تعیین تجربی ضریب اصطکاک داخلی برخی از ارقام برنج‌های اصلاح‌شده ایرانی

رحمت‌اله اشتواد[1]، داود کلانتری[2]، سید جعفر هاشمی[2]، همت‌اله پیردشتی[3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی

۳- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

چکیده

با توجه به اینکه اندازه‌گیری ضریب اصطکاک داخلی غلات و محصولات زراعی در طراحی تجهیزات و ادوات پس از برداشت اهمیت دارد، در این تحقیق مطالعه تجربی ضریب اصطکاک داخلی چهار رقم از پرمحصول ایرانی به نام‌های نعمت، ندا، پژوهش و پردیس در چهار سطح رطوبتی ۸، ۱۱، ۱۵ و ۲۰ درصد مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک داخلی برنج‌های ارقام ذکر شده با افزایش رطوبت (تا رطوبت تعادل ۱±۱۱ درصد) کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد. همچنین زاویه اصطکاک داخلی ارقام دانه بلند نعمت و ندا به‌ترتیب ۳۹/۳ و ۳۷/۵ درجه بوده و بزرگتر از زاویه اصطکاک داخلی ارقام پژوهش و پردیس به میزان ۳۳/۹ و ۳۴/۳ درجه بدست آمد. مقدار زاویه اصطکاک داخلی در رطوبت تعادلی ۱±۱۱درصد برای هر یک از ارقام نعمت، ندا، پژوهش و پردیس به‌ترتیب به مقدار ۳۹/۳۰، ۳۷/۵۰، ۳۳/۹۵ و ۳۴/۳۸ درجه تعیین شد. با توجه به نتایج به نظر می‌رسد تفاوت‌های ظاهری ارقام می‌تواند بر رابطه‌ی بین تنش برشی و تنش نرمال مؤثر باشد اما نوع واریته تأثیر محسوسی در تنش برشی اولیه ندارد.

کلمات کلیدی: برنج، ضریب اصطکاک داخلی، 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 ۶۵۸ میلیون تن در سال ۲۰۰۷ رسیده است (FAO, 2007). طبق آمار موجود سطح زیرکشت این محصول در ایران ۵۲۶ هزار هکتار و میزان تولید شلتوک نزدیک ۲/۱۸ میلیون تن می‌باشد (بی‌نام، ۱۳۸۸). در ایران برنج یکی از محصولات راهبردی جامعه بوده و طی دو دهه‌ی اخیر میزان مصرف سرانه برنج و الگوی مصرف و تغذیه مردم تغییریافته

ومصرف برنج به‌عنوان 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، 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 بالارفتن 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، ۱۳۸۸).

یکی از موارد مهم برای محصولات غله‌ای در طی مراحل برداشت، انتقال و انبارداری، دانستن مقدار نیروهای اصطکاکی الف) مابین محصول و ب) بین محصول و سطوح درگیر می‌باشد. محصولات مختلف بر حسب خصوصیات فیزیکی آن‌ها بر سطح اجزای ماشین‌آلات 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 (به‌عنوان نیروهای اثرگذار بر جابجایی محصول)، در کمباین‌های برداشت برنج، در فرآیند حمل و نقل (به‌عنوان نیروهای مابین دانه و سطوح نوارهای نقاله)، در فرآیند ذخیره‌سازی و انبارداری (به‌عنوان نیروهای اصطکاکی وارد بر جداره‌های سیلوها و انبارهای نگهداری) و در فرآیند تبدیل (به‌عنوان نیروهای وارد بر نقاله‌های انتقال و نیز الگوهای تخلیه و بارگیری) مشاهده نمود. در حرکت و انتقال مواد دانه‌ای و غلات، نیروی اصطکاک به‌عنوان نیروی مقاوم در برابر حرکت نسبی به سه صورت نیروهای اصطکاک استاتیکی، دینامیکی و نیروی اصطکاک داخلی ظاهر می‌شود (Chukwu and Akande, 2007). زمانی که دانه‌های محصول نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند در اثر تماس بین آن‌ها یک نیروی مقاوم مانع حرکت می‌شود که مقدار این نیروی مقاوم به وسیله زاویه اصطکاک داخلی یا ضریب اصطکاک داخلی بیان می‌شود. لذا در کار تحقیقاتی حاضر سعی شده است اندازه‌گیری و محاسبه زاویه اصطکاک داخلی چهار رقم از ارقام پرمحصول برنج ایرانی به نام‌های نعمت، ندا، پژوهش و پردیس مطالعه و بررسی شود.

مواد و روش‌ها

برنج‌های استفاده شده در این طرح از ارقام پرمحصول و اصلاح شده‌ی نعمت، ندا، پژوهش (قائم ۲) و پردیس (قائم ۳) بوده و از پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری کشاورزی طبرستان دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تهیه گردیدند. برای اندازه‌گیری رطوبت از دستگاه رطوبت‌سنج دیجیتال (GMK-303/303RS, Korea) در مراحل مختلف آزمایش استفاده شد (شکل ۱). آزمایش

انجام شده در چهار سطح رطوبتی ۱±۸، ۱±۱۱، ۱±۱۵ و ۱±۲۰ درصد و بر مبنای وزن خشک دانه انجام شد (Zareiforoush *et al.*, 2009).

برای رسیدن به رطوبت پایین‌تر از رطوبت تعادلی از آون استفاده گردید. در این مرحله با قرار دادن نمونه‌ها در آون در دماها و زمان‌های مختلف و به‌صورت آزمون و خطا رطوبت دلخواه بدست آمد. 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 and Gupta, 2006). برای بدست آوردن رطوبت‌های بالاتر از رطوبت تعادلی محیط، نمونه‌ها درون یخچال‌هایی با شرایط کنترل‌شده دما و رطوبت نگه داشته و با استفاده از آبفشان قطرات آب به‌صورت ذرات بسیار ریز در محیط پراکنده گردیدند. برای اندازه‌گیری زاویه اصطکاک داخلی ϕ_i و یا ضریب اصطکاک داخلی μ_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[1] استفاده شد (Mohsenin, 1986). سلول برش مورد استفاده در این آزمایش از یک رینگ و استوانه ثابت پلی‌اتیلنی به قطر ۲۵۰ میلی‌متر تشکیل شده است. یک لودسل الکترونیکی با دقت ۰/۲ نیوتن به بازوی برش رینگ متصل شده است (شکل ۲).

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 به اندازه‌های ۰ (بدون بار)، ۱۵، ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ نیوتنی 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. نیروی لازم برای به حرکت در آوردن رینگ (F_t) به بازوی برش رینگ وارد شده و توسط لودسل ثبت و ضبط گردید. سپس داده‌های بدست آمده از آزمایش برای هر ۴ رقم برنج و در ۴ سطح رطوبتی به‌طور مجزا درون نرم افزار Excel ذخیره و مورد مطالعه و آنالیز قرار گرفت.

نتایج و بحث

رابطه بین تنش برشی و تنش عمودی در مواد جامد ایده‌آل بصورت یک خط مستقیم است که شیب این خط بیانگر ضریب اصطکاک داخلی بوده و بصورت زیر بیان می شود (رضوی و اکبری، ۱۳۸۶).

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

1 - Shear Cell

در بعضی از مواد دانه‌ای شکل مانند غلات وقتی که تنش نرمال (σ) صفر باشد، تنش برشی τ دارای مقدار غیر صفر است. در این گونه مواد رابطه‌ی تنش‌های برشی و عمودی به صورت زیر خواهد بود (Mohsenin, 1986).

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

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 σ و تنش برشی τ نیز از روابط زیر بدست می‌آید.

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

نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش عمودی σ و تنش برشی τ برای چهار رقم برنج ایرانی وارد نرم افزار Excel گردید. از نتایج بدست آمده می‌توان به افزایش تنش برشی ثابت (τ_0) اشاره کرد که با افزایش رطوبت سیر صعودی دارد. این بدین معنی است که هر چقدر رطوبت محصول بالاتر باشد مقدار نیروی لازم جهت غلبه بر نیروی مقاوم در شروع حرکت افزایش می‌یابد. بر طبق این نتایج به‌طور متوسط میزان τ_0 در رطوبت ۱±۱۱ درصد کمترین مقدار را داراست، این درصد بیانگر میزان رطوبت تعادلی[1] (EMC) محصول با محیط، تحت شرایط رطوبت ۴۵ درصد و دمای ۲۵ درجه در زمان انبارداری است که کمترین میزان تبادل رطوبت میان دانه و محیط پیرامونی اتفاق می‌افتد. در نتیجه در این سطح کمترین میزان انرژی ثابت صرف غلبه بر نیروهای مقاوم می‌گردد. در تحقیقات قبلی نیز رطوبت ۱۱ درصد به‌عنوان رطوبت تعادل در نظر گرفته شده است (رفیعی، ۱۳۸۵ Amiri Chayjan and Moazez, 2008; ASAE, 1995; ASAE, 1999;). نتایج این تحقیق نشان داد که نوع واریته (چهار رقم برنج ذکر شده) تأثیر محسوسی در تنش برشی اولیه (τ_0) ندارد.

با توجه به داده‌های بدست آمده از آزمایشات تجربی، نمودار تنش برشی- تنش نرمال برای ۴ رقم برنج مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. بر طبق این نتایج رابطه‌ی بین تنش برشی و تنش نرمال به صورت خطی مطابق با رابطه ۲ تغییر می‌یابد. در نمودارهای رسم‌شده برای ارقام نعمت (شکل ۴-A) و ندا (شکل ۴-B) در ۴ سطح رطوبتی دارای شیب تقریباً یکسانی هستند اما برای ارقام پژوهش (شکل ۵-C) و پردیس (شکل ۵-D) با افزایش رطوبت با افزایش شیب همراه می‌باشد که علت این پدیده به تفاوت‌های ظاهری این دو دسته ارقام برمی‌گردد. در شکل ۳ نمودار تنش برشی مرتبط با رطوبت ۱۱ درصد در پایین‌ترین سطح و تنش برشی مربوط به رطوبت ۲۰ درصد بالاتر از بقیه قرار

1- Equilibrium Moisture Content

گرفته است. نتیجه قابل‌توجه 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.

تأثیر رطوبت بر تغییر تنش برشی در بارهای ثابت در شکل ۴ نشان داده شده است. 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) ۳ منطقه رطوبتی قابل تفکیک است، ۱) منطقه زیر رطوبت تعادلی که در آن تنش برشی کاهش می‌یابد، ۲) منطقه رطوبت متوسط (۱۱ تا ۱۵ درصد) که در آن تنش برشی افزایش می‌یابد و ۳) منطقه رطوبت بالا 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 ۵، نمودار تنش برشی- درصد رطوبت برای برنج پردیس (شکل ۴-D)، داری تفاوت جزئی در منطقه پایین رطوبتی (رطوبت زیرتعادل) و برای بارهای کوچک نسبت به نمودارهای مربوط به سه رقم دیگر می‌باشد و آن اینکه در منطقه پایین رطوبتی با افزایش درصد رطوبت میزان تنش برشی برخلاف سه رقم دیگر افزایش می‌یابد. می‌توان علت این تغییر را در یک خصوصیت ظاهری دانه برنج پردیس نسبت به سه رقم دیگر جستجو کرد و آن وجود ریشک‌های کوچک در انتهای دانه برنج (شالی) می‌باشد که دلیلی برای ممانعت حرکت دانه‌ها روی هم و افزایش ضریب اصطکاک و در نتیجه افزایش تنش برشی در بارهای کوچک است. اما در بارهای عمودی بزرگ، اثر وجود ریشک‌های انتهایی نسبت به تأثیر بارهای بزرگ‌تر قابل‌توجه نمی‌باشد. به‌طورکلی کمترین تنش برشی در رطوبت ۱±۱۱ درصد مشاهده گردید.

با استناد 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 (به‌طور 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). سپس در منطقه ۳ با افزایش رطوبت به‌طور محسوسی از مقدار زاویه اصطکاک داخلی کاسته می‌شود (به‌طور مثال برای برنج نعمت 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 رطوبت بیش از حد باشد. همچنین در رطوبت‌های بالاتر به علت نرم‌شدن بیشتر پرزها، اثر پرزهای موجود در سطح پوسته برنج کمتر شده و با کاهش نیروی هم‌چسبی موجبات کاهش زاویه اصطکاک داخلی می‌گردد. نمودار رسم‌شده 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 میزان کلی زاویه اصطکاک داخلی برای برنج ندا نسبت به برنج نعمت را به سطح صاف و صیقلی‌تر 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 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 می‌یابد و پس از آن در منطقه ۳ رطوبتی سیر تقریبا یکنواختی را دارد. دلیل عمده‌ی این تغییرات در ارقام پژوهش و پردیس در مقایسه با ارقام نعمت و ندا ممکن است به خصوصیات فیزیکی محصول مرتبط باشد، به‌طوری‌که نمونه‌های پژوهش و پردیس دارای طول و ضخامت کمتری نسبت به نمونه-های برنج نعمت و ندا هستند. نحوه‌ی تغییرات زاویه اصطکاک داخلی ϕ_i برای برنج پردیس همانند رقم پژوهش می‌باشد، اما مقدار عددی آن از نمونه‌های قبلی کمتر است که کوتاه‌تر بودن طول دانه‌های این نمونه را می‌توان از دلایل اصلی در کوچکتر بودن زاویه اصطکاک داخلی دانست چراکه 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.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این پژوهش، رطوبت یکی از عوامل مؤثر بر میزان زاویه اصطکاک داخلی در برنج می‌باشد. به‌طورکلی میزان زاویه اصطکاک داخلی در رطوبت تعادلی در کمترین مقدار خود قرار دارد و با کاهش و افزایش رطوبت بر مقدار آن افزوده می‌گردد. 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 به‌دست آمده است.

منابع

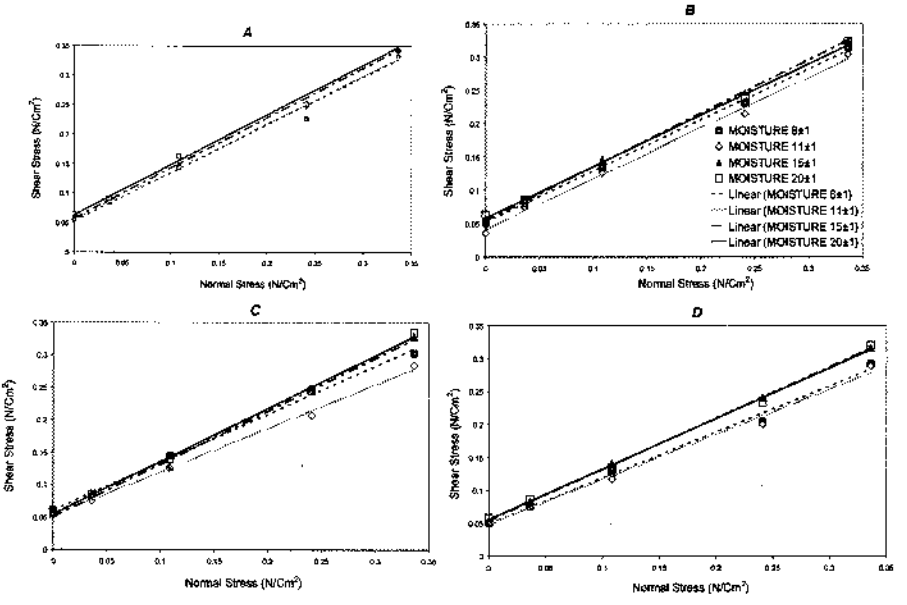
۱. بی نام. ۱۳۸۸. آمارنامه کشاورزی محصولات زراعی سال زراعی۸۷-۱۳۸۶. وزارت جهاد کشاورزی.

۲. رضوی، م.ع. و ر. اکبری. ۱۳۸۵. خواص بیوفیزیکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۳۰۲ صفحه.

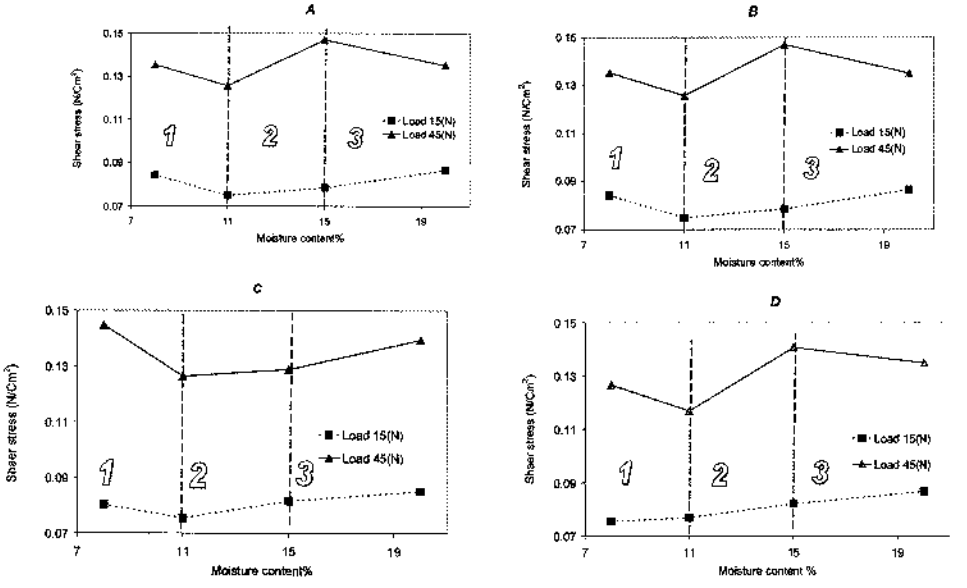
۳. رفیعی، ش. ۱۳۸۵. اصلاح رطوبت تعادلی شلتوک برنج (سپیدرود) برای شبیه‌سازی خشک کردن توده بستر نازک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۰(۳): ۱۷۵-۱۸۲.

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

5. Amiri Chayjan R. and Y. Moazez. 2008. Estimation of paddy equilibrium moisture sorption using ANNs. *Journal of Applied Sciences*. 8(2): 346-351.
6. ASAE. 1995. Standards D254.4. Moisture Relationships of Grains. 33rd ed., St. Joseph, MI.
7. ASAE. 1999. Standards D245.5. Moisture Relationship of Plant-based Agricultural Products, St. Joseph, MI.
8. Chukwu O. and F.B. Akande. 2007. Development of an Apparatus for Measuring Angle of Repose of Granular Materials. *Assumption University Journal of Technology*. 11(1): 62-66.
9. FAO. 2007. Food and Agricultural Organization of the United Nations. FAO Statistical Database. Available from http://faostat.fao.org.
10. Thakur A.K. and A.K. Gupta. 2006. Two stage drying of high moisture paddy with intervening rest period. *Energy Conversion and Management*. 47: 3069–3083.
11. Mohsenin, N.N. 1986. Physical properties of Plant and Animal Materials. 2nd edn. Gordon and Breach Science Publishers, New York. pp: 750.
12. Zareiforoush H, Komarizadeh M.H. and M.R. Alizadeh. 2009. Effect of moisture content on some physical properties of paddy grains, Research *Journal* of *Applied Science, Engineering* and *Technology*. 1(3): 132-139.



شکل ۳- نمودار 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



شکل ۴- نمودار اثر رطوبت بر میزان تنش برشی در دو سطح مختلف بار عمودی ■ ۱۵ نیوتن و ۴۵ نیوتن برای ۴ رقم برنج: A نعمت، B ندا، C پژوهش، D پردیس