

## تعیین برخی از خواص فیزیکی ارقام برنج‌های اصلاح شده ایرانی

رحمت اله اشتواد<sup>۱</sup> - داود کلانتری<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۷/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۳

### چکیده

در این تحقیق مطالعه تجربی ضریب اصطکاک داخلی و درصد تخلخل چهار رقم از ارقام برنج‌های پرمحصول ایرانی به نام‌های نعمت، ندا، پژوهش و پردیس در چهار سطح رطوبتی ۸، ۱۱، ۱۵ و ۲۰ درصد مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک داخلی برنج‌های ارقام ذکر شده با افزایش رطوبت از ۸ تا رطوبت تعادل  $11 \pm 1$  درصد کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد. مقدار زاویه اصطکاک داخلی در رطوبت تعادلی  $11 \pm 1$  درصد برای هر یک از ارقام نعمت، ندا، پژوهش و پردیس به ترتیب ۳۹/۳۰، ۳۷/۵۰، ۳۳/۹۵ و ۳۴/۳۸ درجه تعیین شد. با توجه به نتایج بدست آمده، مشاهده گردید که مشخصات بیوفیزیکی ظاهری ارقام نظیر طول دانه، قطر دانه، زبری نسبی سطح خارجی دانه، ریشک انتهایی دانه و موارد دیگر بر رابطه‌ی بین تنش برشی و تنش نرمال موثر است. همچنین میزان تخلخل رابطه مستقیم با نوع رقم و رطوبت دانه دارد. درصد تخلخل این ۴ رقم در رطوبت تعادلی به ترتیب ۷۰/۸ برای نعمت، ۶۳/۹ برای ندا و ۶۲/۷ و ۶۶/۵ برای ارقام پژوهش و پردیس به دست آمد. با توجه به نتایج به نظر می‌رسد تفاوت‌های ظاهری ارقام می‌تواند بر رابطه‌ی بین تنش برشی و تنش نرمال موثر باشد اما نوع واریته تاثیر محسوسی در تنش برشی اولیه ندارد.

واژه‌های کلیدی: برنج، ضریب اصطکاک داخلی، تخلخل، ارقام اصلاح شده، رطوبت

### مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از محصولات غذایی مهم در جهان بوده و پس از گندم دومین محصول غذایی پرمصرف در دنیا و غذای اصلی مردم آسیا محسوب می‌شود. میزان تولید سالانه برنج در دنیا از ۵۲۰ میلیون تن در سال ۱۹۹۰ میلادی به ۶۹۶ میلیون تن در سال ۲۰۱۰ رسیده است (Fao, 2012). طبق آمار موجود، سطح زیر کشت این محصول در ایران ۵۲۶ هزار هکتار و میزان تولید شلتوک نزدیک ۲/۲۸ میلیون تن می‌باشد (بی‌نام، ۱۳۹۰).

در ایران برنج یکی از محصولات استراتژیک جامعه بوده و طی دو دهه‌ی اخیر میزان مصرف سرانه برنج و الگوی مصرف و تغذیه مردم تغییر یافته و مصرف برنج به عنوان یکی از مواد اولیه اصلی و اساسی غذای روزانه وارد سبد خانوار شده است به طوری که مصرف سرانه برنج از ۱۵ تا ۲۰ کیلوگرم به ۳۸ تا ۴۰ کیلوگرم افزایش یافته است (زمانی و همکاران، ۱۳۸۶). با توجه به رشد روزافزون تقاضای این

محصول در کشور راهکارهایی برای افزایش عملکرد محصول با کشت ارقام پرمحصول، کشت راتون و نیز قدم‌هایی برای افزایش عملکرد تبدیل شالی با روی آوردن به سمت مکانیزاسیون برداشته شده است. در این میان بالا رفتن هزینه‌های تولید به خصوص هزینه‌های کارگری که نزدیک ۴۷/۷ درصد کل هزینه‌های تولید برنج در کشور را به خود اختصاص می‌دهد، اهمیت حرکت به سمت مکانیزه شدن مراحل کاشت و داشت و برداشت و پس از برداشت را بیش از پیش نمایان می‌سازد (بی‌نام، ۱۳۹۰).

یکی از موارد مهم برای محصولات غله‌ای در طی مراحل برداشت، انتقال و انبارداری، دانستن مقدار نیروهای اصطکاکی مابین محصول و نیز بین محصول و سطوح درگیر می‌باشد. محصولات مختلف بر حسب خصوصیات فیزیکی آن‌ها بر سطح اجزای ماشین-آلات و یا ساختار اجزای ذخیره‌سازی، نیروهای اصطکاکی اعمال می‌کنند. نیروهای اصطکاکی که دانه برنج در طی مراحل مختلف با آن درگیر است را می‌توان در طی عملیات برداشت مکانیزه (به عنوان نیروهای اثرگذار بر جابجایی محصول)، در کمباین‌های برداشت برنج، در فرآیند حمل و نقل (به عنوان نیروهای مابین دانه و سطوح نوارهای نقاله)، در فرآیند ذخیره‌سازی و انبارداری (به عنوان نیروهای

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
\* - نویسنده مسئول: (Email: dkalantari2000@yahoo.com)

و رطوبت نهایی<sup>۳</sup> پس از خشک کردن انجام داد. لذا در این تحقیق سعی شده است اندازه گیری برخی از خصوصیات بیوفیزیکی<sup>۴</sup> رقم از ارقام پرمحصول برنج ایرانی به نام‌های نعمت، ندا، پژوهش و پردیس شامل زاویه اصطکاک داخلی و تخلخل در رطوبت‌های مختلف از رطوبت زمان برداشت تا رطوبت نهایی (شلتوک خروجی از دستگاه خشک‌کن) مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

### اندازه‌گیری زاویه اصطکاک داخلی

برنج‌های استفاده شده در این طرح از ارقام پرمحصول و اصلاح شده‌ی نعمت، ندا، پژوهش و پردیس بوده و به صورت شلتوک (برنج پوست نشده) از پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری کشاورزی طبرستان تهیه گردیدند (شکل ۱). برای اندازه‌گیری رطوبت از دستگاه رطوبت سنج دیجیتال (GMK-303/303RS, Korea) در مراحل مختلف آزمایش استفاده شد (شکل ۲). آزمایش انجام شده در ۴ سطح رطوبتی  $8 \pm 1$ ،  $11 \pm 1$ ،  $15 \pm 1$  و  $20 \pm 1$  درصد و بر مبنای وزن خشک دانه انجام شد (Zareiforoush et al., 2009). رطوبت اولیه شلتوک بر اساس رطوبت زمان برداشت  $20 \pm 1$  درصد در نظر گرفته شده و سایر سطوح رطوبتی به روش خشک کردن لایه نازک به دست آمد.

برای خشک کردن نمونه‌ها به روش بستر نازک از دستگاه آون آزمایشگاهی (Fan Azma Gostar, I.R.Iran) مجهز به سنسور PID Controller (Atbin Mega 600) با دقت ۰/۵ درجه سلسیوس استفاده شد. زمان و درجه حرارت خشک شدن در هر مرحله آزمایش با توجه به هدف مورد نظر مطالعاتی مختلف بوده است. نمونه‌هایی به وزن ۲۵۰ گرم درون ظرف‌های استوانه‌ای کوچک به آون انتقال پیدا کردند، طوری که ضخامت لایه دانه در هر ظرف معادل ۳ برابر عرض دانه برنج بود.

نمونه‌ها پس از خارج شدن از آون به مدت ۲ ساعت در هوای آزاد قرار داده شدند تا با سپری کردن حالت استراحت از ایجاد تنش‌های حرارتی در مراحل بعدی جلوگیری شود (Thakur et al., 2006). برای رسیدن به رطوبت بالاتر از روش رطوبت دهی مجدد<sup>۴</sup> استفاده شد. بدین منظور با توجه به دانستن رطوبت اولیه میزان معینی از نظر وزنی، آب به نمونه‌ها بصورت افشانه‌ای اضافه گردید. سپس نمونه‌ها درون پاکت‌های در بسته پلاستیکی درون یخچال با دمای ۵ درجه به مدت یک هفته نگهداری شد تا رطوبت نمونه‌ها افزوده گردد سپس دو ساعت قبل از آزمایش نمونه‌ها در محیط قرار گرفته تا به حالت تعادل

اصطکاک‌ی وارد بر جداره‌های سیلوا و انبارهای نگهداری) و در فرآیند تبدیل (به عنوان نیروهای وارد بر نقاله‌های انتقال و نیز الگوهای تخلیه و بارگیری) مشاهده نمود.

در حرکت و انتقال مواد دانه‌ای و غلات، نیروی اصطکاک به عنوان نیروی مقاوم در برابر حرکت نسبی به سه صورت نیروهای اصطکاک استاتیکی، دینامیکی و نیروی اصطکاک داخلی ظاهر می‌شود (Chukwu et al., 2007).

زمانی که دانه‌های محصول نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند، در اثر تماس بین آن‌ها یک نیروی مقاوم مانع حرکت می‌شود که مقدار آن به وسیله زاویه اصطکاک داخلی یا ضریب اصطکاک داخلی بیان می‌شود.

یکی از موارد مهم برای محصولات غله‌ای در طی مراحل برداشت، انتقال و انبارداری، دانستن میزان تخلخل توده‌ی مواد می‌باشد. اهمیت دانستن تخلخل یک ماده در آنجاست که این عامل یکی از پارامترهایی است که طی مرحله خشک کردن دچار تغییر می‌شود (Kutz, 2007). تخلخل یکی از خصوصیات مهم در محاسبات مربوط به نرخ هوادهی، نرخ خنک شدن، نرخ خشک شدن و طراحی مبدل‌های حرارتی و دستگاه‌های بسته‌بندی می‌باشد (Davies et al., 2011).

در این میان باید توجه داشت که اثر درصد رطوبت بر خصوصیات فیزیکی و حرارتی برنج یکی از کلیدی‌ترین مفاهیم در شناخت شرایط خشک شدن می‌باشد. برخی از خصوصیات فیزیکی شلتوک (از جمله طول، عرض، ضخامت، حجم، چگالی) و خصوصیات حرارتی (مثل گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی) به صورت تابعی خطی از درصد رطوبت به دست آمده است (Cnossen et al., 2001). از دیگر موارد اهمیت درصد محتوای رطوبتی، دانستن این مقدار در زمان برداشت می‌باشد که به صورت رطوبت زمان برداشت بیان می‌گردد. سینمورگن و همکاران (۲۰۰۸) در یک مطالعه ۵ ساله برای بررسی اقتصادی‌ترین حالت برداشت برنج در شرایط رطوبتی مختلف عنوان کرده‌اند که در رطوبت ۲۱/۷ درصد میزان ارزش خالص برنج به بالاترین حد خود می‌رسد (Siebenmorgen et al., 2008).

لو و همکاران (۱۹۹۵) در مطالعه‌ای که مربوط به بررسی اثر رطوبت برداشت بر روی بازگشت اقتصادی سرمایه داشته‌اند، با توجه به شرایط مختلف مزرعه بهترین حالت را در بازه‌ی رطوبتی بین ۱۵ تا ۲۲ درصد عنوان کرده‌اند (Lu et al., 1995).

با تعیین درصد رطوبت نمونه برنج و دانستن بهترین شرایط رطوبتی مربوط به زمان برداشت، باید آزمایشات مختلف را در محتوای رطوبتی نزدیک به رطوبت زمان برداشت<sup>۱</sup> تا محتوای رطوبت تعادلی<sup>۲</sup>

3- Final Moisture Content, FMC

4- Rewetting

1- Harvest Moisture Content, HMC

2- Equilibrium Moisture Content, EMC

(Zareiforoush *et al.*, 2009)

برسند و رطوبت نهایی توسط رطوبت سنج کنترل گردید



Nemat



Pajouhesh



Neda



Pardis

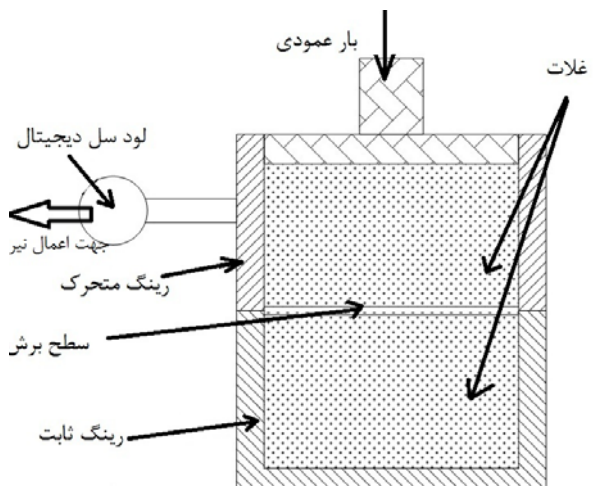
شکل ۱- تصویر تهیه شده توسط بینیکولر از چهار نمونه برنج مورد آزمایش



شکل ۲- دستگاه رطوبت‌سنج دیجیتالی برای اندازه‌گیری درصد رطوبت نمونه‌ها

در این آزمایش نمونه‌های موردنظر برنج، هر یک به‌طور جداگانه درون استوانه و رینگ قرار گرفته و بارهای عمودی  $F_n$  در ۵ سطح مختلف با مقادیر صفر (بدون بار)، ۱۵، ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ نیوتن به آن وارد گردید. به منظور پخش شدن یکنواخت بار بر سطح نمونه از یک دیسک پلی‌اتیلنی با قطر کوچکتر از قطر داخلی رینگ استفاده شده و بار عمودی روی آن قرار گرفت. حداکثر نیروی لازم برای به حرکت در آوردن رینگ متحرک ( $F_i$ ) در شرایط شبه استاتیکی (اعمال نیروی افقی آرام، پیوسته و تدریجی) توسط لودسل ثبت و ضبط گردید. قابل ذکر این که میزان نیروی اصطکاکی سطوح دیواره استوانه برش در شرایط بی‌باری در نتایج ذکر شده در مقاله وارد شده است. بدین منظور ابتدا نیروی لازم برای به حرکت در آوردن رینگ متحرک در شرایط بدون محصول (بدون اعمال بار عمودی) اندازه‌گیری و از داده‌های مربوط به بارهای عمودی کسر گردید.

برای اندازه‌گیری زاویه اصطکاک داخلی  $\phi_i$  و یا ضریب اصطکاک داخلی  $\mu_i$  که این نیرو در بین ذرات مواد دانه‌ای شکل مثل دانه‌های برنج به صورت یک نیروی مقاوم و اصطکاکی عمل می‌کند و مانع حرکت ذرات نسبت به یکدیگر می‌شود، از یک دستگاه سلول برش<sup>۱</sup> استفاده شد (Mohsenin, 1986). سلول برش مورد استفاده در این آزمایش از یک رینگ متحرک و یک استوانه ثابت پلی‌اتیلنی به قطر ۲۵۰ میلی‌متر تشکیل شده است. یک لودسل الکترونیکی با دقت ۰/۲ نیوتن جهت اندازه‌گیری نیروی برشی به بازوی رینگ متحرک متصل شده است (شکل ۳). صفحه دیجیتالی این دستگاه قادر به ثبت حداکثر نیرو می‌باشد.



ب



الف

شکل ۳- الف) دستگاه سلول برش برای اندازه‌گیری زاویه اصطکاک داخلی و ب) شماتیک مقطع و اجزای آن

### زاویه اصطکاک داخلی

رابطه بین تنش برشی و تنش عمودی در مواد جامد ایده‌آل در محدوده الاستیک بصورت یک خط مستقیم است که شیب این خط بیانگر ضریب اصطکاک داخلی بوده و بصورت زیر بیان می‌شود (رضوی و همکاران، ۱۳۸۵).

$$\tau = \sigma \tan \phi_i = \sigma \mu_i \quad (1)$$

در بعضی از مواد دانه‌ای شکل مانند غلات وقتی که تنش نرمال ( $\sigma$ ) صفر باشد، تنش برشی  $\tau$  دارای مقدار غیر صفر است. در این گونه مواد رابطه‌ی بین تنش‌های برشی و عمودی دارای یک تنش برشی اولیه ( $\tau_0$ ) بوده و به صورت زیر تعریف می‌گردد (Mohsenin, 1986).

$$\tau = \tau_0 + \sigma \tan \phi_i \quad (2)$$

نکته قابل توجه اینکه رابطه فوق برای تنش‌های نرمال کوچک (کمتر از  $2 \text{ N/Cm}^2$ ) صادق بوده و برای تنش‌های عمودی خیلی بزرگ غیر خطی می‌گردد (Mohsenin, 1986) که موضوع بحث مقاله حاضر نیست. اگر قطر داخلی استوانه و رینگ در دستگاه آزمایش  $D$  فرض شود، مساحت سطح مقطع عرضی  $A_j$  برابر  $\pi D^2/4$  بوده و مقادیر تنش عمودی  $\sigma$  و تنش برشی  $\tau$  نیز از روابط زیر بدست می‌آید.

$$\tau = \frac{F_t}{A_j} \quad \sigma = \frac{F_n}{A_j} \quad (3)$$

در این مطالعه، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش عمودی  $\sigma$  و تنش برشی  $\tau$  برای چهار رقم برنج ایرانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های تجربی نشان داد که اثر رقم بر روی صفت تنش برشی و به تبعیت از آن زاویه اصطکاک داخلی

### اندازه‌گیری تخلخل

برای محاسبه تخلخل توده برنج از دستگاه پیکنومتر دیجیتال با شیر برقی ساخته شده در گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری استفاده گردید. اساس کار این دستگاه بر مبنای محاسبه حجم توده مواد پر شده در یک ظرف استوانه‌ای شکل به حجم ۱ لیتر با استفاده از فشار هوای ۲ اتمسفر می‌باشد و به صورت اتوماتیک تمامی مراحل کار با فرمان دادن به شیرهای برقی صورت می‌پذیرد. روش کار و محاسبات مربوط به چنین دستگاهی با شیرهای مکانیکی توسط استروشین و هامان (۱۹۹۴) به نقل از دی<sup>۱</sup> توضیح داده شده است. در تعدادی از کارهای انجام شده‌ی قبلی نیز استفاده از پیکنومتر گازی گزارش شده است (رضوی و همکاران، ۱۳۸۵؛ کاشانی نژاد و همکاران، ۱۳۸۷؛ Chukwu et al., 2007; Lu et al., 1995).

به منظور اطمینان از درستی داده‌های بدست آمده از این دستگاه، از استوانه‌ها و بلوک‌های توپر با حجم مشخص (با توجه به ابعاد آن) برای کالیبره کردن این پیکنومتر استفاده و در تکرارهای مختلف، دقت دستگاه ۰/۰۵ درصد به دست آمد.

آزمایشات مربوط به تخلخل در ۴ سطح رطوبتی  $1 \pm 8\%$ ،  $1 \pm 15\%$ ،  $1 \pm 20\%$  و  $1 \pm 25\%$  درصد و در ۳ تکرار انجام گردید. سپس داده‌های بدست آمده از این دو آزمایش به روش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط نرم افزار SPSS 16 مورد مطالعه و آنالیز قرار گرفت.

### نتایج و بحث

شکل ۶ نشان داده شده است. در این آزمایش در بار عمودی ثابت ۱۵ یا ۴۵ نیوتن، رطوبت نمونه‌ها از ۸ تا ۲۰ درصد تغییر یافته و تاثیر رطوبت بر روی تنش برشی لازم برای حرکت نمونه‌ها ثبت گردید. طبق نتایج بدست آمده، در بارهای کوچک (۱۵ نیوتن) میزان تنش برشی با افزایش درصد رطوبت از ۸ تا ۱۱ درصد (منطقه ۱ رطوبتی) کاهش و سپس از ۱۱ تا ۲۰ درصد (منطقه ۲ و ۳ رطوبتی) افزایش یافته است. ولی در اعمال بارهای عمودی بزرگتر (۴۵ نیوتن) سه منطقه رطوبتی مجزا قابل تفکیک است: ۱) منطقه زیر رطوبت تعادلی که در آن تنش برشی با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد، ۲) منطقه رطوبت متوسط (۱۱ تا ۱۵ درصد) که در آن با افزایش رطوبت تنش برشی افزایش می‌یابد و ۳) منطقه رطوبت بالاتر از حد تعادل که در آن تنش برشی با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد. علت کاهش تنش برشی در مقادیر بالای رطوبت را می‌توان به نرم شدن سطح خارجی برنج و افزایش خاصیت روانکاری نسبت داد.

طبق نتایج نشان داده شده در شکل ۶، برای بارهای کوچک و در منطقه رطوبتی پایین تر از رطوبت تعادل با افزایش درصد رطوبت از ۸ تا ۱۱ درصد، میزان تنش برشی برنج پرديس برخلاف ۳ رقم دیگر افزایش یافته است. علت این تغییر ممکن است مرتبط با خصوصیت ظاهری دانه برنج پرديس نسبت به ۳ رقم دیگر باشد و آن وجود ریشک‌های کوچک در انتهای دانه برنج (شالی) است که دلیلی برای ممانعت حرکت دانه‌ها روی هم و افزایش ضریب اصطکاک و در نتیجه افزایش تنش برشی در بارهای کوچک می‌باشد. اما در بارهای عمودی بزرگتر، اثر وجود ریشک‌های انتهایی نسبت به تاثیر اندازه بار قابل توجه نبوده و اثر ریشک‌ها خنثی می‌شود. به‌طورکلی کمترین تنش برشی در رطوبت  $11 \pm 1$  درصد مشاهده گردید.

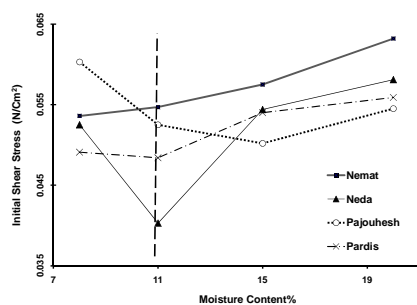
معنی‌دار نگردید لذا تنها به بررسی روند تغییرات در مراحل خشک شدن (کاهش رطوبت) پرداخته شده است.

در شکل ۴ تغییرات تنش برشی اولیه ( $\tau_0$ ) نسبت به افزایش رطوبت محصول برای هر چهار رقم نعمت، ندا، پژوهش و پردیس نشان داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در این شکل، می‌توان به افزایش تنش برشی ثابت ( $\tau_0$ ) اشاره کرد که با بالا رفتن رطوبت افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که هر چه رطوبت محصول بالاتر باشد، مقدار نیروی لازم جهت غلبه بر نیروی مقاوم در شروع حرکت افزایش می‌یابد. طبق نتایج بدست آمده، در اکثر موارد میزان  $\tau_0$  در رطوبت ۱۱ درصد کمترین مقدار را داراست. در نتیجه در این سطح از رطوبت دانه، کمترین میزان انرژی ثابت صرف غلبه بر نیروهای مقاوم می‌گردد. در تحقیقات قبلی نیز رطوبت ۱۱ درصد به عنوان رطوبت تعادل برنج در نظر گرفته شده است (رفیعی، ۱۳۸۵؛ Amiri Chayjan et al., 2008; ASAE, 1995; Bhattacharya et al., 1972).

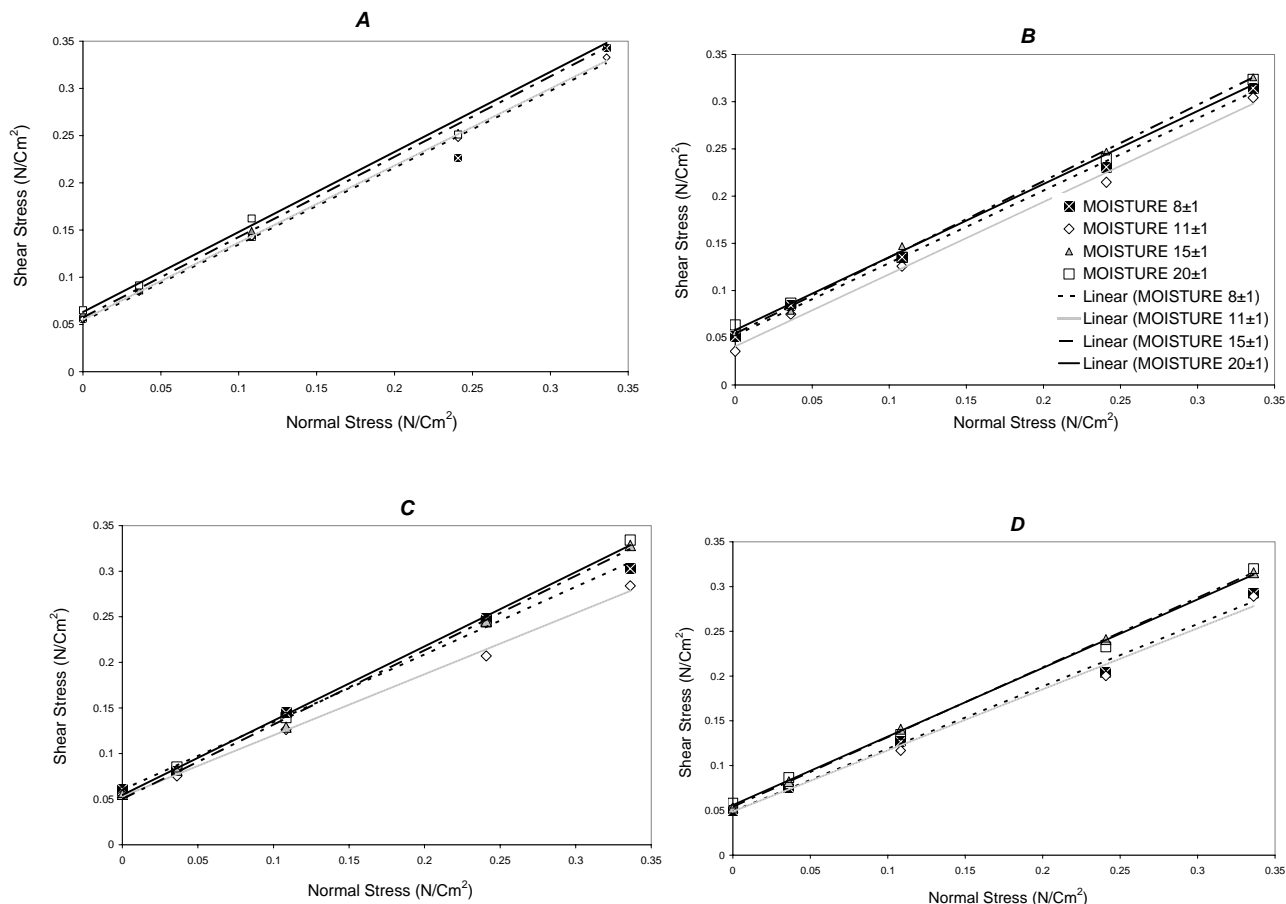
رطوبت ۱۱ درصد بیانگر میزان رطوبت تعادلی محصول با محیط (EMC)، تحت شرایط رطوبت محیط ۴۵ درصد و دمای ۲۵ درجه است که کمترین میزان تبادل رطوبت میان دانه و محیط پیرامونی اتفاق می‌افتد.

با توجه به داده‌های بدست آمده از آزمایشات تجربی، نمودار تنش برشی-تنش نرمال برای ۴ رقم برنج مطالعه شده در شکل ۵ نشان داده شده است. بر طبق این نتایج، رابطه‌ی بین تنش برشی و تنش نرمال به صورت خطی مطابق با رابطه ۲ تغییر می‌یابد. نتیجه قابل-توجه در این تحقیق این است که تنش برشی مرتبط با رطوبت ۱۱ درصد کمتر از تنش برشی مرتبط با رطوبت ۸ درصد بدست آمده است (شکل ۵).

تاثیر رطوبت بر تغییر تنش برشی در بارهای ثابت عمودی در



شکل ۴- رابطه تنش برشی ثابت ( $\tau_0$ ) با رطوبت برای ۴ رقم برنج ایرانی: ■ نعمت، ▲ ندا، ○ پژوهش، × پردیس



شکل ۵- رابطه تنش عمودی-تنش برشی در چهار سطح رطوبتی ۸، ۱۱، ۱۵ و ۲۰ درصد برای چهار رقم برنج ایرانی: A نعمت، B ندا، C پژوهش، D پردیس

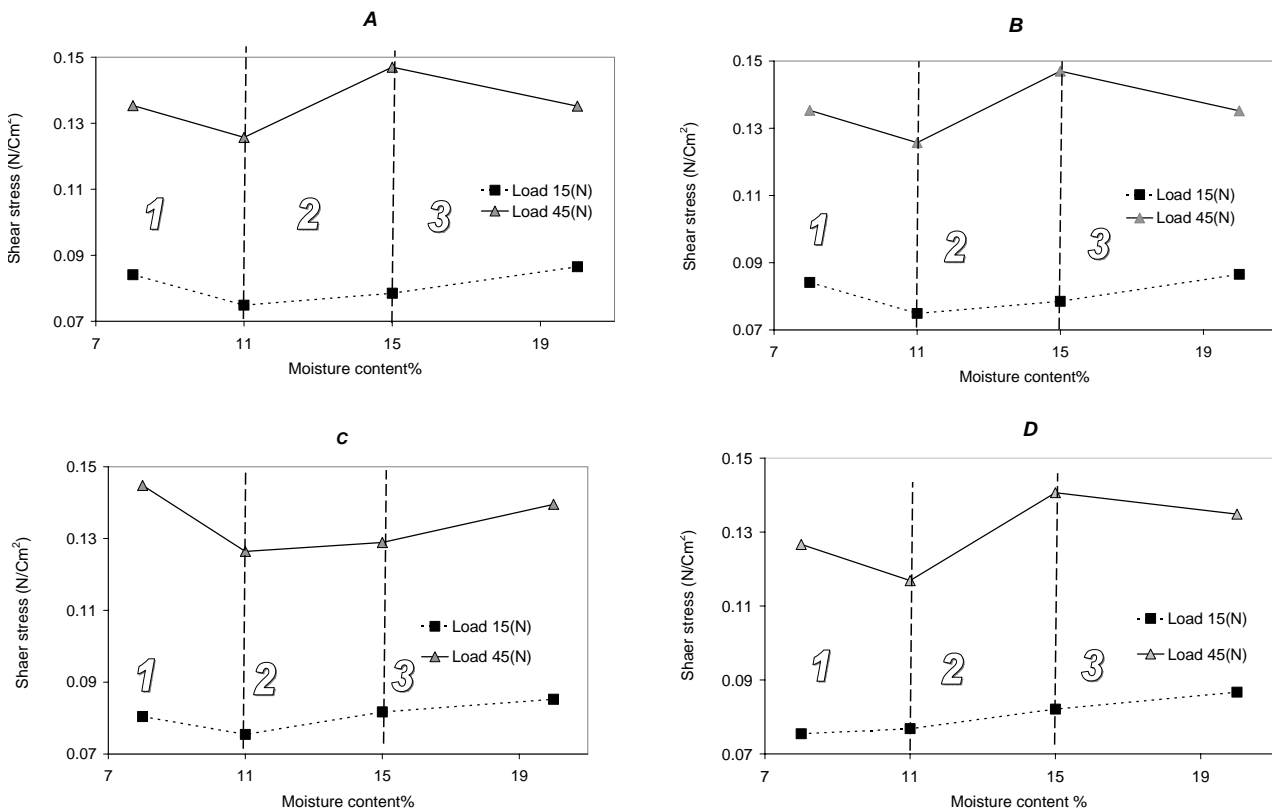
از ۴۰/۳۹ در رطوبت ۱۵ درصد به ۴۰/۲۸ درجه در رطوبت ۲۰ درصد تقلیل یافته است). این امر می‌تواند در اثر روانکاری و لغزش دانه‌های برنج روی یکدیگر با افزایش بیش از حد رطوبت باشد. همچنین در رطوبت‌های بالاتر به علت نرم شدن بیشتر پرزها، اثر پرزهای موجود در سطح پوسته برنج کمتر شده و با کاهش نیروی هم‌چسبی موجبات کاهش زاویه اصطکاک داخلی می‌گردد. نمودار رسم شده مربوط به برنج ندا نیز وضعیت مشابه برنج نعمت را نشان می‌دهد. با توجه به شباهت‌های زیاد در خواص فیزیکی و مورفولوژیکی دو رقم برنج نعمت و ندا، در مجموع می‌توان علت کاهش کلی زاویه اصطکاک داخلی برای برنج ندا نسبت به برنج نعمت را به سطح صاف و صیقلی-تر پوسته آن نسبت داد. در ادامه، بررسی مربوط به نمودار زاویه اصطکاک داخلی- درصد رطوبت برای برنج‌های پژوهش و پردیس یک تفاوت کلی نسبت به ارقام نعمت و ندا مشاهده شد (شکل ۷) و آن اینکه در منطقه ۱ رطوبتی زاویه اصطکاک داخلی با شیب زیادی کاهش یافته و سپس در منطقه ۲ رطوبتی با شیب بسیار زیاد افزایش

با توجه به نتایج به دست آمده، رابطه بین زاویه اصطکاک داخلی با درصد رطوبت در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به داده‌های به دست آمده می‌توان برای برنج‌های دانه بلند نعمت و ندا عنوان کرد که با افزایش رطوبت (در منطقه ۱ و ۲ رطوبتی) زاویه اصطکاک داخلی نیز افزایش می‌یابد (به طور مثال برای برنج نعمت مقدار زاویه اصطکاک داخلی از رطوبت ۸ تا ۱۱ درصد از ۳۹/۱۱ به ۳۹/۳۰ درجه و در سطح رطوبتی ۱۵ درصد به میزان ۴۰/۳۹ درجه رسیده است). این نتیجه با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین نیز مطابقت دارد. بطور مثال زاویه اصطکاک داخلی دانه گندم با افزایش رطوبت از ۱۱ به ۱۷/۱ درصد از ۲۴/۵ به ۲۷/۳ افزایش یافته است (رضوی و همکاران، ۱۳۸۵). این مقادیر رطوبتی تقریباً در ناحیه ۲ شکل ۶ قرار دارد که در این ناحیه با افزایش رطوبت مقدار زاویه اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد.

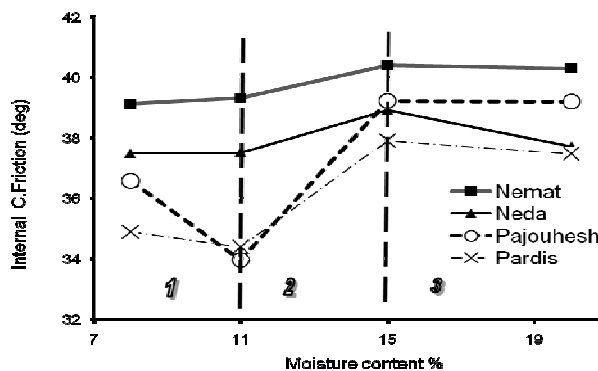
سپس در منطقه ۳ با افزایش رطوبت به طور محسوسی از مقدار زاویه اصطکاک داخلی کاسته می‌شود (به طور مثال برای برنج نعمت

را می‌توان از دلایل اصلی در کوچکتر بودن زاویه اصطکاک داخلی دانست. چرا که هرچه طول و ضخامت دانه بیشتر باشد سطح موثر بیشتری از یک دانه در تماس با دانه‌های مجاور قرار خواهد داشت که منجر به افزایش نیروی لازم برای غلبه بر نیروی اصطکاک داخلی می‌گردد.

می‌یابد و پس از آن در منطقه ۳ رطوبتی سیر تقریباً یکنواختی را دارد. دلیل عمده‌ی این تغییرات در ارقام پژوهش و پردیس ممکن است مرتبط به طول کوتاه تر و ضخامت کمتر آنها نسبت به ارقام نعمت و ندا باشد. از طرف دیگر نحوه‌ی تغییرات زاویه اصطکاک داخلی  $\phi_i$  برای برنج پردیس همانند رقم پژوهش می‌باشد، اما مقدار عددی آن از نمونه‌های قبلی کمتر است که کوتاه‌تر بودن طول دانه‌های این نمونه



شکل ۶- اثر رطوبت بر میزان تنش برشی در دو سطح مختلف بار عمودی ۱۵ نیوتن و ۴۵ نیوتن برای رقم برنج: A نعمت، B ندا، C پژوهش، D پردیس



شکل ۷- رابطه میزان رطوبت و زاویه اصطکاک داخلی برای چهار رقم برنج ایرانی: ■ نعمت، ▲ ندا، ○ پژوهش، × پردیس



این آزمایش نسبت به مقادیر گزارش شده قبلی، عدد بزرگتری را نشان می‌دهد. باتاچاریا و همکاران (۱۹۷۲) تخلخل را برای برنج سفید در محدوده ۴۱ تا ۴۶ درصد و برای شلتوک ۴۶ تا ۵۴ درصد بدست آورده است (Bhattacharya *et al.*, 1972). کاشانی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۷) برای رقم ندا گستره‌ای نزولی بین ۵۱/۶ تا ۴۲/۷ درصد را نسبت به افزایش درجه خشک کردن گزارش کرده‌اند؛ در صورتی که طبق داده‌های به دست آمده از این آزمایش تغییرات تخلخل نسبت به افزایش رطوبت برای رقم ندا از ۵۸ تا ۶۲ درصد و برای رقم نعمت از ۶۳ تا ۷۱ درصد متغیر است. دلیل اصلی این افزایش عددی ممکن است به ماده مورد استفاده در پیکنومتر مرتبط باشد. از آنجاییکه در آزمایشات و گزارش‌های قبلی از مایع تولوئن به جای هوا استفاده شده و این مایع به دلیل دارا بودن کشش سطحی نمی‌تواند به راحتی به داخل خلل و فرج توده برنج نفوذ کند، لذا همواره مقدار تخلخل توده را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. از طرف دیگر پیکنومترهایی که از سیال هوا یا نیتروژن استفاده می‌کنند، به دلیل عدم وجود کشش سطحی در گازها و در نتیجه نفوذ کافی به تمام خلل و فرج نمونه قادر به تعیین دقیق‌تر تخلخل می‌باشند (Stroshine *et al.*, 1994).

این نتایج با گزارشات یالچین و اوزارسلان (۲۰۰۴) برای ماش، آلسونتاش و ییلدیز (۲۰۰۷) برای باقلا، گراناپاک و همکاران (۲۰۰۸) برای دانه روغنی جاتروفا و نیز نتایج پرادان و همکاران (۲۰۰۸) برای دانه روغنی کارانجا سازگاری داشته و روند افزایشی تخلخل در رطوبت‌های بالاتر را تایید می‌کند (Zareiforoush *et al.*, 2009).

شیب تغییرات بدست آمده از شکل‌های ۵ و ۷ با نتایج گزارش شده توسط چاکراورتی در سال ۱۹۷۲ که برای چندین رقم از غلات انجام داده است مطابقت دارد. وی در نتایج خود عنوان کرده است که مقدار زاویه اصطکاک داخلی به شکل دانه، خصوصیات سطحی و رطوبت آن بستگی دارد (Chakraverty, 1972).

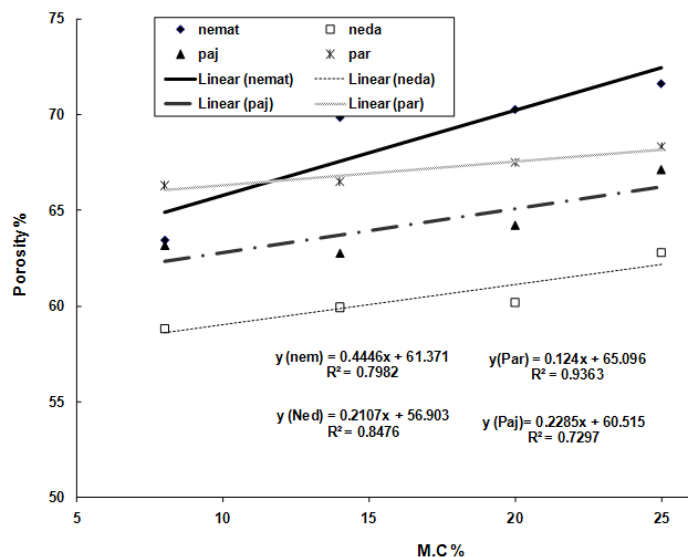
### تخلخل

میزان تخلخل به دست آمده برای این ۴ رقم برنج در شکل ۸ نشان است. همان‌طور که از این شکل ملاحظه می‌گردد، با افزایش رطوبت بر میزان تخلخل افزوده می‌شود. اختلاف در مقدار درصد تخلخل رقم‌های مختلف به سایز دانه‌ها و نحوی دانه بندی شبکه توده برنج در کنارهم بستگی دارد، به همین علت می‌توان بالاتر بودن درصد تخلخل برنج نعمت نسبت به برنج ندا را در بزرگتر بودن نسبت  $L/D$  (طول به ضخامت) دانه آن توجیه کرد. نسبت طول به ضخامت این ۴ رقم برنج با نمونه‌گیری از ۳۰ عدد دانه و اندازه‌گیری با کولیس دیجیتال (WORKZONE, Model: DMV-slo5) و با دقت ۰/۰۱ درصد (میلیمتر) در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- نسبت طول به ضخامت ۴ رقم برنج بر حسب میلی‌متر

رقم	نعمت	ندا	پژوهش	پردیس
طول دانه شلتوک (L)	۱۱/۷۲۶	۱۰/۵۵۸	۱۰/۳۴۳	۹/۷۹۶
عرض دانه شلتوک (D)	۲/۰۳۳	۲/۰۸۵	۱/۹۴۱	۱/۸۵۸
نسبت طول به عرض (L/D)	۵/۷۶۶	۵/۰۶۲	۵/۳۲۷	۵/۲۷۲

نکته قابل توجه اینکه، مقدار عددی تخلخل اندازه‌گیری شده در



شکل ۸- درصد رطوبت- تخلخل ۴ رقم برنج نعمت، ندا، پژوهش و پردیس



زارعی فروش و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مایع تولوئن ( $C_7H_8$ ) و اندازه گیری چگالی ظاهری و چگالی جسم جامد در رطوبت‌های بین ۸ تا ۲۱ درصد، اقدام به اندازه گیری درصد تخلخل برنج های ارقام هاشمی و علی کاظمی نمودند. طبق نتایج گزارش شده توسط ایشان تخلخل برنج نمونه های گزارش شده با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد (Zareiforoush et al., 2009). این نتیجه با اندازه گیری‌ها و مشاهدات بدست آمده در این مطالعه و گزارشات کاشانی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۷)، باتاچاریا و همکاران (۱۹۷۲) و رضوی و اکبری (۱۳۸۵) تناقض دارد (شکل ۸). به نظر می‌رسد که با افزایش رطوبت، دانه حجیم تر شده و از طرف دیگر پوسته شلتوک از دانه برنج فاصله بیشتری می‌گیرد، لذا از نظر فیزیکی تخلخل باید افزایش یابد.

## نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده در مطالعه حاضر، رطوبت یکی از عوامل موثر بر میزان زاویه اصطکاک داخلی در برنج می‌باشد. به‌طور کلی میزان زاویه اصطکاک داخلی در رطوبت تعادلی در کمترین مقدار خود قرار دارد و با کاهش یا افزایش رطوبت، بر مقدار آن افزوده می‌گردد، نکته مهمی که می‌تواند در طراحی دستگاه های فرآوری این محصول مورد توجه قرار گیرد. بطوری که با توجه به کمینه بودن

## منابع

بی نام، ۱۳۹۰، آمارنامه کشاورزی محصولات زراعی سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸، وزارت جهاد کشاورزی.

رضوی، م. ع.، اکبری، ر.، ۱۳۸۵، خواص بیوفیزیکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، صفحه ۹۹-۱۰۲  
رفیعی، ش.، ۱۳۸۵، اصلاح رطوبت تعادلی شلتوک برنج (سپیدرود) برای شبیه سازی خشک کردن توده بستر نازک، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۰ (۳)، ۱۷۵-۱۸۲.

زمانی، ق.، علیزاده، م.، ۱۳۸۶، خصوصیات و فرآوری ارقام مختلف برنج ایران، انتشارات پلک، ۲۰۸ صفحه.

کاشانی‌نژاد، م.، چاپرا، د.، رفیعی، ش.، ۱۳۸۷، بررسی جذب رطوبت و تغییرات خواص فیزیکی ارقام برنج در فرآیند خیساندن، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد پانزدهم، شماره دوم، ۱۴ صفحه.

Amiri Chayjan, R., Moazez, Y., 2008, Estimation of paddy equilibrium moisture adsorption using ANNs, Journal of Applied Sciences, 8(2), 346-351.

ASAE, 1995, Standards D254.4, Moisture Relationships of Grains, 33rd ed., St. Joseph, MI.

ASAE, 1999, Standards D245.5, Moisture Relationship of Plant-based Agricultural Products, St. Joseph, MI.

Bhattacharya, K. R., Sowbhagya, C. M., Indudhara Swamy, Y. M., 1972, Some physical properties of paddy and rice and their interrelations, Journal of the Science of Food and Agriculture, 23, 171-186.

Chakraverty, A., 1972, Post-Harvest Technology of Cereals. Co. Pvt, LTD, New Delhi, Bombay, Calcutta, pp: 360.

Chukwu, O., Akande F. B., 2007, Development of an Apparatus for Measuring Angle of Repose of Granular Materials, Assumption University Journal of Technology, 11(1), 62-66.

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,

این نیرو در رطوبت تعادلی، توصیه می‌شود در صورت امکان اجرای پروسه‌های انتقال و جابجایی در این محدوده رطوبتی صورت پذیرد. اثر افزایش رطوبت بر تغییرات این زاویه چشمگیرتر از اثر کاهش رطوبت می‌باشد. مقدار زاویه اصطکاک داخلی در رطوبت تعادلی ۱۱ درصد برای هر یک از ارقام نعمت، ندا، پژوهش و پردیس به ترتیب ۳۹/۳۰، ۳۷/۵۰، ۳۳/۹۵ و ۳۴/۳۸ درجه به‌دست‌آمد.

در مورد تخلخل دانه می‌توان رطوبت را یک عامل تاثیر گذار در تغییر آن دانست به طوری که کاهش رطوبت در مرحله خشک کردن موجب کاهش تخلخل در توده برنج می‌گردد. در بین چهار رقم برنج مورد آزمایش، رقم ندا دارای کمترین میزان تخلخل است. این رقم دارای کمترین نسبت  $L / D$  (طول به ضخامت) در بین چهار رقم برنج مورد آزمایش می‌باشد.

## سپاسگزاری

بدین وسیله از آقای محمد برزگر دانشجوی مقطع کارشناسی رشته مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری جهت ساخت و در اختیار قرار دادن دستگاه پیکنومتر دیجیتالی، تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از مدیریت پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری کشاورزی طبرستان بخاطر همکاری و در اختیار گذاشتن نمونه‌های مورد نیاز برنج تقدیر و تشکر می‌گردد.

VOL.19(8):1661-1682.

Davies, R. M., Zibokere, D. S., 2011, Effect of Moisture Content on Some Physical and Mechanical operties of Three Varieties of Cowpea, Agricultural Engineering International: CIGR Journal, Manuscript No.1700. Vol. 13, No.1, 1-16.

FAO, 2012, Food and Agricultural Organization of the United Nations, FAO Statistical Database, Available from <http://faostat.fao.org>.

Kutz, M., 2007, Handbook of Farm, Dairy, and Food Machinery, William Andrew Publishing, NY U.S.A., pp: 768.

Lu, R., Sibenmorgen, T. J., Costello, T. A., Fryar Jr E. O., 1995, Effect of rice moisture content at harvest on economic return. Transactions of the ASAE. VOL. II(5):685-690.

Mohsenin, N. N., 1986, Physical properties of Plant and Animal Materials.2nd edit. Gordon and Breach Science Publishers, New York, pp: 750.

Siebenmorgen, T. J., Cooper, N. T., Bautista, R. C., Counce, P. A., Wailes, E., Watkins, K. B., 2008, Estimating the economic value of rice (*oryza sativa* L.) As a function of harvest moisture content, Transactions of the ASABE, Vol. 24(3): 359-369.

Stroshine, R., Hamann, D., 1994, Physical Properties of Agricultural Materials and food Products, Purdue University, West Lafayette, Indian. Course manual.

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.

Zareiforush, H., Komarizadeh, M. H., Alizadeh, M. R., 2009, Effect of moisture content on some physical properties of paddy grains, Journal of Applied Science & Engineering Technology, 1(3): 132-139.