مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱۲/ شماره ۲/سال ۱۳۹۰/ص ۱۲۶-۱۱۵

بررسی اثر رقم، اندازه و رطوبت دانه بر ضریب کشسانی و حداکثر تنش تماسی دانهٔ جو

امیرحسین افکاری سیاح*، عبداله گل محمدی و منصور راسخ**

*نگارنده مسئول، نشانی: اردبیل، انتهای خیابان دانشگاه، دانشگاه محقق اردبیلی، ص.پ: ۱۷۹، تلفن:۰۴۵۱-۵۵۱۰۱۴۰، پیام نگار: ahafkari@gmail.com

** به‌ترتیب: استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی، استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی و استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۲

چکیده

انجام هر نوع تحلیل مهندسی به‌منظور طراحی یا بهینه‌سازی سامانه‌های ماشینی در مراحل مختلف برداشت و فراوری محصولات دانه‌ای، از جمله دانه جو، به وجود اطلاعات پایه در زمینه خواص فیزیکی و مکانیکی مواد کشاورزی وابسته است. خواصی که به‌واسطه ماهیت زیست شناختی مواد کشاورزی در شرایط مختلف به‌طور معنی‌داری تغییر می‌کنند. بر این اساس، در این پژوهش با انجام ۳۰۰ آزمون فشاری، دو پارامتر با اهمیت ضریب کشسانی و تنش تماسی که عموماً معرف استحکام دانه می‌باشند استخراج شد و اثر متغیرهای مستقل بر آنها از لحاظ آماری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عوامل رقم (ارقام سهند، ماکویی و والفجر) و رطوبت، تأثیر معنی‌داری بر ضریب کشسانی و حداکثر تنش تماسی دانه جو دارند ($p<0/01$) درحالی‌که اثر اندازه دانه بر آنها معنی‌دار نبود. با افزایش رطوبت، تنش تماسی به‌طور خطی و ضریب کشسانی، تحت منحنی S- شکل معکوس کاهش می‌یابد. بر این اساس می‌توان سطح رطوبت ۱۷درصد (بر پایه تر) را به‌عنوان رطوبت انتقالی در دانهٔ جو در نظر گرفت، به‌طوری‌که در مقادیر کمتر و بیشتر از آن، دانه به‌ترتیب، رفتاری ترد و نرم از خود نشان می‌دهد. محدودهٔ حداکثر تنش ایجاد شده در دانهٔ جو در محدودهٔ کشسان از ۲۴۳ مگاپاسکال، در رطوبت ۲۵ درصد تا ۲۸۳۲ مگاپاسکال در رطوبت ۱۰/۲ درصد متغیر بود. به‌همین ترتیب ضریب کشسانی دانه جو نیز از ۱۱/۳ تا ۴۵۵/۴ مگاپاسکال در شرایط مختلف تیماری، متفاوت بود.

واژه‌های کلیدی

آزمون فشاری، تنش تماسی، دانه جو، ضریب کشسانی ظاهری

مقدمه

دانه جو یکی از مهمترین محصولات دانه‌ای است که در تغذیه انسان و دام مورد استفاده قرار می‌گیرد. این محصول در سطحی معادل ۱/۵۱ میلیون هکتار در سطح کشور کشت شده و میزان تولید آن ۳/۸ میلیون تن در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ بوده است (Anon., 2009) به‌طوری که این میزان تولید ایران را در بین ۱۰ کشور برتر تولیدکننده جو در جهان قرار داده است. دانه جو به‌صورت‌های مختلف تحت فراوری قرار می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به جوی خرد شده، بلغور جو و نیز تولید ماءالشعیر اشاره نمود. در تمام این موارد دانه جو تحت نیروهای شکننده و له‌کننده قرار می‌گیرد. همچنین دانه‌های جو طی عملیات برداشت تحت تنش‌های مکانیکی متعددی قرار می‌گیرند. هرچند این نیروها بر

توده دانه اعمال می‌گردند اما محاسبه میزان استحکام و مؤلفه‌های آن بر اساس استحکام تک دانه نیز از اهمیت برخوردار است (ASAE, 1999a). دانه جو به خصوص در رطوبت‌های کمتر از ۱۴درصد بیشتر به‌عنوان یک ماده صلب عمل می‌کند به‌طوری‌که در بسیاری کاربردها می‌توان عملاً دانه جو را ماده‌ای کشسان فرض نمود. در این صورت استخراج مؤلفه‌های کشسان دانه جو می‌تواند در برخی کاربردها نظیر طراحی سیلوهای ذخیره‌سازی و سیستم‌های فراوری و طراحی و بهینه‌سازی دستگاه‌هایی نظیر واحدهای آسیاب، نقاله‌ها و بالابرها اطلاعات مناسبی را در اختیار مهندسین قرار دهد (Moya *et al*., 2002). زیرا پارامترهای کشسانی که از این طریق محاسبه می‌شوند پارامترهای بنیادینی هستند که عمدتاً معرف رابطه تنش- کرنش (و نه نیرو-تغییر شکل) در دانه بوده و امکان استفاده از آنها در تحلیل‌های مهندسی وجود خواهد داشت. از این طریق امکان ارزیابی ماشین‌های کشاورزی از لحاظ صدمات مکانیکی که ممکن است به دانه‌ها وارد شود و حتی ارزیابی عملکرد دستگاه فراهم خواهد شد. به‌همین علت، طی سه دهه گذشته کوشش‌های بسیاری برای استخراج خواص مکانیکی محصولات دانه‌ای صورت گرفته است (Moya *et al*., 2002؛ Henry *et al*., 2000؛ Bargale, & Irudayaraj 1995؛ Bargal *et al*., 1995). اما به‌واسطه ساختمان خاص مواد زیستی، این ویژگی‌ها تحت شرایط مختلف (رطوبت، دما و تفاوت در رقم) تغییر کرده و لذا همچنان به جمع‌آوری اطلاعات بیشتر در این زمینه نیاز است (Afkari-Sayyah & Minaie, 2009). آزمون فشاری یکی از ساده‌ترین و در عین حال مطمئن‌ترین روش‌ها برای استخراج خواص استحکامی مواد می‌باشد که طی چند دهه گذشته در مورد مواد کشاورزی نیز به کرات مورد استفاده قرار گرفته است.

اولین تحقیقات در زمینه تعیین خواص کشسان دانه‌ها مربوط به تحقیقات راهبردی (Arnolds & Mohsenin, 1971) می‌باشد که در نهایت منجر به تعیین استانداردهای آزمون بارگذاری فشاری بر روی مواد غذایی با سطوح محدب گردید. بر اساس نتایج این تحقیقات مشخصات عامل بارگذاری، محدوده سرعت بارگذاری و نحوه انجام آزمون تعیین شدند (ASAE Standards, 1999a).

در تحقیقی که با هدف بررسی خصوصیات مکانیکی دانه‌های گندم و کلزا انجام پذیرفت، ضریب کشسانی، حداکثر تنش تماسی و رفتار تنش آسایی[1] دانه‌ها در مقادیر متفاوت از میزان رطوبت تعیین گردیدند. در اغلب موارد ضریب کشسانی ظاهری به‌طور مستقیم از طریق آزمون فشاری به‌دست آمده است. بر این مبناء ضریب کشسانی دانه گندم تحت بارگذاری بین دو صفحه تخت در سطح رطوبت ۱۱/۵ تا ۱۳درصد بر پایه تر معادل ۱۱۹۹ تا ۴۱۰۱ مگاپاسکال محاسبه گردید (Bargale *et al*., 1995). در همین رابطه (Molenda & Stasiak, 2002) نیز ضریب کشسانی توده دانه را برای انواع غلات شامل گندم، جو و یولاف بر اساس معادلات تنش-کرنش نوشته شده برای ذرات شن و طی اولین بارگذاری محاسبه نمودند. (Afkari Sayah & Minaie, 2004) نیز ضریب کشسانی ظاهری دانه گندم را معادل ۱۱۵۱ تا ۱۶۳۱ مگاپاسکال و حداکثر تنش تماسی را معادل ۲۵۴ مگاپاسکال در سطح رطوبت ۸/۲درصد بر پایه خشک محاسبه نمودند. مشخص شد که ضریب کشسانی دانه گندم به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اندازه دانه، رقم و رطوبت قرار دارد. درحالی‌که جهت بارگذاری اثر معنی‌داری بر خواص مکانیکی دانه تحت بارگذاری فشاری ندارد. هنری و همکاران(Henry *et al*., 2000) آزمون مشابهی را بر روی ۹ رقم مختلف دانه سویا انجام دادند.

1-Relaxation behavior

آنها تلاش نمودند که برای استخراج ویژگی‌های کشسان دانه از یک معادله چند جمله‌ای درجه سه استفاده نمایند، با این فرض که منحنی نیرو-تغییر شکل حاصله از یک منحنی S- شکل تبعیت کند. همچنین در تحقیقی که با هدف مطالعه خواص رئولوژیکی دانه جو صورت گرفت رفتار تنش آسایی دانه جو تحت بارگذاری فشاری بررسی شد. بر اساس نتایج این تحقیق مدل رئولوژیک دانه جو از معادله سه جزئی ماکسول تبعیت می‌کند و با افزایش رطوبت مؤلفه کشسان و مؤلفه زمان آسایش از اولین جزء مدل ماکسول به‌طور خطی کاهش می‌یابد. به عبارتی رطوبت تأثیر معنی‌داری بر مؤلفه‌های کشسان و لزج کشسان دانه جو دارد (Bargale, & Irudayaraj, 1995). باتوجه به سابقه پژوهش‌های انجام شده، استخراج مؤلفه‌های استحکامی دانه جو، شامل دو پارامتر بنیادین ضریب کشسانی و حداکثر تنش تماسی از طریق روش استاندارد و به‌ویژه در ارقام متداول داخلی و بررسی تأثیر رطوبت و اندازه دانه بر آنها از اهداف اصلی این پژوهش می‌باشند.

مواد و روش‌ها

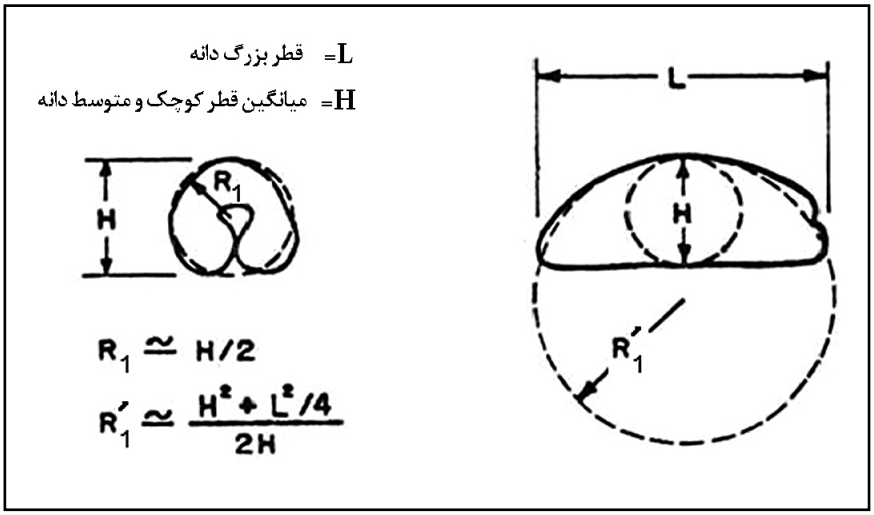
سه رقم متداول دانه جو شامل ارقام سهند، ماکویی و والفجر که در سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ برداشت شده‌اند به مقدار لازم از مرکز تحقیقات غلات کشور تهیه و سپس رطوبت هر یک از توده‌های دانه با روش آون شامل دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس و مدت زمان ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد (ASAE Standards, 1999b) در حالی‌که رطوبت اولیه دانه‌های جو بین ۸ تا ۹ درصد بر پایه تر بود. به تعداد ۳۰ نمونه توده دانه ۱۰۰ گرمی (معادل تعداد تیمارهای آزمایشی) به تصادف از توده‌های اصلی جدا شده و بر اساس منحنی فراوانی اندازه دانه‌ها که از یک توزیع نرمال تبعیت می‌کرد، دانه‌ها در دو دسته دانه‌های کوچک (پهنای کمتر از ۲/۸ میلی‌متر) و دانه‌های بزرگ (پهنای بیشتر از ۲/۸ میلی‌متر) جدا و تا پیش از انجام آزمون‌های مکانیکی در شیشه‌های آب‌بندی شده و در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. منظور از پهنای دانه بزرگ‌ترین قطر دانه در مقطع عرضی است که امکان جداسازی دانه‌ها را با کمک الک گرد فراهم می‌کند. سپس بر اساس طرح آزمایش و رطوبت اولیه دانه‌ها با افزودن آب مقطر به مقدار محاسبه شده به توده دانه در شیشه‌های آب‌بندی شده برای مدت ۷۲ ساعت سطوح مختلف رطوبت در ۵ سطح ۹، ۱۳، ۱۷، ۲۱، و ۲۵ درصد بر پایه تر ایجاد گردید. آزمون‌های فشاری با کمک دستگاه کشش – فشار استاندارد[1] موجود در گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. در کلیه آزمون‌ها، نمونه‌ها در پایدارترین حالت بین دو صفحه تخت قرار داده شد و با سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه، آزمون فشاری بر روی آنها انجام شد. پس از استخراج داده‌های نیرو و تغییر شکل، بر اساس روش استاندارد (ASAE Standards, 1999a) از رابطه ۱ برای محاسبه ضریب کشسانی دانه استفاده شد.

$$E = \frac{0.338K^{\frac{3}{2}}F(1-\mu^2)}{D^{\frac{3}{2}}}\left[\frac{1}{R_{\min}}+\frac{1}{R_{\max}}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، نیروی F بر حسب نیوتن، مربوط به نقطه‌ای از منحنی نیرو- تغییرشکل بر روی بخش خطی منحنی است با تغییرشکل D (بر حسب میلی‌متر) معادل $\mathbf{D}_T/2$. که در آن $\mathbf{D}_T$ میزان تغییرشکل دانه از ابتدای منحنی تا حد خطی است (Arnolds & Mohsenin, 1971). در حالت کلی D نقطه‌ای در محدوده کشسان است که الزاماً باید پایین‌تر از نقطه تسلیم منحنی باشد. رابطه ۱ در شرایطی که صفحه تخت فولادی و نمونه مورد آزمایش جسمی محدب با شعاع انحنای کوچک (R_1) و بزرگ (R_1') باشند، معتبر است. مقادیر شعاع انحناء برای

1- SANTAM Universal Testing Machine- Model STM-20, Iran

تک تک دانه‌ها بر اساس شکل ۱ قابل اندازه‌گیری است. در این تحقیق مقدار ضریب پواسن دانه جو (μ) با توجه به محدوده آن در دانه‌های گیاهی که مقدار ثابتی بین ۰/۲۷ تا ۰/۴۱ دارد، معادل ۰/۳۵ در نظر گرفته شد (Moya *et al.*, 2002). در رابطه ۱، K پارامتری است که مقدار آن اساساً به مقادیر R_1، R_2، R_1' و R_2' بستگی داشته و از جدولی که اختصاصاً برای آن نوشته شده‌است تعیین می‌گردد (Stroshine & Hamann, 1994).



شکل ۱ـ تقریب شعاع انحنای کوچک (R_1) و بزرگ (R_1') دانه بر اساس ابعاد سه گانه آن

براساس نظریه هرتز[1] در تنش تماسی[2] نقطه‌ای که بیشترین تنش برشی در آن اعمال می‌گردد، در عمق بافت دانه و در فاصله یک دوم از شعاع سطح تماس واقع می‌شود. بر مبنای این نظریه میزان تنش‌های سطحی[3] بر اساس یک حجم نیمه بیضوی[4] که بر روی صفحه تماس قرار گرفته است، تعیین می‌شوند. همچنین حداکثر تنش تماسی در مرکز صفحه تماس(σ_{max})، از رابطه ۲ حاصل خواهد شد:

$$\sigma_{max} = \frac{1.5F}{\pi ab} \qquad (۲)$$

که در آن،

a و b = نصف اقطار کوچک و بزرگ سطح بیضوی تماس

بوده و از رابطه‌های ۳ و ۴ به‌دست می‌آیند:

$$a = m\left[\frac{3FA}{2\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_1'}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_2'}\right)}\right]^{\frac{1}{3}} \qquad (۳)$$

$$b = n\left[\frac{3FA}{2\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_1'}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_2'}\right)}\right]^{\frac{1}{3}} \qquad (۴)$$

که در آنها،

R_1 و R_1' = شعاع انحنای کوچک و بزرگ دانه؛ و R_2 و R_2'= شعاع انحنای کوچک و بزرگ صفحه بارگذاری می‌باشند، و نیز مقدار پارامتر A از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

1- Hertz theory
2-Contact stress
3- Surface stresses
4- Semi-ellipsoid construction

$$A = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \qquad (۵)$$

که در آن،
E=ضریب کشسانی؛ و μ= ضریب پواسن دانه و صفحه فولادی می‌باشند. در شرایطی که جسم محدب (دانه) با صفحه‌ای تخت در تماس قرار گیرد (متداول‌ترین شرایط آزمون فشاری دانه) مقدار R_2 و R_2' بی‌نهایت خواهد بود. همچنین، با محاسبه مقادیر a و b می‌توان سطح تماس بین دانه و صفحه فلزی (C_a) را از رابطه ۶ برآورد نمود:

$$C_a = \pi ab \qquad (۶)$$

محاسبات تکمیلی و اثبات تئوری هرتز توسط Timoshenko & Goodier, 1970) ارائه شده است، ضمن اینکه (Stroshine & Hamann, 1994) نیز استفاده کاربردی از این تئوری را بر روی محصولات کشاورزی تشریح نموده‌اند.

تجزیه و تحلیل آماری

کلیه تحلیل‌ها با کمک آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام پذیرفت. دسته‌بندی داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده از آزمایشها و همچنین ارائه نتایج به‌صورت گراف و نمودار با کمک نرم افزار Excel انجام گرفت. تحلیل نتایج به‌طور عمده شامل تجزیه واریانس و آزمون LSD برای مقایسه تیمارها با کمک نرم افزار SPSS انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

اثر رطوبت

بر اساس نتایج این تحقیق، مقدار ضریب کشسانی ظاهری دانه‌های جو در نرم‌ترین نمونه‌ها معادل ۱۱/۲۲ مگاپاسکال (رطوبت ۲۵ درصد) و در سخت‌ترین نمونه‌ها معادل ۴۵۵/۴۴ مگاپاسکال (رطوبت ۹ درصد) بود. طی پژوهشی (Molenda & Stasiak, 2002) نیز ضریب کشسانی توده دانه جو را در سطح رطوبت ۲۰ درصد معادل ۱۰/۴ مگاپاسکال محاسبه نمودند، اما مقدار ضریب کشسانی توده دانه جو در سطح رطوبت ۱۰ درصد تفاوت اندکی با نمونه‌های مرطوب داشت. در مورد گندم نیز نتایج مشابهی به‌دست آمده است، به‌طوری‌که ضریب کشسانی گندم با افزایش رطوبت از ۵/۴ به ۲۵/۵ درصد از ۲۲۳ به ۱۵۷ مگاپاسکال کاهش نشان داده است (Bargale *et al.*, 1995).

جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس مقایسه میانگین پارامترهای ضریب کشسانی ظاهری و حداکثر تنش تماسی را در شرایط مختلف تیماری نشان می‌دهد. تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد، درحالی‌که رطوبت و رقم بر هر دو پارامتر استحکامی دانه جو به‌طور معنی‌دار مؤثرند، اما عامل اندازه بر ضریب کشسانی تأثیر معنی‌داری ندارد. درحالی‌که اثر متقابل دوگانه رطوبت× رقم بر میزان ضریب کشسانی دانه جو مؤثر است، دیگر اثرات متقابل دوگانه و سه گانه تأثیر بارزی بر متغیرهای وابسته نداشتند. همچنین صرفاً اثر دوگانه اندازه× رقم بر حداکثر تنش تماسی دانه جو مؤثر بوده است و اثرات متقابل دیگر تأثیر معنی‌داری بر پارامتر مورد نظر نداشتند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان اثرات اصلی سه عامل رطوبت، رقم و اندازه را بر دو پارامتر استحکامی دانه جو مهمترین نتیجه این تحقیق در نظر گرفت. در واقع، رطوبت اثری کاملاً معنی‌دار بر استحکام دانه جو دارد و این تأثیر خود را به‌صورت کاهش ضریب کشسانی متناسب با افزایش رطوبت نشان می‌دهد که با نتایج (Bargale & Irudayaraj, 1995) نیز مطابقت دارد.هرچند ضریب کشسانی ظاهری در واقع معرف سختی ماده در

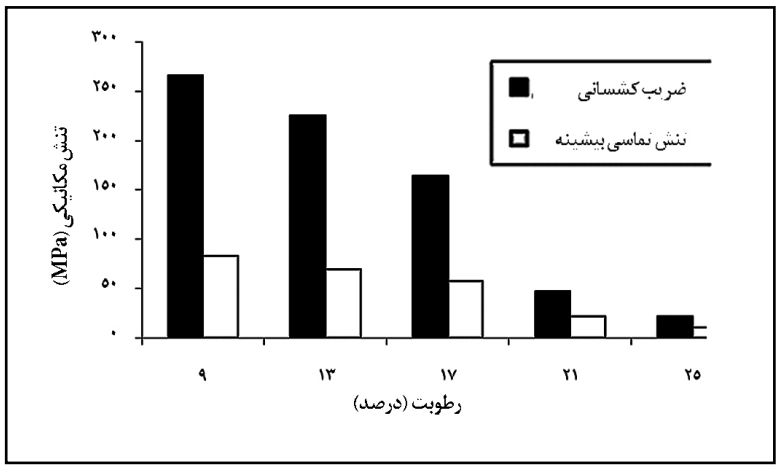
بخش سطحی جسم است اما با فرض یکنواختی بافت داخل دانه می‌توان تأثیر رطوبت را به کل دانه نسبت داد. این وضعیت در شکل ۲ نشان داده شده که بر اساس آن کاهش سختی دانه به‌طور خطی (معکوس) متناسب با تغییرات رطوبت دانه است (با ضریب تبیین ۰/۹۶).

جدول۱- جدول تجزیه واریانس حاصل از مقایسه میانگین‌ها بر اساس رقم، اندازه و رطوبت

منبع خطا	df	میانگین مربعات	F	میانگین مربعات	F
		ضریب کشسانی		تنش تماسی	
اندازه	۱	۲۳۶۱/۳	۱/۲۴ ns	۷۱۹۸۲۳۴/۹	۷۸/۷۷**
رطوبت	۴	۶۹۷۸۱۷/۳	۳۶۶/۳۶**	۶۹۸۴۱۸/۷	۷/۶۴**
رقم	۲	۲۵۴۵۶۷/۶	۱۳۳/۶۵**	۹۹۸۹۱۳۶/۵	۱۰۹/۳۱**
اندازه × رطوبت	۴	۶۵۱/۹	۰/۳۴۲ ns	۲۰۴۶۱۶/۰	۲/۲۴ns
اندازه × رقم	۲	۳۷۱۶/۳	۱/۹۵**	۸۲۳۴۰۶/۵	۱۹/۰۱**
رطوبت × رقم	۸	۳۴۲۶۷/۵	۱۷/۹۹**	۱۵۰۶۲۴/۱	۱/۶۵ns
اثرات سه گانه	۸	۹۱۷/۲	۰/۴۸۲ns	۱۴۸۹۶۱/۵	۱/۶۳ns
خطا	۲۷۰	۱۹۰۴/۷		۹۱۳۸۰/۴	
کل	۳۰۰	R^2= ۰/۸۷۵		R^2= ۰/۷۲۱	

* معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ** معنی‌دار در سطح ۰/۰۱، ns معنی‌دار نیست.

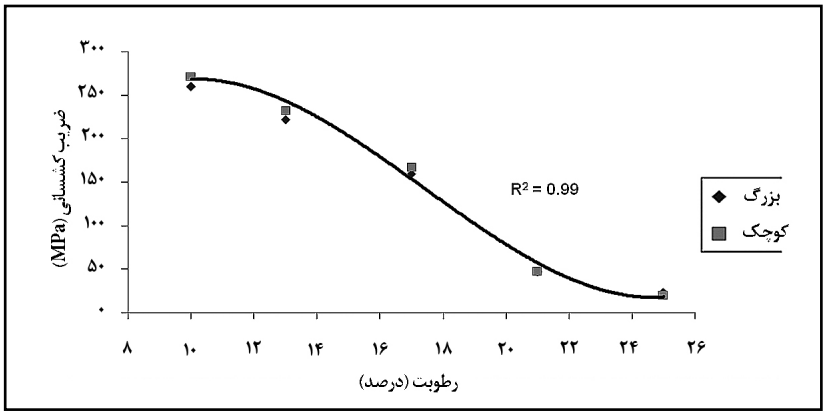
این پدیده پیش از این در دیگر محصولات کشاورزی و از جمله دانه‌های خوراکی نظیر گندم نیز مشاهده شده است، به‌طوری‌که در ارقام مختلف گندم با افزایش رطوبت مقادیر چغرمگی افزایش و ضریب مماسی و نیروی حداکثر کاهش یافته است (Afkari-Sayah & Minayie, 2004).



شکل۲- نحوه تأثیر رطوبت بر ضریب کشسانی ظاهری و حداکثر تنش تماسی دانه جو

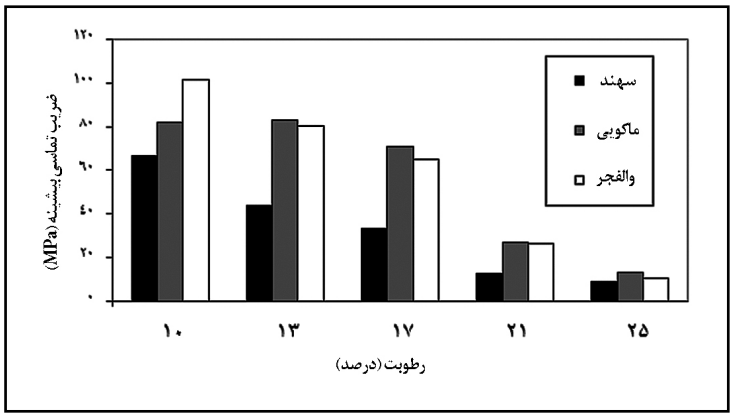
در واقع چیزی‌که در این تحقیق می‌توان آن را مشخص نمود حدی بر مبنای درصد رطوبت دانه است که می‌توان بالاتر از آن حد دانه را نرم و پایین‌تر از آن حد دانه را سخت در نظر گرفت. برای این منظور مجدداً

منحنی تغییرات سختی دانه بر اساس رطوبت با کمک یک معادله چند جمله‌ای برازش داده می‌شود (شکل ۳). خوشبختانه با توجه به منحنی S- شکل معکوس به‌دست آمده، می‌توان بر اساس نقطه عطف منحنی معیاری از حد نرمی و سختی دانه جو تعیین نمود.



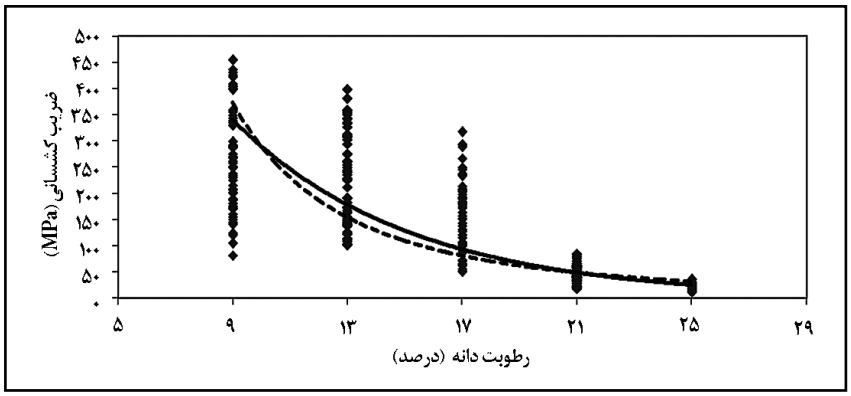
شکل۳- منحنیS- شکل ضریب کشسانی و رطوبت در دانه‌های بزرگ و کوچک

بر اساس منحنی شکل ۳ می‌توان سطح رطوبتی ۱۷ درصد را که مشخصاً در هر دو دسته از دانه‌های کوچک و بزرگ بر نقطه عطف منحنی مذکور قرار می‌گیرد به‌عنوان سطح رطوبت انتقالی (بحرانی) در نظر گرفت که در سطوح رطوبت پایین‌تر از آن دانه رفتار یک ماده سخت و در مقادیر بیشتر از آن دانه جو رفتاری مانند یک ماده نرم از خود نشان می‌دهد. از آنجاکه سختی و نرمی ماده، با تعریف مقاومت به تغییر شکل، در پیش‌بینی استحکام دانه از لحاظ آسیب‌های مکانیکی اهمیت دارد، لذا تعیین این سطح رطوبتی می‌تواند عملاً در مراحل پس از برداشت دانه و به‌ویژه در مراحل حمل و نقل، جابجایی، تخلیه به داخل سیلو و نیز ذخیره سازی در سیلوهای برجی به‌کار رود. هر چند بر اساس نتایج آماری مقادیر حداکثر تنش تماسی از پراکندگی بیشتری نسبت به ضریب کشسانی برخوردار است، در عین حال، رابطه مشابهی بین رطوبت و حداکثر تنش تماسی در ارقام مختلف وجود دارد. در واقع حداکثر تنش تماسی نیز به‌طور خطی با افزایش رطوبت (با ضریب تبیین ۰/۹۲) کاهش می‌یابد (شکل ۴).



شکل٤- نحوه تغییرات حداکثر تنش تماسی به‌صورت تابعی از رطوبت در ارقام مختلف

بر اساس شکل ۵، می‌توان تأثیر رطوبت بر ضریب کشسانی دانه جو را تحت معادلات مختلف مدل نمود. با این همه، بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس رگرسیون، معادلات لگاریتمی و به‌ویژه نمایی می توانند به‌خوبی معرف کاهش سختی کشسان دانه به‌واسطه افزایش رطوبت باشند. درحال حاضر یکی از مهمترین مشکلات در به‌کارگیری آزمون‌های مکانیکی در محصولات دانه‌ای پراکندگی قابل ملاحظه در نتایج این نوع آزمون‌ها است. همانگونه که در شکل زیر ملاحظه می‌گردد میزان پراکندگی در رطوبت بالاتر از ۲۰ درصد شدیداً کاهش می‌یابد. بر این اساس رطوبت بالاتر از ۲۰ درصد رطوبت مناسبی برای استخراج خواص کیفی دانه با کمک آزمون مکانیکی است. این نتیجه پیش از این در مورد دانه گندم نیز مشاهده شده بود (Afkari Sayah & Minaie, 2004).



شکل۵- مدل های آماری پیش بینی ضریب کشسانی دانه جو به‌صورت تابعی از رطوبت شامل: مدل توانی (خط چین) و مدل نمایی (خط ممتد)

با ضریب تبیین قابل قبولی می‌توان تغییرات استحکام دانه در محدوده کشسان را به‌صورت تابعی از رطوبت به‌دست آورد. در این ارتباط رابطه‌های ۶ و ۷ به‌ترتیب معرف مدل نمایی (R^2=۰/۷۹) و توانی (R^2=۰/۷۰) برای پیش‌بینی ضریب کشسانی دانه جو بر اساس رطوبت می‌باشند که از بالاترین ضریب همبستگی در بین مدل‌های ساده برخوردار بوده‌اند (شکل ۵).

$$Y_M = 553\, e^{-0.65MC} \qquad (۶)$$

$$Y_M = 381\, M_C^{-1.47} \qquad (۷)$$

که در آنها،

Y_M = ضریب کشسانی بر حسب مگاپاسکال؛ و

M_C =رطوبت بر پایه تر بر حسب درصد می‌باشند.

در این ارتباط محققان دیگر (Bargale *et al.*, 1995) نیز معادلات رگرسیونی خطی برای پیش بینی ضریب کشسانی و حداکثر تنش تماسی دانه‌های کلزا و گندم ارائه نمودند، با این تفاوت که در معادلات آنها رطوبت دانه بر پایه خشک در نظر گرفته شده بود.

اثر رقم

جدول ۲ مقادیر میانگین، خطای استاندارد و محدوده ۹۵ درصد تغییرات ضریب کشسانی و حداکثر تنش تماسی را در سه رقم مورد بررسی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تجزیه واریانس عامل رقم تأثیر معنی‌داری بر هر دو پارامتر وابسته حداکثر تنش تماسی و ضریب کشسانی دانه جو دارد. ضمن اینکه بر اساس جدول ۱ اثر متقابل رطوبت در رقم نیز بر پارامتر ضریب کشسانی مؤثر

است (شکل ۴). بر اساس شکل ۴ و نتایج تجزیه واریانس، رقم سهند تفاوت کاملاً معنی‌داری نسبت به دو رقم دیگر دارد. به‌طوری‌که بر پایه مقادیر میانگین، سختی رقم سهند در حدود نصف سختی رقم ماکویی و والفجر است، درحالی‌که رقم والفجر سخت‌ترین رقم می‌باشد.

به‌همین ترتیب شکل ۴ مشخص می‌کند که رقم سهند از بالاترین مقدار میانگین تنش تماسی در مقایسه با دو رقم دیگر برخوردار است و از این لحاظ ارقام ماکویی و والفجر در مکان‌های بعدی قرار دارند.

جدول۲- میانگین، خطای استاندارد و محدوده ۹۵ درصد تغییرات ضریب کشسانی و تنش تماسی در سه رقم مورد بررسی

پارامتر	رقم	میانگین	خطا	محدوده اطمینان ۹۵ درصد	
				حد پایین	حد بالا
ضریب کشسانی (مگاپاسکال)	سهند	۸۸/۴۲	۴/۳۶۴	۷۹/۸۲	۹۷/۰۱
	ماکویی	۱۶۲/۳۳	۴/۳۶۴	۱۵۳/۷۴	۱۷۰/۹۳
	والفجر	۱۸۴/۸۶	۴/۳۶۴	۱۷۶/۲۷	۱۹۳/۴۶
تنش تماسی (مگاپاسکال)	ماکویی	۱۱۷/۹۶	۳۰/۲۲۹	۱۱۸/۴۵	۱۲۳۷/۴۸
	والفجر	۱۰۷۰/۱۵	۳۰/۲۲۹	۱۰۱۰/۶۴	۱۱۲۹/۶۷
	سهند	۱۵۷۹/۲۸	۳۰/۲۲۹	۱۵۱۹/۷۷	۱۶۳۸/۷۹

اثر اندازه

بر اساس نتایج به‌دست آمده اندازه دانه تأثیر معنی‌داری بر دو پارامتر ضریب کشسانی و تنش تماسی دانه جو نداشت درحالی‌که در برخی تحقیقات پیشین بر تأثیر معنی‌دار اندازه دانه بر استحکام منجر به گسیختگی دانه گندم تأکید شده است (Afkari Sayah & Minaie, 2009). این تناقض در نتایج را می‌توان به عدم ایجاد شرایط لازم در این تحقیق برای گسترش ترک در دانه نسبت داد. درواقع دانه‌های خوراکی با توجه به سطح رطوبتی خود موادی ترد محسوب می‌گردند. لذا بر اساس مبانی مکانیک شکست[1]، در بررسی خواص مکانیکی این نوع مواد به‌ویژه در مرحله گسیختگی، باید به اندازه و تعداد ترک‌های موجود در دانه نیز توجه نمود که عموما تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سطح استحکام دانه دارد. در این ارتباط به عقیده محققان (Hoseney & Faubion, 1992) در دانه‌های کوچک‌تر احتمال وجود ترک‌های بزرگ کمتر از دانه‌های درشت است و این امر احتمال گسیختگی آنها را نیز کاهش می‌دهد. بنابراین در مقایسه ویژگی استحکامی دانه‌ها بر اساس مؤلفه‌های گسیختگی مانند تنش گسیختگی یا چغرمگی احتمالاً اندازه دانه بر نتایج مؤثر خواهد بود. درحالی‌که، در تحقیق حاضر صرفاً ویژگی‌های ماده در محدوده کشسان مدنظر قرار گرفته است که به‌طور منطقی مستقل از اندازه ترک و به تبع آن مستقل از اندازه دانه می‌باشد. بنابراین نتایج این تحقیق تأیید می‌کند که اندازه دانه به‌طور مستقیم بر سختی بافت دانه در محدوده کشسان مؤثر نیست.

1- Fracture mechanics

نتیجه گیری

هرچند نحوه تأثیر رطوبت بر استحکام دانه جو همانند دیگر دانه‌های غلات قابل پیش‌بینی است اما مقدار و نحوه تغییرات آن متفاوت از دیگر دانه‌های خوراکی است. ضمن این‌که اختلاف حدود ۳۰ درصدی بین رقم سهند و دو رقم دیگر از لحاظ پارامترهای استحکامی جالب توجه و نشان‌دهنده تفاوت آشکار در بافت آندوسپرم ارقام مذکور است.

تغییرات استحکام دانه متناسب با رطوبت بر اساس مدل نمایی نشان‌دهنده تغییرات قابل ملاحظه در بافت دانه با افزایش رطوبت (به‌ویژه پس از حد ۱۳درصد) می‌باشد. همچنین کاهش میزان پراکندگی نتایج آزمون مکانیکی به وضوح در سطوح رطوبت بالاتر از ۲۰ درصد مشاهده شد، ضمن اینکه می‌توان حد مشخصی را (بین ۳۰ تا ۴۰ مگاپاسکال) برای کمترین حد استحکام دانه جو در نظر گرفت. در عین حال عدم تأثیر معنی‌دار اندازه دانه را می‌توان به عدم گسترش ترک در آزمون مورد نظر (با توجه به پارامترهای استخراج شده از محدوده کشسان) نسبت داد. مدل رگرسیونی نمایی به‌دست آمده برای پیش بینی ضریب کشسانی ظاهری دانه جو بر اساس رطوبت نشان‌دهنده حد ثابتی از سطح تنش به‌عنوان معیار استحکام بافت دانه می‌باشد که به‌ویژه در رطوبت‌های بالاتر از ۲۰ درصد بر پایه تر می‌تواند به‌عنوان یک حد بحرانی در تعیین کمینه استحکام یک دانه در فرآیندهای طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های برداشت و پس از برداشت مد نظر قرار گیرد. در مجموع می‌توان نتایج به‌دست آمده را به شکل زیر دسته‌بندی و خلاصه نمود:

۱-رطوبت و رقم تأثیر کاملاً معنی‌داری بر خواص استحکامی دانه جو شامل دو پارامتر ضریب کشسانی و حداکثر تنش تماسی دانه جو دارند ($p<۰/۰۱$).

۲-نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اندازه دانه به‌طور مستقیم هیچ تأثیری بر استحکام بافت دانه ندارد.

۳-در مقایسه سه رقم جو مورد بررسی مشخص شد که رقم سهند از لحاظ ویژگی‌های استحکامی به‌مراتب نرم‌تر از دو رقم ماکویی و والفجر می‌باشد به‌طوری‌که سختی رقم سهند تقریباً معادل نصف دو رقم دیگر است.

۴-تغییرات استحکام دانه جو بر اساس رطوبت را می‌توان به‌کمک یک معادله نمایی یا توانی پیش‌بینی نمود. در این‌صورت می‌توان حد مشخصی را به‌عنوان کمترین سطح استحکام دانه جو بین ۳۰ تا ۴۰ مگاپاسکال درنظر گرفت.

۵-بر مبنای منحنی S- شکل معکوس تغییرات ضریب کشسانی بر اساس رطوبت، می‌توان سطح رطوبت ۱۷ درصد بر پایه‌تر را به‌عنوان سطح رطوبت انتقالی برای دانه جو از لحاظ نرمی و تردی دانست. در عین‌حال مشاهده شد که از سطح رطوبت ۲۰ درصد به بالا پراکندگی در نتایج آزمون مکانیکی شدیداً کاهش می‌یابد که خود دلیلی بر تغییرات بافت آندوسپرم دانه به‌واسطه تأثیر مشخص رطوبت است.

مراجع

Afkari-Sayyah, A.H. and Minaie, S. 2009. Fundamentals of Investigation and Evaluation of Mechanical Damage in Agricultural Products. 1st Ed., Jahad-Daneshgahi Pub. 184 pp., Ardabil, Iran, (in Farsi).

Afkari-Sayyah, A.H. and Minaie, S. 2004. Behavior of wheat kernels under quasi-static loading and its relation to grain hardness. J. Agric. Sci. Technol. (JAST). 6, 11-13.

Anon. 2009. Government Information Database. Available at: http://www.dolat.ir/NSite/FullStory, (in Farsi).

Arnolds , P.C. and Mohsenin, N.N. 1971. Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape. T. ASAE. 14, 78-84.

ASAE Standards. 1999a. Compression test of food materials of convex shape. Am. Soc. Agric. Eng. S368.3.

ASAE Standards. 1999b. Moisture measurement - unground grain and seeds. Am. Soc. Agric. Eng. S352.2.

Bargale, P. C., Irudayaraj, J. and Marquist, B. 1995. Studies on rheological behavior of canola and wheat. J Agric. Eng. Res. 61, 267-274.

Bargale, P.C. and Irudayaraj, L. 1995. Mechanical strength and rheological behavior of barley kernels. Int. J. Food Sci. Technol. 30(5): 609-623.

Henry, Z. A., Su, B. and Zhang, H. 2000. Resistance of soya beans to compression. J. Agric. Eng. Res. 76, 175-181.

Hoseney, R.C. and Faubion, J.M. 1992. Physical properties of cereal grains. In: Storage of Cereal Grains and Their Products. 4th Ed. Americ. Assoc. Cereal Chem., Inc. St. Paul, Minnesota, M.N.

Molenda, M. and Stasiak, M. 2002. Determination of the elastic constants of cereal grains in a uniaxial compression test. Int. Agrophysics. 16, 61-65.

Moya, M., Ayuga, F., Guaita, M. and Aguado, P.J. 2002. Mechanical properties of granular agricultural materials considered in silos design. 15th ASCE Mechanics Conference, 2-5 June, Columbia University, New York.

Stroshine, R. and Hamann, D. 1994. Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products. 1st Ed. West Lafayette, IN.

Timoshenko, S.P. and Goodyier, J.N. 1970. Theory of Elasticity. 3rd Ed. McGraw-Hill, New York, 416 pp.

AERI JAER *Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.12/No.2/2011/P: 115-126*

Effect of Variety, Size and Moisture Content on Modulus of Elasticity and Maximum Contact Stress of Barley

A. H. Afkari-Sayyah*, A. Golmohammadi and M. Rasekh

* Corresponding Author: Assistant professor, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, P.O.Box 179. Tel:09144529813. Emails: ahafkari@gmail.com
Received: 22 December 2009, Accepted: 22 January 2011

Engineering analysis for the design and modification of mechanical systems in grain harvesting and processing, including barley, depends on basic information about the physical and mechanical properties of the agricultural commodities. These properties vary significantly with the biological nature of agricultural materials under varying conditions (variety, shape, size, moisture content, etc.). This research project conducted 300 compression tests to extract two important parameters of grain strength and used statistical analysis to determine their effects. The results showed that variety and moisture content have significant effects on modulus of elasticity and contact stress ($p<0.01$), while the effect of grain size was not significant. Increasing moisture content decreased contact stress (linearly) and modulus of elasticity (S-shape curve). Accordingly, 17% moisture content (w.b.) was considered as the transition moisture in barley grain. Values greater than this caused the grain to be softer and values less than this made it more brittle. The range of maximum stress induced in the barley grain in the elastic range was 243 MPa at 25% MC to 2832 MPa at 10.2% MC. Maximum contact stress varied from 11.3 MPa to 455.4 MPa for different treatments.

Keywords: Barley, Compressive test, Contact stress, Elastic modulus