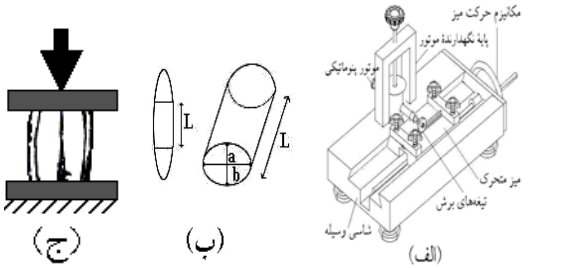
مربوطه تعیین و مورد بررسی قرار گرفت. یکی حالت بارگذاری فشاری روی دانهٔ برنج قهوه‌ای کامل است که برای رقم هاشمی انجام شد، و دیگری حالت بارگذاری فشاری روی نمونه‌های تهیّه شده از برش دو انتهای دانهٔ برنج قهوه‌ای (نمونهٔ استوانه‌ای از دانه)، که برای دانه‌های رقم خزر صورت گرفت. برای در نظر گرفتن اثر رطوبت دانه روی خواص مکانیکی، شلتوک هاشمی در دو سطح رطوبت ۱۱٪ و ۱۷٪ بر پایهٔ تر و رقم خزر تنها در رطوبت ۱٤٪ بر پایهٔ تر تعیین شدند. شلتوک‌ها بصورت لایه نازک (لایهٔ شلتوک به ضخامت سه دانه) با دمای هوای خشک‌کن ۳۵°C توسط خشک‌کن آزمایشگاهی تا سطوح مطلوب خشک شدند.

۲-۲- آزمون‌های فشاری

برای دانه‌های برنج هاشمی مطابق شکل ۱ آزمون فشار روی دانه‌های کامل و سالم (بدون ترک) برنج قهوه‌ای در وضعیت به پهلو و با عامل بارگذاری صفحه تخت انجام گرفت.آزمون فشار محوری برای دانه‌های برنج رقم خزر بر روی نمونه‌های تهیّه شدهٔ حاصل از برش دو انتهای دانهٔ برنج قهوه‌ای در جهت محور طولی دانه (نمونهٔ استوانه‌ای) انجام شد. برای تهیّهٔ نمونهٔ استوانه‌ای یک وسیلهٔ برش دانه ساخته شد. این ابزار تشکیل شده است از یک موتور پنوماتیک با سرعت ٥٤,۰۰۰ دور بر دقیقه که بر روی یک شاسی تثبیت شده و دو تیغهٔ (ارّهٔ) برشی با فاصلهٔ حدود ۳/۷ میلی‌متر را روی یک محور می‌گرداند. شکل ۲ وسیلهٔ برش دانه و طرح‌وارهٔ حالت بارگذاری فشاری محوری را نشان می‌دهد.



شکل ۱ الف- طرح‌وارهٔ بارگذاری فشاری دانهٔ برنج قهوه‌ای رقم هاشمی، ب- شعاع‌های انحناء در نقاط تماس دانه با سطوح بارگذاری تخت.



شکل ۲ طرح‌واره‌های الف- وسیلهٔ برش دانه، ب- نمونهٔ استوانه‌ای جهت آزمون فشار محوری، ج- بارگذاری فشار محوری

آزمون‌های فشاری به وسیلهٔ ماشین آزمون مواد Hounsfiled مدل H50k-s ساخت انگلستان انجام شد. این ماشین به یک دستگاه رایانه متصل است و از طریق نرم‌افزار مربوطه تنظیمات آزمایش اعمال شده و داده‌های نیرو- تغییرشکل برای هر آزمایش ثبت می‌گردد. برای شرایط بارگذاری شبه استاتیک، سرعت‌های بارگذاری در آزمون‌های روی دانهٔ کامل برنج هاشمی عبارت بودند از ۱، ۲/۵، ٤ و ۵/۵ میلی‌متر در دقیقه و برای نمونه‌های استوانه‌ای رقم خزر ۰/۵۰، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه. آزمایش‌ها برای هر تیمار در پنج تکرار انجام گرفت.

۲-۳- تعیین خواص مکانیکی

منحنی نیرو- تغییرشکل و داده‌های خام آن بصورت فایل Excel برای هر آزمایش از طریق برنامهٔ نرم‌افزاری دستگاه آزمون گرفته شد. از روی داده‌های هر آزمایش نقطهٔ شکست[1] مشخص گردید. خواص مکانیکی آزمون فشار دانهٔ کامل شامل نیروی شکست (نیروی گسیختگی.[2])دانه و تغییرشکل در نقطهٔ شکست از روی مقادیر داده‌های منحنی نیرو- تغییرشکل تعیین شدند. انرژی شکست[3] از محاسبهٔ مساحت سطح زیر منحنی نیرو- تغییرشکل تا نقطهٔ گسیختگی، تعیین شد. برای محاسبهٔ مقدار مدول الاستیسیتهٔ ظاهری[4] دانه در بارگذاری روی دانهٔ کامل (شکل ۱)، از روابط حاصل از تئوری هرتز استفاده گردید [۲]. با توجّه به حالت بارگذاری و شکل متقارن و بیضوی دانهٔ برنج، مقادیر $R'_1=R'_2$ و $R_1=R_2$ (شکل ۱)، و در نتیجه معادلهٔ مربوط بصورت معادلهٔ ۱ ساده گردید. بعلت شکل خطی منحنی نیرو- تغییرشکل (شکل ۳ الف) مقادیر نیرو و

1.Rupture point
2.Failure force
3.Breaking energy
4.Apparent elasticity modulus

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-18]

تغییرشکل نقطهٔ گسیختگی در معادلهٔ ۱ قرار داده شد و محاسبات انجام گرفت.

(۱)

$$E=\frac{0.956K^{\frac{3}{2}}F(1-\mu^2)}{D^{\frac{3}{2}}}\left[\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_1'}\right]^{\frac{1}{2}}$$

که در آن، E= مدول الاستیسیتهٔ ظاهری دانه، (Pa)

F= مقدار نیروی فشاری از منحنی نیرو ــ تغییرشکل، (N)

D= مقدار تغییرشکل متناظر با نیروی قرائت شده از منحنی نیرو ــ تغییرشکل، (m)

R_1= شعاع انحناء حداقل دانه در نقاط تماس، (m)

R'_1= شعاع انحناء حداکثر دانه در نقاط تماس، (m)

K= فاکتور بدون بعد وابسته به ویژگی هندسی صفحهٔ تخت بارگذاری و دانه، ۱/۰۷۵ [۲]

μ= نسبت پواسون برابر ۰/٤٥، (بدون بعد)

[۹]مقادیر شعاع‌های بیشینه و کمینهٔ سطح (رویهٔ) دانهٔ برنج در نقطهٔ تماس با سطح بارگذاری تخت با توجّه به ابعاد دانهٔ برنج قهوه‌ای (طول متوسط l=۷/۷۰۳ mm، پهنای متوسط a=۲/۰٤ mm، ضخامت متوسط b=۱/۷۱mm) از روابط زیر بدست آمد:

(۲)

$$R_1=\frac{a^2+b^2}{4b}=R_{\min}=1.036\times10^{-3}m$$

(۳)

$$R_1'=\frac{l^2+b^2}{4b}=R_{\max}=9.103\times10^{-3}m$$

در آزمون فشار محوری تنش گسیختگی[۱] از تقسیم نیروی گسیختگی بر سطح مقطع متوسط نمونهٔ استوانه‌ای، محاسبه گردید. اندازهٔ متوسط سطح مقطع نمونه‌های استوانه‌ای شکل، از محاسبهٔ میانگین مساحت دو انتهای دانه که تقریباً بیضی شکل است [۷]، بدست آمد. کرنش گسیختگی[۲] با تعیین میزان تغییرشکل دانه در نقطهٔ گسیختگی از داده‌های آزمایش و تقسیم آن بر طول اولیهٔ نمونه محاسبه گردید. ابعاد مورد نیاز دانه و نمونهٔ استوانه‌ای (شکل ۲) برای محاسبه خواص مکانیکی توسط کولیس دیجیتال Mitutoyo ساخت ژاپن با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر تعیین شد. چغرمگی[۳] برای دانه‌های برنج خزر از محاسبهٔ انرژی شکست واحد حجم نمونه (استوانه با مقطع بیضی) محاسبه گردید [۸]. برای بارگذاری محوری، مدول الاستیسیته فشاری از معادلهٔ ٤ محاسبه گردید.

(٤)

$$E=\frac{\Delta F\cdot L}{\Delta L\cdot A}$$

که در آن، E = مدول الاستیسیته ظاهری فشاری، (Pa)

L = طول نمونه، (mm)

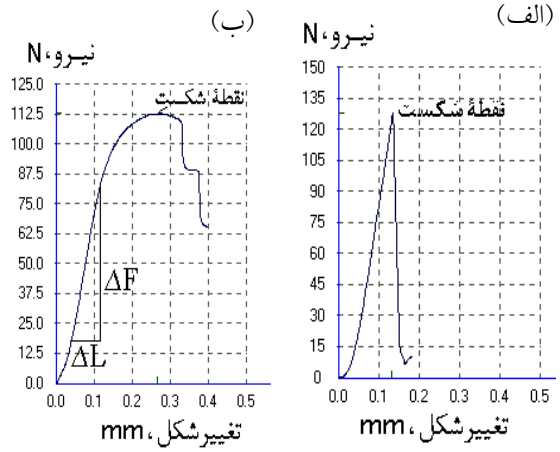
A = مساحت متوسط مقطع نمونه، (mm^2)

مقادیر ΔF و ΔL برای بخش $\frac{1}{3}$ میانی منحنی نیرو ــ تغییرشکل که خطی است، استفاده شد.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها بصورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایهٔ کاملاً تصادفی توسط برنامه‌های Minitab v.13 و MSTAT-C تحلیل شدند.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۳ نمونه‌ای از منحنی نیرو ــ تغییرشکل برای هر دو آزمون فشاری نشان داده شده است.



شکل ۳ نمونهٔ منحنی‌های نیرو ــ تغییرشکل برای دو حالت بارگذاری فشاری الف- روی برنج قهوه‌ای دانهٔ سالم و کامل رقم هاشمی رطوبت ۱۱٪ بر پایهٔ تر ب- روی نمونهٔ آماده شده از برش دو انتهای دانه برنج قهوه‌ای رقم خزر رطوبت ۱٤٪ بر پایهٔ تر

نقطه‌ای از منحنی که بطور ناگهانی افت می‌کند، نقطهٔ گسیختگی است. همان‌طوری که از شکل مشخص است در بارگذاری روی دانهٔ کامل نمودار تقریباً خطی است، و برای بارگذاری محوری روی نمونهٔ تقریباً استوانه‌ای بعد از بخش اول که بصورت خطی است، در ادامه تا نقطهٔ گسیختگی دارای

5. Failure stress
6.Failure strain
7.Toughness modulus

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-18]

انحناء با تقعر بسوی پایین می‌گردد. در تحقیق لی و کونزی [٤] نیز برای منحنی‌های نیرو ــ تغییرشکل چنین موردی مشاهده شده است. در هر دو نوع بارگذاری بخش اول منحنی تقعر کوچکی بسوی بالا دارد. این وضعیت بعلت تماس ناتمام به هنگام شروع بارگذاری ناشی از سطح ناهموار دانه یا انتهای برش خورده است که اجتناب ناپذیر است و در تحقیقات محققان دیگر [۱ و ٤] نیز بدان اشاره شده است.

۳-۱-آزمون فشارروی دانهٔ برنج قهوه‌ای سالم و کامل

نتایج تجزیه واریانس و تحلیل نتایج آزمون فشاری دانه‌های برنج قهوه‌ای رقم هاشمی در جدول ۱ آمده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که رطوبت دانه روی کلیهٔ خواص مکانیکی اثر معناداری دارد، در حالی‌که سرعت بارگذاری اثر معناداری براین خواص ندارد. نتایج ووترز و دِبائردمیکر [۱] نیز حاکی ازاثر معنادار رطوبت و معنادار نبودن اثر سرعت بارگذاری بر خواص مکانیکی دانهٔ برنج است. این در حالی است که پراساد و گوپتا [۵] نتیجه‌گیری کردند که سرعت بارگذاری اثر زیادی روی خواص مکانیکی دانه‌های شلتوک دارد و با افزایش سرعت بارگذاری این خواص عموماً افزایش می‌یابند.

جدول ۱ نتایج تجزیهٔ واریانس مقادیر خواص مکانیکی در آزمون فشار روی دانهٔ سالم برنج قهوه‌ای رقم هاشمی

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات (MS)				
		شکست نیروی	شکست انرژی	شکست نقطهٔ تغییر شکل	مدول الاستیسیته
رطوبت	۱	۵/۵٦۷**	۰/۹۱۸*	۰/۰۰۳**	۱۱۸۰/٤**
سرعت بارگذاری	۳	۰/۰۰۹ns	۰/۰۳۰ns	۰/۰۰۰ns	۱۱/۹ns
رطوبت×سرعت بارگذاری	۳	۰/۰۰۱ns	۰/۰۵۳ns	۰/۰۰۰ns	۱٤/۲ns
خطا	۳۲	۰/۰۰۸	۰/۱۱٤	۰/۰۰۰	۱٤/۳
ضریب تغییرات (C.V.)	-	٪۲/۰۲	٪۱۰/٦	٪۱۲/۱۲	٪۸/۰۵

- معنادار در سطح احتمال ۵٪، ** معنادار در سطح احتمال ۱٪، ns در سطح احتمال ۵٪ معنادار نیست

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر سرعت بار گذاری بر مقادیرمدول الاستیسیته ونحوهٔ تغییر آن با سرعت بارگذاری با وجودمعنی دار نبودن آزمون F[1] (تجزیهٔ واریانس) [۱۰] آزمون مقایسهٔ میانگین چند دامنه‌ای دانکن[2] برای مقادیر مدول الاستیسیتهٔ ظاهری دانه‌های کامل برنج هاشمی اثر متقابل دوگانهٔ رطوبت × سرعت بارگذاری، انجام گرفت (جدول ۲)مقایسهٔ میانگین‌ها نشان می‌دهد که تقریباً از سرعت ۲/۵ تا میلی متر بر دقیقه با افزایش سرعت بارگذاری مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. این موضوع حاکی از این است که دانهٔ برنج رفتاری ویسکوالاستیک دارد. دلیل معنی‌دار شدن سرعت بارگذاری در آزمون چند دامنه‌ای دانکن این است که میانگین تیمارهای مختلف رطوبت × سرعت بارگذاری بطور قرینه‌ای در اطراف میانگین کل آزمایش(۲/۱۸۳GPa)قرار گرفته‌انداین امر موجب کوچک شدن واریانس تیمار و در نتیجه معنی‌دار نبودن آن در تجزیهٔ واریانس شده است، در صورتی که بین کوچک‌ترین مقدار (۱/٦۱۱GPa) و بزرگ‌ترین آن‌ها(۲/۸۲۱GPa) تفاوت بارزی مشاهده شده است.نمودارهای شکل ٤ تغییرات مقادیر نیروی شکست، انرژی شکست، میزان تغییر شکل دانه در نقطهٔ شکست و مدول الاستیسیتهٔ دانه‌های برنج قهوه‌ای کامل و سالم رقم هاشمی درسرعت‌های مختلف بارگذاری ۱، ۲/۵، ٤ و ۵/۵ میلی‌متردر دقیقه را برای دو سطح رطوبت ۱۱٪ و ۱۷٪ بر پایهٔ ترنشان می‌دهند. از نمودارها ملاحظه می‌گردد که با کاهش رطوبت دانه کلیهٔ ویژگی‌های مکانیکی دانه افزایش می‌یابند درجدول ۳ مقادیر متوسط خواص مکانیکی دانهٔ برنج قهوه‌ای رقم هاشمی در دو رطوبت ۱۱٪ و ۱۷٪ بر پایهٔ تر برای کلیهٔ سرعت‌های بارگذاری شبه استاتیک بطور خلاصه آمده است.

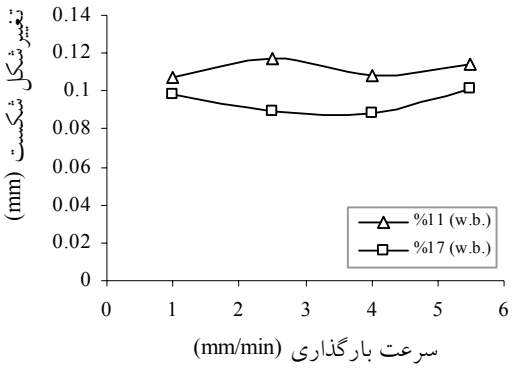
جدول ۲ مقایسهٔ میانگین اثر سرعت بارگذاری بر مدول الاستیسیته ظاهری دانه‌های کامل برنج قهوه‌ای هاشمی ($LSD_{۵\%}$=0.2340)

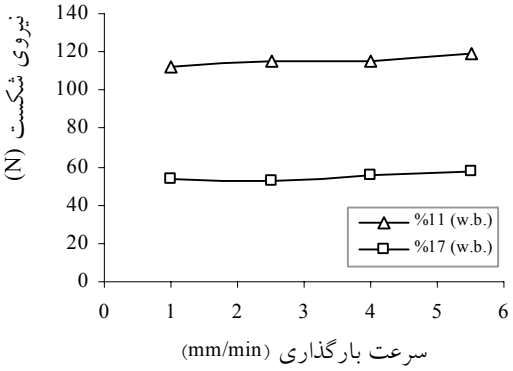
سرعت بارگذاری (mm/min)	مدول الاستیسیته رطوبت، (GPa)	
	رطوبت۱۱٪(برپایهٔ تر)	رطوبت۱٤٪(برپایهٔ تر)
۱	۲/۸۲۱a	۱/۷۱۹c
۲/۵	۲/۵۳۹b	۱/٦۱۱c
٤	۲/٦۵۲ab	۱/۷۲۵c
۵/۵	۲/۷۵٦ab	۱/٦۳۸c

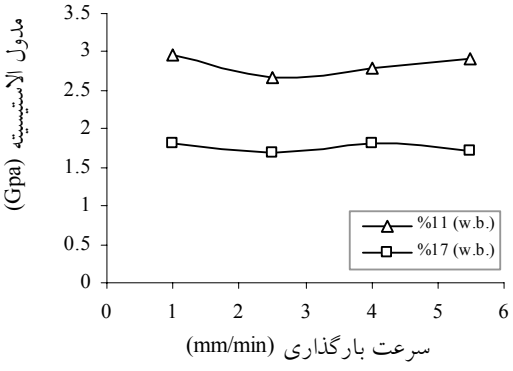
میانگین‌های دارای حروف مشترک بر مبنای آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت آماری معنادار ندارند

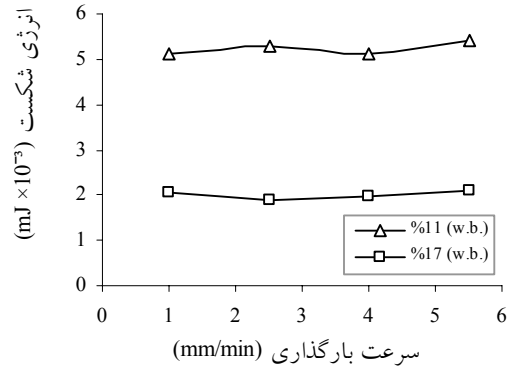
1.F-test
2.Duncan's multiple range test

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-18]









شکل ٤ اثر سرعت تغییرشکل و رطوبت دانه روی نیرو، انرژی و میزان تغییرشکل در نقطهٔ شکست و مدول الاستیسیتهٔ ظاهری دانهٔ برنج قهوه‌ای رقم هاشمی

مشاهده می‌گردد که کاهش رطوبت دانه از ۱۷٪ به ۱۱٪ سبب افزایش حدود دو برابری مقادیر نیرو و انرژی شکست دانه می‌گردد. نیروی شکست دانه از ٥٤/٩٦ نیوتن به ۱۱٥/٧٤نیوتن و انرژی شکست دانه از ۲/۰۱ میلی‌ژول تا ٥/۲۳ میلی‌ژول افزایش می‌یابند. این تفاوت نسبتاً زیاد بدین علت است که دانهٔ برنج تحت بارگذاری در رطوبت ۱۷٪ رفتاری پلاستیکی داشته و از خصوصیت الاستیکی آن کاسته شده است،در حالی که در رطوبت۱۱٪ رفتاری شبیه به مواد الاستیک دارد. از تغییرات مقادیر ویژگی‌های مکانیکی بارطوبت دانه مشخص می‌گردد که اهمیّت کاهش رطوبت دانه‌های برنج علاوه بر حفظ و نگهداری شلتوک، افزایش مقاومت دانه برای تحمل عملیات تبدیل است. بنابراین با بررسی ویژگی‌های مکانیکی می‌توان در تعیین بهترین رطوبت دانه برای انجام عملیات تبدیل اقدام کرد.

جدول ۳ مقادیر متوسط خواص مقاومتی فشاری شبه استاتیک دانهٔ کامل برنج قهوه‌ای رقم هاشمی

خواص مکانیکی	رطوبت ۱۱٪ (بر پایهٔتر)		رطوبت ۱۷٪ (بر پایهٔتر)	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
نیروی شکست(N)	۱۱٥/٧٤	۳/۰۰	٥٤/٩٦	۲/۰۹
تغییرشکل در نقطهٔ شکست (mm)	۰/۱۱۲	۰/۰۰٥	۰/۰۹٤	۰/۰۰٦
انرژی شکست(mJ)	٥/۲۳	۰/۱٦	۲/۰۱۳	۰/۰۹
مدول الاستیسیتهٔ ظاهری (Pa)	۲۸۳٥/٥۳۷	۰/۱۳	۱۷٦۲/٤٦۳	۰/۰٦

۳-۲-آزمون فشارمحوری روی نمونهٔاستوانه‌ای دانه

نتایج حاصل از تجزیهٔ واریانس مقادیر خواص مکانیکی در آزمون فشار محوری (جدول ٤) روی نمونه‌های استوانه‌ای برنج قهوه‌ای رقم خزر نشان داد که سرعت بارگذاری تأثیر معناداری بر هیچ‌یک از ویژگی‌های مکانیکی مورد مطالعه ندارد.جدول ٥ مقادیر میانگین ویژگی‌های مکانیکی فشار محوری دانهٔ برنج

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-18]

قهوه‌ای رقم خزر را در رطوبت ١٤٪ بر پایهٔ تر و سرعت‌های شبه استاتیک نشان می‌دهد.

جدول ٤ نتایج تجزیهٔ واریانس مقادیر خواص مکانیکی آزمون فشار محوری روی نمونهٔ استوانه‌ای برنج رقم خزردررطوبت ١٤٪ برپایهٔ تر

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات (MS)			
		تنش گسیختگی	کرنش گسیختگی	چغرمگی	مدول الاستیسیته
سرعت بارگذاری	٤	۰/۰۰۲^{ns}	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۲۵^{ns}	۰/۰۱۳^{ns}
خطا	۲۰	۰/۰۱۵	۰/۰۱٦	۰/۰۷۲	۰/۰۳۷
ضریب تغییرات (C. V.)	—	۳/٤٥	٤/۵۲٪	۱۰/۳۱٪	۲/۷۸٪

ns در سطح احتمال ۵٪ معنادار نیست.

جدول ۵ مقادیر میانگین پارامترهای گسیختگی فشاری دانهٔ برنج قهوه‌ای رقم خزر در رطوبت ١٤٪ بر پایهٔ تر

خواص مکانیکی فشاری	میانگین	انحراف معیار
تنش گسیختگی (MPa)	۳٦/۳۹۲	۰/٦۰
کرنش گسیختگی (-)	۰/۰٦	۰/۰۰۰۸
چغرمگی (mJ/mm^3)	۱/۳۹۳۱	۰/۱۲
مدول الاستیسیته (MPa)	۹۷۳/۳۵۷	۰/۰۵

ووترز و دِبائردمیکر [۱] برای یک رقم برنج قهوه‌ای در رطوبت‌های ۱۵/۱٪ بر پایهٔ خشک مقدار ۳۲/۱۳ MPa و برای رقم دیگری در رطوبت ۱۵/۷٪ بر پایهٔ خشک ۳۱/٤۷ MPa را بدست آورند. با توّجه به مقادیر مدول الاستیسیتهٔ ظاهری برای هر دو آزمون بکار رفته (جدول‌های ۳ و۵) بنظر می‌آید که میزان آن برای آزمون روی دانهٔ کامل بیشتر از مقدار آن برای نمونهٔ تقریباً استوانه‌ای تحت فشار باشد. آرورا و همکاران [٦] مقدار ۲,٤۰۱/٤۸۸ MPa را برای مدول الاستیسیته در آزمون فشار محوری یک رقم دانهٔ برنج در رطوبت ۱۲٪ بر پایهٔ تر تعیین کردند. این مقدار تا حدودی با مقدار تعیین شده برای دانهٔ کامل در رطوبت ۱۱٪ بر پایهٔ تر نزدیک است. همچنین لی و کونزی [٤] مقدار ۱,۰۵۳/۳۷٦ MPa را بطور متوسط برای آزمون فشار روی نمونه‌های استوانه‌ای دو رقم برنج قهوه‌ای در رطوبت ۱٦/۵٪ بر پایهٔ خشک بدست آوردند. با توّجه به اثر رقم بر خواص مکانیکی که در تحقیقات دیگران [۱ و ٤] اشاره شده است، همخوانی مقادیر تعیین شده در این تحقیق با مقادیر ارائه شده توسط سایر محققان مشاهده می‌گردد.

٤- نتیجه‌گیری

همانند سایر تحقیقات انجام گرفته روی خواص مکانیکی مواد بیولوژیک مشخص شد که رطوبت بشدت خواص مکانیکی دانهٔ برنج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با کاهش رطوبت دانهٔ برنج رقم هاشمی از ۱۷٪ به ۱۱٪ بر پایهٔ تر، مقادیر نیرو و انرژی شکست دانه بیش از دو برابر افزایش می‌یابد. دانه‌های برنج در رطوبت پایین الاستیک‌تر می‌شوند و مدول الاستیسیتهٔ ظاهری دانه در رطوبت ۱۱٪ بر پایهٔ تر نیز به بیش از ۱/۵ برابر مقدار آن در رطوبت ۱۷٪ بر پایهٔ تر افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج این تحقیق مشخص گردید که سرعت بارگذاری روی خواص مکانیکی فشاری بر روی دانهٔ کامل و نیز نمونهٔ استوانه‌ای تأثیر معناداری ندارد. به عبارت دیگر، بدون نگرانی از تأثیرات سرعت بارگذاری، می‌توان آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی را در سرعت دلخواه انجام داد.

۵- منابع

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

[2] Mohsenin, Nuri. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. 2nd and Updated ed. New York: Gordon and Breach Science Publisher.

[3] Kunze, O. R. and Choudhury, M. S. U. 1972. Moisture adsorption related to the tensile strength of rice. Cereal Chemistry 49: 684-696.

[4] Lee, K. W. and Kunze, O. R. 1972. Temperature and moisture effects on mechanical properties of rice. Paper 72-338. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI.

[5] Prasad, S. and Gupta, C. P. 1973. Behavior of paddy grains under quasi-static compressive loading. Transactions of the ASAE 16(2): 328-330.

[6] Nalladurai, K., Alagusundaram, K., and Gayathri, P. 2003. Effectes of variety and

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-18]

moisture content on the engineering properties of paddy and rice. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America (AMA) 34(2): 47-52.

[7] Arora, V. K., Henderson, S. M., and Burkhardt, T. H. 1973. Rice drying cracking versus thermal and mechanical properties. Transactions of the ASAE 16(2): 320-327.

[۸] سیتکی، گ. ۱۳۸۲. مکانیک محصولات کشاورزی (ترجمه: تیمور توکلی‌هشجین). چاپ اول. انتشارات دانشگاه زنجان. ۵۲۰ ص.

[9] Kamst, G. F., Bonazzi, C., Vasseur J., and Bimbenent, J. J. 1999. A new method for the measurement of the tensile strength of rice grains by using the diametral compression test. Journal of Food Engineering 40:227-232.

[۱۰] یزدی‌صمدی، ب.، عبدالمجیدی، ر.، و ولی‌زاده، م. ۱۳۷٦. طرح‌های آماری در پژوهش‌های کشاورزی. مؤسسهٔ انتشارات و چاپ دانشگاه تهران. ٦۳۷ص.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-18]

Mechanical Properties of Rice Kernels under Compressive Loading as Affected by Deformation Rates

Kermani,A.M.[1], Tavakoli Hashjin,T.[2*],Minaei,M.[2], Khoshtaghaza,M.H.[2]

1- Ph. D. Graduate, Department of Mechanics of Agricultural Machinery, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Department of Mechanics of Agricultural Machinery, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

Quasi-static compressive tests to determine the mechanical properties of individual brown rice kernels were conducted on whole kernel rice of Hashemi and core specimens of Khazar varieties. The magnitudes of the failure force, failure deformation, breakage energy and apparent elasticity modulus for Hashemi kernels were determined at two moisture content levels, namly, %11 and %17 (w.b.) at four levels of loading rates ranging from 1 mm/min to 5.5 mm/min. For the Khazar variety, the magnitudes of failure stress and strain, as well as toughness and elasticity modulus were determined at moisture content of %14 (w.b.) for five levels of loading rates ranging from 0.5 mm/min to 1.5 mm/min.
Statistical analysis of the test results showed that deformation rates had no significant effect on the mechanical properties. Moisture content had a significant effect on all grain mechanical properties. Decreasing moisture content caused significant increases in all these properties. The failure force and the breaking energy for Hashemi kernels increased more than double, when the moisture content decreased from 17% to 11%. The magnitudes of failure force and breaking energy varied from 56 N to 115.7 N, and from 2.01 mJ to 5.23 mJ, respectively. The means of apparent elasticity modulus for compressive test on the core specimens was calculated to be 1.762 GPa at 17% moisture content and 2.835 GPa at 11% moisture content. Compressive strength and apparent elasticity modulus for Khazar variety were determined to be 36 MPa and 973.4 MPa, respectively. Some of the mechanical properties compared well with the published data.

Key words: Mechanical properties, Rice, Compression test, Failure stress, Elasticity modulus

*Corresponding author E-mail address: ttavakol@modares.ac.ir

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-18]