

تعیین نیرو و انرژی مورد نیاز برای شکست دانه نخود در بارگذاری شبه استاتیک

جواد خزائی^۱، علی رجیبی پور^۲، سعید محتسبی^۳ و منصور بهروزی لاری^۴
۱، استادیار، مجتمع عالی ابوریحان، دانشگاه تهران، ۲، ۳، ۴، استادیاران و استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران
تاریخ پذیرش مقاله ۸۲/۱۰/۳

خلاصه

در این تحقیق اثرات رطوبت دانه در سه سطح (۷٪، ۱۲٪ و ۱۶٪، بر مبنای تر)، اندازه دانه در سه سطح (ریز، متوسط و درشت) و جهت بارگذاری در دو سطح (از پهلو و از رو) بر نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه سه رقم نخود ایرانی (بیونیژ، کاکا و جم) تحت اثر نیروهای شبه استاتیک مطالعه شد. میانگین نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه های نخود به ترتیب ۲۳۰ نیوتن و ۱۰۵/۷ میلی ژول و حدود تغییرات آنها به ترتیب بین ۴۷-۵۲۲ نیوتن و ۲۰/۸-۲۷۵ میلی ژول بدست آمد. هر چهار فاکتور رطوبت دانه، اندازه دانه، رقم و جهت بارگذاری تاثیر معنی داری بر نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه نشان دادند. با افزایش رطوبت، نیروی شکست کاهش و انرژی مصرفی بطور معنی داری افزایش نشان داد. تاثیر قطر دانه بر هر دو صفت مورد مطالعه بطور معنی داری افزایش یافته بود. نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه در بارگذاری از پهلو بطور معنی داری بیشتر از آن در بارگذاری از رو بدست آمد. طبق نتایج حاصله پیش بینی می شود که رقم جم نسبت به دو رقم بیونیژ و کاکا مقاومت بیشتری در مقابل شکست داشته باشد. ضمنا بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق پیش بینی می گردد که اگر دانه های با رطوبت ۷٪، ۱۲٪ و ۱۶٪ به ترتیب تحت اثر سرعت ضربه ای معادل ۲۱/۷، ۲۸/۲ و ۳۸/۵ متر بر ثانیه قرار گیرند، حداقل ۵۰٪ آنها شکسته شوند.

واژه‌های کلیدی: نخود، نیرو، انرژی، شکست، خواص فیزیکی و مکانیکی.

مقدمه

نخود بدلیل پروتئین بالا از اهمیت غذایی خوبی برخوردار است و می‌تواند جایگزین مناسبی برای منابع حیوانی باشد. ضمنا این محصول بدلیل قابلیت تثبیت ازت خاک، از نظر زراعی ارزشمند است. لازمه توسعه سطح زیر کشت این محصول، حفظ کیفیت محصول در جریان تولید و فراوری است. در ایران، عدم وجود ماشینهای مناسب برای تولید و فراوری مکانیزه نخود و همچنین هزینه بالای روشهای موجود نشانگر تلاشهای اندکی است که برای مکانیزه کردن این محصول صورت گرفته است. برای طراحی ادوات و سیستمهای کارآمدی در این زمینه، دانستن خواص فیزیکی و مکانیکی این محصول ضروری است. پراوین و ایرودآیاراج (۱۹۹۵)، حداکثر نیروی شکست مواد دانه‌ای تحت اثر نیروهای استاتیک و شبه استاتیک را معیاری

برای طراحی ادوات با کارائی و کیفیت کار بالاتر می‌دانند. پائولسن (۱۹۷۸) نیز ضمن تعیین حداکثر نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه سویا تحت اثر نیروهای شبه استاتیک، گزارش کرد که افزایش نیروی شکست دانه (تحت اثر نیروهای شبه استاتیک) مستقیما متناسب با کاهش درصد دانه‌های صدمه دیده در جریان حمل و نقل، فراوری و انبارداری است. بر این اساس او دانستن این خواص را برای طراحی سیستمها و ادوات حمل و نقل و انبارداری دانه مفید می‌داند. ووتر و باردماکر (۱۹۸۸)، کانگ و همکاران (۱۹۹۵) و کیرک و مک لئود (۱۹۶۷) نیز معتقدند که دانستن نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه تحت اثر نیروهای شبه استاتیک، برای مدل سازی و پیشگوئی رفتار ماده در بارگذاری دینامیک در جریان حمل و نقل و فراوری دانه مفیدند.

استاتیک و جایگذاری آن در رابطه معروف انرژی جنبشی (رابطه ۱)، سرعت ضربه ای که می‌تواند سبب شکست دانه در بارگذاری دینامیک شود را برآورد کردند.

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1)$$

که در آن:

E = انرژی جنبشی دانه، ژول

m = جرم دانه، کیلوگرم

V = سرعت ضربه، متر بر ثانیه

کیرک و مک لئود (۱۹۶۷) این محاسبات را بر اساس این فرض انجام دادند که تمام انرژی جنبشی دانه‌ای که تحت ضربه‌ای با سرعت V قرار می‌گیرد، جذب آن می‌شود، در حقیقت آنها مقدار انرژی جذب شده توسط انگشتی‌های ضربه زن را قابل چشم‌پوشی فرض کردند، که با توجه به خواص نسبی دو ماده، آنرا فرض قابل قبولی می‌دانند. آنها معتقدند، اعمال ضربه به دانه با چنین سرعتی سبب شکست حداقل ۵۰٪ از آنها خواهد شد. البته پائولسن (۱۹۷۸) معتقد است، در بارگذاری دینامیک تمام انرژی جنبشی دانه در آن زمان کوتاه اعمال نیرو جذب دانه نمی‌شود. بنابراین اگر انرژی جنبشی دانه، معادل انرژی مصرفی برای شکست دانه در بارگذاری شبه استاتیک گردد، شکست دانه‌ها آغاز می‌گردد (مسلماً در چنین شرایطی، هرچه سرعت ضربه افزایش یابد، درصد دانه‌های شکسته بیشتر می‌شود). در صورتیکه فیسکوس و همکاران (۱۹۷۱) معتقدند که شکست دانه‌ها، خیلی پائین‌تر از این حد آغاز می‌گردد. محسنین (۱۹۸۴) و همین‌طور زورب و هال (۱۹۶۰) نیز معتقدند که در بارگذاری دینامیک نسبت به بارگذاری استاتیک و شبه استاتیک، انرژی بیشتری برای شکست دانه لازم است.

با توجه به عدم اطلاعات کافی در خصوص تعیین نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه نخود، ضرورت تعیین این خواص احساس می‌شود. بنابراین هدف از این تحقیق، تعیین نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه سه رقم نخود ایرانی در سطوح مختلف رطوبت، اندازه دانه و جهت بارگذاری است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق با انجام آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اثرات رطوبت دانه در سه سطح (۷٪، ۱۲٪ و ۱۶٪،

استاندارد انجمن مهندسين کشاورزی آمریکا روشی برای تعیین مقاومت و سفتی دانه محصولات کشاورزی پیشنهاد کرده است (۴). این استاندارد فشردن دانه در بین دو صفحه موازی تحت اثر نیروهای شبه استاتیک را برای این منظور پیشنهاد کرده است. بر این اساس، تحقیقات زیادی در زمینه تعیین نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه محصولات کشاورزی تحت اثر نیروهای استاتیک و شبه استاتیک صورت گرفته است (۶، ۷، ۱۲، ۱۳، ۱۹، ۲۰). کوناک و همکاران (۲۰۰۲)، نیروی شکست دانه نخود دیم رقم کوکبازی را در محدوده رطوبت‌های ۵/۲٪ تا ۱۶/۵٪ تعیین کردند. آنها تاثیر شدید رطوبت بر نیروی شکست را نتیجه گرفتند. تحقیقات انجام شده بر روی دانه محصولات دیگر نیز تاثیر معنی‌دار رطوبت بر نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه را گزارش کرده‌اند (۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶).

پائولسن (۱۹۷۸)، تاثیر سه فاکتور رطوبت، اندازه دانه و جهت بارگذاری بر نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه سویا را معنی‌دار گزارش کرده است. او آزمایشات را در سرعت بارگذاری ۶ میلیمتر بر دقیقه انجام داد. ليو و همکاران (۱۹۹۰) نیز با تعیین نیرو و انرژی شکست دانه سویا تحت اثر نیروهای شبه استاتیک (در سرعت ۱/۲ میلیمتر بر دقیقه)، تاثیر معنی‌دار رطوبت و جهت بارگذاری را نتیجه گرفتند. بیلانسکی (۱۹۶۶)، نیز اثرات رطوبت دانه و جهت بارگذاری بر نیروی شکست دانه‌های سویا، ذرت، گندم، جو و جو دوسر، را در سرعت بارگذاری ۱/۲۷ میلیمتر بر دقیقه معنی‌دار گزارش کرد. او دریافت که نیروی شکست دانه در بارگذاری از پهلو بطور معنی‌داری بیشتر از آن در بارگذاری از رو بود.

سفت و نرم بودن دانه خصوصیت مهمی است که نیروی شکست و تغییر شکل‌پذیری دانه تا لحظه شکست و در نهایت انرژی مصرفی برای شکست دانه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عنوان یک اصل، دانه‌هایی که انرژی بیشتری برای شکست نیاز دارند، در مقابل شکست مقاوم‌ترند (۱۵، ۱۹). پائولسن (۱۹۷۸) نیز معتقد است که انرژی شکست دانه در بارگذاری شبه استاتیک می‌تواند معیاری بر تعیین مقاومت به شکست دانه در بارگذاری دینامیک باشد. او بیان می‌دارد که دانه دارای ظرفیت جذب انرژی معینی است که اگر فراهم شود شکست اتفاق می‌افتد. بر این اساس، او و همین‌طور کیرک و مک لئود (۱۹۶۷) با تعیین انرژی مصرفی برای شکست دانه در بارگذاری

نمودار نیرو - تغییر طول دانه به طور پیوسته ترسیم می‌گشت (شکل ۲). بار گذاری تا لحظه ای که نیرو به بیشترین مقدار خود می‌رسید ادامه می‌یافت. از روی این نمودار حداکثر نیروی شکست دانه قرائت شد. انرژی مصرفی برای شکست دانه نیز با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو- تغییر طول دانه بدست آمد.

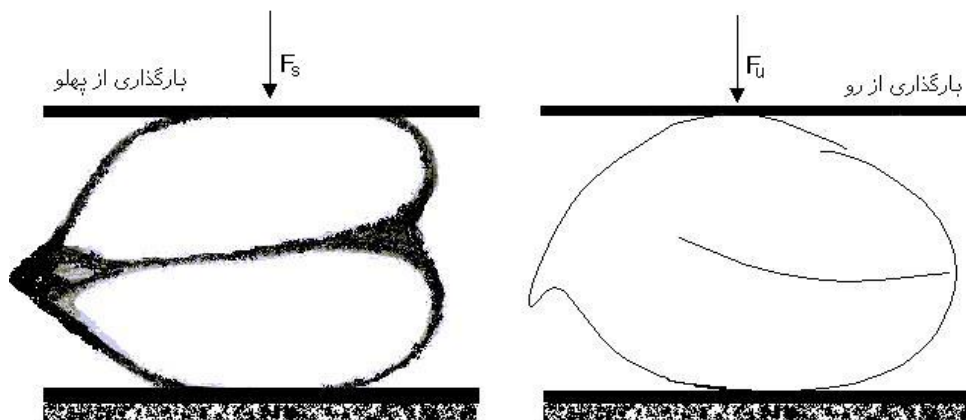
دسته‌بندی دانه‌ها به ریز، متوسط و درشت بر اساس میانگین هندسی قطرشان صورت گرفت. برای این منظور قطر کوچک، بزرگ و متوسط هر دانه، توسط ریز سنج اندازه‌گیری و سپس میانگین هندسی قطر دانه محاسبه گردید. در نهایت دانه‌ها بر اساس میانگین قطر هندسی شان در سه دسته ریز، متوسط و درشت دسته‌بندی شدند. دامنه تغییرات میانگین هندسی قطر این سه دسته به ترتیب بین $۵/۹-۶/۵$ ، $۶/۸-۷/۶$ ، و $۷/۸-۸/۶$ میلیمتر انتخاب گردید که میانگین آنها به ترتیب معادل $۶/۲$ ، $۷/۲$ و $۸/۲$ میلیمتر بود.

همانطور که قبلاً ذکر شد، کیرک و مک لئود (۱۹۶۷) و پائولسن (۱۹۷۸)، معتقدند انرژی مصرفی برای شکست دانه در حالت استاتیک می‌تواند مبنایی برای پیش بینی سرعت ضربه‌ای که سبب شکست دانه در بارگذاری دینامیک می‌گردد، باشد. پیش بینی سرعت ضربه بحرانی می‌تواند در طراحی کوبنده‌ها موثر باشد. بنابراین طبق این نظریه، در این تحقیق با معلوم بودن میانگین جرم و انرژی مورد نیاز برای شکست دانه‌های نخود در بارگذاری شبه استاتیک (در هریک از سطوح رطوبت)، و جایگذاری آنها در معادله ۱، سرعت ضربه بحرانی برای دانه نخود محاسبه گردید.

بر مبنای (تر)، اندازه دانه در سه سطح (ریز، متوسط و درشت به ترتیب با میانگین هندسی قطر $۶/۲$ ، $۷/۲$ و $۸/۲$ میلیمتر)، و جهت بارگذاری در دوسطح (از پهلو و از رو) بر نیرو و انرژی لازم برای شکست دانه نخود تحت اثر نیروهای شبه استاتیک مطالعه شد. کلیه آزمایشات بر روی سه رقم نخود (رقم بیونیژ دیم کرمانشاه، کاکا دیم کنگاور و جم آبی کرج) انجام شدند. در کلیه آزمایش‌ها، سرعت بارگذاری ثابت و مساوی ۵ میلیمتر بر دقیقه بود. هر آزمایش ۲۰ مرتبه تکرار شد. جهت‌های اعمال نیرو به دانه، در شکل ۱ نشان داده شده است.

نخودهای دیم مورد استفاده در این تحقیق، از مزارع مرکز تحقیقات دیم کرمانشاه و کنگاور و نخودهای آبی از مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران تهیه شدند. برای این منظور، غلاف‌های نخود بصورت دستی از سطح مزرعه جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. در آنجا دانه‌ها بصورت دستی از داخل غلاف‌ها خارج و در داخل کیسه‌های دربسته در دمای $۵^{\circ}C$ نگهداری شدند. قبل از هر آزمایش، کلیه دانه‌ها از نظر صدمات ظاهری بررسی و در صورت مشاهده هر گونه ترک، یا صدمات ظاهری دیگری از آزمایش خارج می‌شدند.

برای انجام آزمایشات از ماشین آزمون کشش-فشار اینسترن واقع در مرکز تحقیقات جنگل‌ها و مراتع وزارت جهاد کشاورزی استفاده شد. این ماشین دارای نیرو سنجی به ظرفیت ۱ کیلو نیوتن و دقت $۰/۰۱$ نیوتن بود. برای هر آزمایش، دانه در فاصله بین فک‌های ثابت و متحرک دستگاه آزمون قرار می‌گرفت و با حرکت فک متحرک در جهت مورد نظر فشرده می‌شد. همزمان توسط نیرو سنج دستگاه، نیرو تا لحظه شکست اندازه‌گیری و



شکل ۱. نمایش جهت‌های اعمال نیرو به دانه.

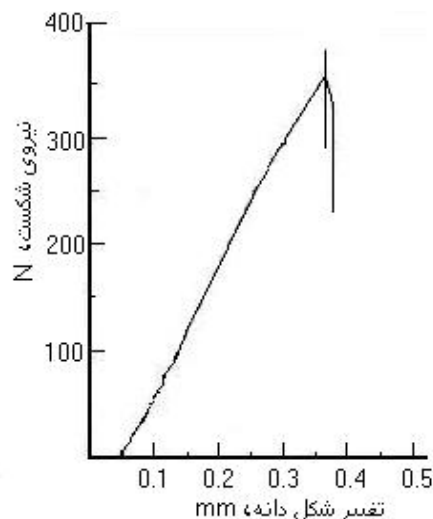
جدول ۱- نتایج آنالیز واریانس (میانگین مربعات) داده های نیرو و انرژی شکست دانه نخود تحت بارگذاری شبه استاتیک.

میانگین مربعات (MS)		منبع تغییرات	
درجه آزادی	نیروی شکست دانه (نیوتن)	df	منبع تغییرات
انرژی مصرفی برای شکست دانه (میلی ژول)			
۷۸۵۴۷**	۱۳۸۹۴.**	۵۳	تیمار
۱۰۰۷۸۰۸**	۲۵۰۲۹۵۳**	۲	رطوبت دانه
۲۱۱۹۳۶**	۶۸۴۲۴.**	۲	قطر دانه
۲۱۵۶۵**	۴۵۵۵۱۱**	۱	جهت بارگذاری
۱۸۸۶۹**	۹۲۹۴۴**	۲	رقم
۸۵۵۸**	۲۶۱۶۱**	۴	رطوبت × قطر
۱۷۸۳**	۴۳۱۶.**	۲	رطوبت × جهت بارگذاری
۴۴۶ ^{NS}	۱۰۴۷۵**	۴	رطوبت × رقم
۱۲۲ ^{NS}	۲۰۹۵ ^{NS}	۲	جهت بارگذاری × قطر
۶۱۷ ^{NS}	۷۱۱۲**	۴	رقم × قطر
۳۴۳ ^{NS}	۴۹۲۲ ^{NS}	۲	جهت بارگذاری × رقم
۴۲۴ ^{NS}	۷۵۴ ^{NS}	۴	جهت بارگذاری × رقم × رطوبت
۱۵۷ ^{NS}	۳۷۱۷ ^{NS}	۴	جهت بارگذاری × رقم × قطر
۴۲۹۱**	۳۳۴۸ ^{NS}	۴	جهت بارگذاری × رطوبت × قطر
۶۷۷ ^{NS}	۳۳۹۰ ^{NS}	۸	رقم × رطوبت × قطر
۷۸۹ ^{NS}	۱۷۸۷ ^{NS}	۸	جهت بارگذاری × رقم × رطوبت × قطر
۷۳۶	۲۱۱۲	۱۰۲۶	اشتباه

** معنی دار در سطح ۱ درصد و NS - غیر معنی دار

تاثیر رطوبت دانه. نتایج آنالیز گام به گام^۱ داده‌های نیروی شکست دانه نخود نشان داد که در بین دو متغیر کمی رطوبت و اندازه دانه، رطوبت تاثیر بیشتری بر نیروی شکست داشته است. از شکل ۳ پیداست که با افزایش رطوبت، نیروی شکست دانه کاهش می‌یافت که مطابق نتایج آنالیز واریانس داده‌ها این تغییرات در سطح ۱٪ معنی‌دار بودند.

از نتایج مقایسه میانگین‌های حاصل از اثر متقابل رطوبت و قطر دانه (جدول ۲) پیداست که در کلیه سطوح قطر دانه تاثیر رطوبت بر نیروی شکست بطور معنی‌داری کاهش‌دهنده بود. از این جدول پیداست که با افزایش رطوبت دانه از ۷٪ به ۱۶٪، در هر یک از سطوح قطر دانه یعنی ۶/۲، ۷/۲ و ۸/۲ میلی‌متر نیروی شکست به ترتیب ۵۴٪، ۵۵٪ و ۵۲٪ کاهش می‌یافت. در مجموع



شکل ۲. نمودار نیرو - تغییر شکل دانه در آزمون تعیین نیروی شکست دانه نخود. قطر دانه ۸/۲ میلی‌متر و محتوای رطوبتی دانه ۷٪.

برای تعیین درصد رطوبت دانه‌های نخود، طبق دستورالعمل استاندارد انجمن مهندسين کشاورزي آمريكا كه براي دانه‌هایی مثل لوبیا و ذرت توصیه شده است، اقدام شد (۵). برای این منظور نمونه‌هایی از دانه به وزن ۱۵ گرم به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۱۰۳°C اجاق برقی نگهداری و پس از آن درصد رطوبت بر مبنای تر محاسبه گشت.

نتایج و بحث

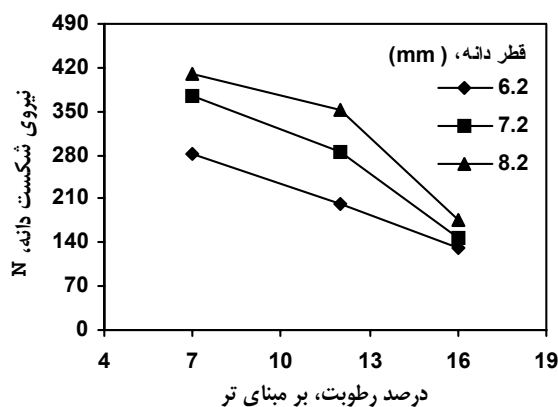
نتایج آنالیز داده‌ها نشان داد که میانگین نیروی شکست دانه‌های نخود ۲۳۰ نیوتن و حدود تغییرات آن بین ۴۷-۵۳۲ نیوتن بود. میانگین انرژی مصرفی برای شکست دانه‌های نخود نیز ۱۰۵/۷ میلی ژول و حدود تغییرات آن بین ۲۰/۸-۲۷۵ میلی ژول تعیین شد. طبق نتایج آنالیز واریانس داده‌ها (جدول ۱)، هر چهار فاکتور رطوبت دانه، جهت بارگذاری، اندازه دانه و رقم نخود تاثیر معنی‌داری بر نیرو و انرژی مورد نیاز برای شکست دانه نخود داشتند. ضمناً برای نیروی شکست دانه، اثرات دوگانه جهت بارگذاری در رطوبت، رقم در رطوبت، رقم در قطر، و رطوبت در قطر در سطح ۱٪ معنی‌دار بودند. برای انرژی مصرفی برای شکست دانه نخود نیز اثرات دوگانه رطوبت در جهت بارگذاری و رطوبت در قطر دانه معنی‌دار شدند ($p=0.1$). در زیر تاثیر هر یک از متغیرهای مستقل بر نیرو و انرژی مصرفی برای شکست دانه نخود به تفکیک بحث شده‌اند.

گسیختگی دانه در زیر بار می شود که از نظر برداشت زود هنگام حائز اهمیت است.

آزمایشات انجام شده در این تحقیق نشان داد که در رطوبت ۷٪، شکست دانه ها بیشتر بصورت ترد^۱ مشاهده شد و با صدایی همراه بود. و ضمناً ترک و یا شکست ایجاد شده در دانه، در داخل دانه گسترش می یافت که اغلب سبب چند تکه شدن دانه می گشت. این علائم می تواند نشانگر این واقعیت باشند که دانه های با رطوبت ۷٪ را می توان به عنوان یک ماده ترد در نظر گرفت. در صورتیکه در رطوبت های ۱۲٪ و ۱۶٪ شکست بصورت نرم^۲ بود و لذا نقطه شکست مشخصی قابل تشخیص نبود. نقطه شکست از روی نمودار نیرو- تغییر شکل دانه، وقتی که به خط راست نزدیک می شد تشخیص داده می شد. این خصوصیت سبب می گشت که در این نوع دانه ها، خرد شدن دانه بندرت اتفاق بیافتاد. و لذا رفتار دانه در این سطوح رطوبت را می توان شبیه رفتار مواد الاستوپلاستیک (نرم) دانست. مشابه این نتیجه گیری را وانانن و اوکوس (۱۹۹۸) برای دانه ذرت و پرآوین و ایرودیاراچ (۱۹۹۵) برای سایر دانه ها گزارش کرده اند.

در خصوص تاثیر رطوبت بر انرژی شکست دانه نخود، نتایج آنالیز گام به گام داده های انرژی شکست نشان داد که در بین دو متغیر کمی رطوبت و اندازه دانه نخود، رطوبت تاثیر بیشتری بر انرژی شکست دانه داشته است. با افزایش رطوبت، انرژی مصرفی برای شکست دانه بطور معنی داری افزایش یافت (شکل ۴). از جدول ۲ پیداست که تاثیر رطوبت بر انرژی شکست، برای دانه های ریز، متوسط و درشت یکسان نبوده است. پیداست که تاثیر رطوبت بر انرژی مصرفی برای شکست دانه های ریز نسبت به دانه های متوسط و درشت بیشتر بوده است. با افزایش رطوبت دانه از ۷ به ۱۶٪، انرژی مصرفی برای شکست دانه های ریز، متوسط و درشت به ترتیب ۳/۱، ۲/۶ و ۲/۷ برابر افزایش یافت. این مطلب از نمودارهای شکل ۴ نیز قابل استنباط است. در مجموع می توان نتیجه گرفت که انرژی مصرفی برای شکست دانه در رطوبت ۱۶٪ بطور متوسط ۲/۸ برابر بیشتر از آن در رطوبت ۷٪ تعیین شد. این نتیجه گیری عکس آن چیزی است که در مورد نیروی شکست بدست آمد.

می توان نتیجه گرفت که نیروی شکست دانه نخود در رطوبت ۷٪، با میانگین ۳۰۸ نیوتن بطور متوسط ۲/۲ برابر بیشتر از مقدار آن در رطوبت ۱۶٪ بود ضمناً از جدول ۳ پیداست که در هر دو جهت بارگذاری تاثیر رطوبت بر نیروی شکست معنی دار بود. البته از همین جدول پیداست که تاثیر رطوبت بر نیروی شکست در بارگذاری از پهلو قوی تر از آن در بارگذاری از رو بوده است.



شکل ۳ - تاثیر رطوبت بر نیروی شکست دانه نخود آبی جم در بارگذاری از پهلو.

کوناک و همکاران (۲۰۰۲) بدون ذکر سرعت بارگذاری، تغییرات نیروی شکست دانه های نخود در محدوده رطوبت های ۵/۲ تا ۱۶/۵٪ را بین ۹۰ تا ۲۱۰ نیوتن گزارش کرده اند. یافته های قبلی نیز تاثیر معنی دار رطوبت بر نیروی شکست دانه سایر محصولات را گزارش کرده اند (۹، ۱۵). لیو و همکاران (۱۹۹۰)، نیز نتیجه گرفتند که با کاهش رطوبت دانه از ۲۵٪ به ۱۰٪ نیروی شکست ۲ برابر می شد. پائولسن (۱۹۷۸) نیز ۴ برابر شدن نیروی شکست دانه در حین کاهش رطوبت دانه از ۲۰٪ به ۸/۳٪ را نتیجه گرفت.

فوتز و همکاران (۱۹۹۳)، معتقدند که مقاومت مکانیکی دانه به ترکیبات سلولزی دیواره سلول و مواد مرکبی که سلولها را به هم پیوند می دهد بستگی دارد. افزایش رطوبت دانه سبب سست کردن پیوندهای هیدروژنی سلولز و نیز کاهش پیوندهای بین پروتئین ها، نشاسته و سایر ترکیبات سلول می گردد که در نهایت سبب کاهش مقاومت مکانیکی دانه و افزایش قابلیت تغییر شکل پذیری آن می گردد. البته، افزایش قابلیت تغییر شکل پذیری دانه، خصوصیت مهمی است که مانع از هم

1 . Brittle

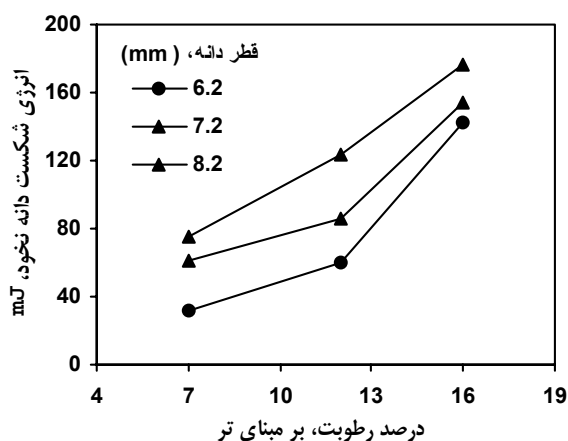
2 . Ductile

جدول ۲. مقایسه میانگین های نیرو و انرژی شکست دانه نخود حاصل از اثر متقابل رطوبت و قطر دانه نخود با استفاده از آزمون دانکن.

انرژی مصرفی برای شکست دانه نخود (میلی ژول)			نیروی شکست دانه نخود، (نیوتن)			رطوبت غلاف (%)
میانگین قطر هندسی دانه، (میلیمتر)						
۸/۲	۷/۲	۶/۲	۸/۲	۷/۲	۶/۲	
۷۲/۸ f	۶۱/۸ g	۴۲/۵ h	۳۵۷ a	۳۱۶ b	۲۵۳ d	۷
۱۲۲ d	۹۴/۷ e	۶۹/۶ fg	۲۹۰ c	۲۳۸ e	۱۸۷ f	۱۲
۱۹۴/۸ a	۱۶۳ b	۱۳۲ c	۱۷۰ g	۱۴۲ h	۱۱۶ i	۱۶

برای هر صفت، اعداد موجود در هر ردیف یا ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، اختلاف معنی داری در سطح ۱٪ ندارند.

بیشتر بودن انرژی مورد نیاز برای شکست دانه های مرطوب نسبت به دانه های خشک، خصوصیت با ارزشی است که مقاومت به شکست و از هم گسیختگی دانه در حین اعمال نیرو، را افزایش می دهد (۱۳، ۱۶، ۲۰). این خصوصیت مخصوصا در بارگذاری دینامیک حائز اهمیت است و می تواند سبب کاهش معنی دار درصد دانه های شکسته در رطوبت های بالا تر شود. در این ارتباط، خزائی (۱۳۸۲) و خزائی و همکاران (۱۳۸۲) گزارش کردند که در آزمون تعیین مقاومت به شکست دانه نخود در بارگذاری دینامیک، با افزایش رطوبت دانه های نخود از ۰/۷٪ به ۱/۱۸٪، میانگین درصد دانه های شکسته از ۶/۷٪ به ۰/۲٪ کاهش می یافت.



شکل ۴- تاثیر رطوبت بر انرژی مصرفی برای شکست دانه نخود

دیم بیونیژر در بارگذاری از رو.

سایر محققین نیز تاثیر افزایش رطوبت بر انرژی شکست را گزارش کرده اند. بیلانسکی (۱۹۶۶)، معتقد است که بعنوان یک اصل باید پذیرفت که انرژی بیشتری برای شکست دانه های مرطوب نسبت به دانه های خشک نیاز است. او دریافت که افزایش رطوبت دانه ذرت از ۸٪ به ۱۷٪، سبب ۱/۲ برابر شدن انرژی مورد نیاز برای شکست دانه شد. در صورتیکه برای دانه سویا، با افزایش رطوبت دانه از ۶٪ به ۱۶٪، انرژی مصرفی ۵ برابر افزایش یافت. زورب و هال (۱۹۶۰) نیز افزایش ۶۶ درصدی انرژی شکست دانه ذرت با افزایش رطوبت از ۱۵/۴ به ۲۴٪ را نتیجه گرفتند. آنها در همین تحقیق دریافتند که با افزایش رطوبت دانه لوبیا از ۸٪ به ۲۲٪، انرژی مصرفی باندازه ۸/۴ برابر افزایش یافت و سپس با افزایش بیشتر رطوبت روند نزولی گرفت. البته در این بین کیرک و مک لئود (۱۹۶۷) تاثیر معنی داری رطوبت بر انرژی شکست دانه را انکار می کنند.

انرژی مصرفی برای شکست دانه، تحت تاثیر دو فاکتور نیرو و مقدار تغییر شکل دانه در حین بارگذاری است. برای دانه های خشک، نیروی شکست دانه بزرگ ولی مقدار تغییر شکل آن تا لحظه شکست کوچک است. در صورتیکه دانه های مرطوب، دارای نیروی شکست کوچک ولی در مقابل مقدار تغییر شکل بزرگی هستند. بنابراین تاثیر دو عامل نیرو و تغییر شکل دانه بگونه ای است که با افزایش رطوبت دانه، سطح زیر منحنی نیرو تغییر طول دانه (انرژی مصرفی برای شکست دانه) افزایش می یافت. زورب و هال (۱۹۶۰) نیز همین نظر را در مورد شکست دانه ذرت گزارش کرده اند.

صورتیکه در رطوبت ۱۲٪، جهت بارگذاری تاثیر معنی داری بر انرژی شکست دانه نخود نشان داد. در این سطح رطوبت، انرژی مصرفی در بارگذاری از پهلوی باندازه ۱۵/۹٪ بیشتر از آن در بارگذاری از رو تعیین شد. تحقیقات قبلی نیز تاثیر جهت بارگذاری بر انرژی شکست دانه بعضی محصولات دیگر را گزارش کرده‌اند (۷، ۱۶).

جدول ۳ - مقایسه میانگین های نیرو و انرژی شکست دانه نخود حاصل از اثر متقابل رطوبت و جهت بارگذاری با استفاده از

آزمون دانکن.

نیروی شکست دانه (نیوتن)		انرژی مصرفی برای شکست دانه (میلی ژول)	
جهت بارگذاری			
پهلوی	رو	پهلوی	رو
درصد رطوبت دانه			
۳۳۷ a	۲۸۱ b	۶۱/۹ d	۵۶/۲ d
۲۶۴ c	۲۱۳ d	۱۰۲/۵ b	۸۸/۵ c
۱۵۱ e	۱۳۴ f	۱۶۶ a	۱۵۹ a

برای هر صفت، اعداد موجود در هر ردیف یا ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، اختلاف معنی داری در سطح ۱٪ ندارند.

تاثیر اندازه دانه. از شکل ۵ پیداست که تاثیر قطر دانه بر نیروی شکست بطور معنی داری افزایشده بود. نیروی شکست دانه‌های با قطر ۸/۲ میلی‌متر، بطور متوسط ۱/۵ برابر بیشتر از آن برای دانه‌های ریز بود (جدول ۲). از همین جدول پیداست که با افزایش قطر دانه، بیشترین تغییرات نیروی شکست، برای دانه‌های با رطوبت ۷٪ مشاهده شد. پائولسن (۱۹۷۸) نیز تاثیر معنی دار اندازه دانه بر نیروی شکست را گزارش کرده است. البته او معتقد است که با افزایش قطر دانه، نیروی شکست دانه کاهش می‌یافت.

افزایش نیروی شکست با افزایش قطر دانه ممکن است ناشی از افزایش سطح تماس بذر با صفحات فشارنده باشد که سبب کاهش تنش داخل دانه می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش قطر دانه، نیروی بیشتری برای شکست دانه نیاز باشد. این نظر را می‌توان از طریق تئوری هرتز نیز اثبات کرد. طبق این تئوری اگر دانه‌ای در بین دو صفحه موازی تحت نیروی

تاثیر جهت بارگذاری. طبق نتایج آنالیز واریانس داده‌ها، تاثیر جهت بارگذاری بر نیروی شکست دانه نخود در سطح ۱٪ معنی دار بود. از جدول ۳ پیداست که کمترین اختلاف بین نیروی شکست در دو جهت بارگذاری، در رطوبت ۱۶٪ مشاهده شد. در این سطح رطوبت میانگین نیروی شکست دانه در بارگذاری از پهلوی با میانگین ۱۵۰/۷ نیوتن تفاوت معنی داری ($P=0/01$) با آن در بارگذاری از رو نشان نداد. البته اختلاف آنها در سطح ۵٪ معنی دار بود. بیشترین اختلاف نیز در رطوبت ۱۲٪ مشاهده شد بنحویکه نیروی شکست دانه در بارگذاری از رو معادل ۰/۸۱ آن در بارگذاری از پهلوی بود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که نیروی شکست دانه نخود در بارگذاری از پهلوی با میانگین ۲۵۰ N، بطور متوسط ۱/۲ برابر بیشتر از آن در بارگذاری از رو با میانگین ۲۰۹ نیوتن تعیین شد (جدول ۳).

تاثیر معنی دار جهت بارگذاری بر نیروی شکست را سایر محققین نیز گزارش کرده‌اند (۶، ۱۴). بیلانسکی (۱۹۶۶) گزارش کرد که برای دانه ذرت، نیروی شکست در بارگذاری از رو بطور متوسط ۲/۵ برابر بیشتر از آن در بارگذاری از پهلوی بوده است. برای دانه سویا نیز نیروی شکست در بارگذاری از رو نسبت به بارگذاری در جهت طولی ۱/۲ برابری بود. لیو و همکاران (۱۹۹۰) نیز نیروی شکست دانه سویا در رطوبت ۱۰٪ و در بارگذاری از رو را معادل ۰/۳۲ نیرو در بارگذاری از پهلوی گزارش کردند.

کمتر بودن نیروی شکست دانه نخود در بارگذاری از رو ممکن است بدلیل تمایل بیشتر دانه نخود به لپه شدن در این وضعیت باشد. ضمناً فرورفتگی زیر بذر و برجستگی کوچک روی آن سبب کاهش سطح تماس بذر با صفحات فشارنده و افزایش تنش در دانه می‌گردد (شکل ۱). بنابراین انتظار می‌رود که در چنین شرایطی، شکست دانه تحت اثر نیروی کوچکتری اتفاق بیافتد.

انرژی مصرفی برای شکستن دانه نخود نیز بطور معنی داری تحت تاثیر جهت بارگذاری بود. مطابق جدول ۳، برای دانه‌های با رطوبت ۷٪ و ۱۶٪، اختلاف بین انرژی لازم برای شکست دانه در دو جهت بارگذاری معنی دار نبود. در این سطوح رطوبت، میانگین انرژی مصرفی برای شکست دانه در بارگذاری از پهلوی به ترتیب باندازه ۴٪ و ۱۰٪ بیشتر از آن در بارگذاری از رو بود. در

ماشینهای حمل و نقل، برداشت و فرآوری بمنظور حداقل کردن تلفات یا افزایش بازدهی ماشین مفید خواهند بود.

$$F_s = -195/90 + 70/508D + 29/90M - 1/52M^2 - 2/17MD$$

(۳) بارگذاری از پهلو
 $R^2 = 0/98$

$$F_u = -241/67 + 77/72D + 21/518M - 0/68M^2 - 3/067MD$$

(۴) بارگذاری از رو
 $R^2 = 0/99$

که در این روابط:

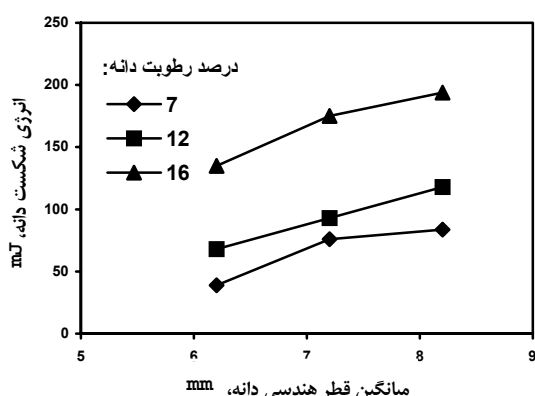
F_s و F_u = به ترتیب نیروی شکست دانه در بارگذاری از

پهلو و رو، نیوتن

D = میانگین قطر هندسی دانه، میلیمتر

M = درصد رطوبت دانه، بر مبنای تر

طبق نتایج آنالیز واریانس داده‌ها و با بررسی نمودارهای شکل ۶ پیداست که تاثیر اندازه دانه بر انرژی مصرفی نیز بطور معنی‌داری افزایش یافته بود. از جدول ۲ پیداست که در کلیه سطوح رطوبت، با افزایش قطر دانه، انرژی مصرفی برای شکست دانه نیز افزایش می‌یافت. انرژی شکست دانه‌های با قطر ۸/۲ میلیمتر بطور متوسط ۵۰٪ بیشتر از آن برای دانه‌های ریز بود (جدول ۱). پاتولسن (۱۹۷۸) نیز تاثیر اندازه دانه بر انرژی شکست را تأیید می‌کند. البته او معتقد است که با افزایش اندازه دانه، انرژی مصرفی برای شکست دانه کاهش می‌یافت.



شکل ۶ - تاثیر قطر دانه بر انرژی مصرفی برای شکست دانه نخود آبی جم در بارگذاری از رو.

برای دانه نخود چون نیروی شکست و مقدار تغییر شکل دانه‌های بزرگ (در حین بارگذاری) نسبت به دانه‌های کوچک بیشتر بود، بنابراین تاثیر این دو بر هم سبب شد که با افزایش

فشاری قرار گیرد، نیروی شکست از رابطه زیر بدست می‌آید (۱۰، ۱۷):

$$P = \frac{E\delta^3}{0.338K^{3/2}(1-\mu^2)(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'})^{1/2}}$$

(۲)

که در آن:

P - نیروی شکست دانه، نیوتن

E - مدول الاستیسیته دانه، پاسکال

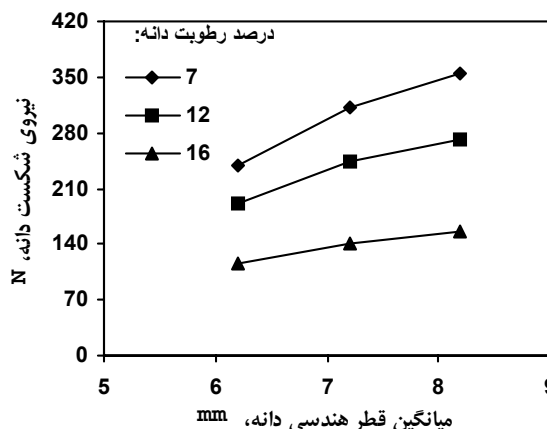
δ - تغییر شکل دانه در زیر بار، متر

K = ثابت بی بعد

R و R' - بزرگترین و کوچکترین شعاع انحنا دانه، متر

η - ضریب پواسون دانه

با فرض ثابت بودن مدول الاستیسیته و ضریب پواسون دانه، چون با افزایش قطر دانه مقادیر δ ، R و R' افزایش می‌یابند، بنابراین صورت کسر بزرگ و مخرج آن کوچک می‌شود که در نهایت سبب افزایش مقدار P ، یعنی نیروی شکست دانه می‌شود.



شکل ۵ - تاثیر قطر دانه بر نیروی شکست دانه نخود آبی جم در بارگذاری از رو.

روابط ۲ و ۳، مدل‌های ریاضی رابطه بین دو عامل رطوبت و قطر دانه نخود با نیروی شکست به ترتیب برای بارگذاری از پهلو و از رو را نشان می‌دهند. از این مدل‌ها می‌توان برای پیش بینی، برآورد و کنترل داده‌ها استفاده کرد (۳). ضمناً استفاده از این مدل‌ها برای مدیریت استفاده و تنظیم صحیح ادوات و

۱۶٪ به حداقل مقدار می‌رسید که در سطح ۵٪ معنی دار نبود. در صورتیکه در سطوح رطوبت ۷ و ۱۲٪، اختلاف بین سه رقم در سطح ۱٪ معنی دار بود. در بین دو رقم دیم مورد مطالعه، میانگین نیروی شکست دانه‌های رقم بیونیژ باندازه ۸٪ بیشتر از رقم کاکا بود. البته در رطوبت ۱۶٪ و در هر دو جهت بارگذاری، اختلاف معنی‌داری بین سه رقم مشاهده نشد. ضمناً از همین جدول پیداست که برای دانه‌های با قطر ۶/۲ و ۸/۲ میلی‌متر، تفاوت معنی‌داری بین نیروی شکست دو رقم جم و بیونیژ ملاحظه نشد. ضمناً برای دانه‌های با قطر ۶/۲ میلی‌متر اختلاف بین دو رقم دیم کاکا و بیونیژ معنی دار نشد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که میانگین نیروی شکست دانه‌های نخود رقم جم با بیشترین مقدار، بطور متوسط ۱۴٪ بیشتر از آن برای رقم کاکا با کمترین مقدار بود. بنابراین طبق نظریه پائولسن (۱۹۷۸) که معتقد است افزایش نیروی شکست دانه متناسب با کاهش درصد دانه‌های شکسته در مراحل حمل و نقل و انبارداری است، پیش بینی می‌شود که ارقام جم و کاکا به ترتیب مقاوم‌ترین و حساس‌ترین ارقام در مقابل شکست در طی عملیات حمل و نقل و انبارداری باشند.

دلیل تفاوت بین ارقام مختلف ممکن است ناشی از تفاوت شرایط آب و هوای منطقه، نوع خاک، درصد مواد معدنی و آلی خاک و سایر فاکتورهای متغیر و مخصوصاً دیم یا آبی بودن آنها باشد. یکی از فاکتورهایی که نیروی شکست دانه ارقام مختلف را تحت تاثیر قرار می‌دهد، وزن مخصوص دانه است. چانگ (۱۹۸۸) معتقد است که وزن مخصوص دانه، نیروی شکست و آسیاب شدن آنها تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این ارتباط گزارش کارهای خزائی (۱۳۸۲)، نشان دهنده اختلاف معنی‌دار بین جرم مخصوص حقیقی دانه‌های دو رقم جم و بیونیژ است ($p=0.05$). او نتیجه گرفت که جرم مخصوص حقیقی دانه‌های رقم جم با میانگین ۱۲۸۷ کیلوگرم بر متر مکعب، بیشتر از آن برای رقم بیونیژ با میانگین ۱۲۷۳ کیلوگرم بر متر مکعب بود. بنابراین تطبیق نتایج او، با آنچه که در این تحقیق بدست آمده است، تأییدی است بر نظر چانگ (۱۹۸۸) در خصوص رابطه بین چگالی و نیروی شکست دانه نخود.

نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر رقم بر انرژی مصرفی برای شکست دانه در سطح ۱٪ معنی دار بود. همانند

قطر دانه، انرژی شکست نیز بطور معنی‌داری افزایش یابد. بنابراین انتظار می‌رود که بدلیل ظرفیت بالاتر جذب انرژی دانه‌های درشت نسبت به دانه‌های ریز، مقاومت به شکست دانه‌های درشت در بارگذاری دینامیک بیشتر از دانه‌های ریز باشد. البته خزائی (۱۳۸۲) و خزائی و همکاران (۱۳۸۲) معتقدند که اگرچه ظرفیت جذب انرژی دانه‌های درشت بطور متوسط ۵۰٪ بیشتر از آن برای دانه‌های ریز است، ولی نتایج آزمون تعیین مقاومت به شکست دانه‌های نخود در بارگذاری دینامیک نشان داد که درصد شکست دانه‌های درشت بیشتر از آن برای دانه‌های ریز بود. آنها افزایش درصد دانه‌های شکسته با افزایش قطر دانه را بدلیل جرم بیشتر دانه‌های بزرگ نسبت به دانه‌های کوچک می‌دانند. آنها معتقدند که بیشتر بودن وزن دانه‌های بزرگ نسبت به دانه‌های کوچک که گاهی به ۲ تا ۲/۵ برابر می‌رسد سبب می‌شود که در یک دور معین کوبنده، اختلاف بین انرژی جنبشی دانه‌های بزرگ و کوچک به ۲ تا ۲/۵ برابر برسد. بنابراین با وجود ظرفیت جذب انرژی بالاتر دانه‌های درشت (که ۱/۵ برابر بیشتر از آن برای دانه‌های ریز است)، جرم بیشتر آنها این خصوصیت را تحت تأثیر قرار داده و سبب می‌شود که انرژی جنبشی دانه‌ها سریعاً افزایش یافته و به حد مورد نیاز برای شکست دانه برسد.

روابط ۵ و ۶، مدل‌های ریاضی رابطه بین دو عامل رطوبت و قطر دانه با انرژی لازم برای شکست دانه نخود به ترتیب برای بارگذاری از پهلوی و از رو را نشان می‌دهند.

$$E_s = 164/874 - 11/241D - 31/526M + 0/909M^2 + 3/078MD \quad (5) \text{ بار گذاری از پهلو}$$

$$R^2 = 0/99$$

$$E_u = -8/210 + 17/410D - 21/513M + 1/263M^2 + 0/552MD \quad (6) \text{ بار گذاری از رو}$$

$$R^2 = 0/99$$

که در این روابط:

E_s و E_u = به ترتیب انرژی لازم برای شکست دانه در

بارگذاری از پهلوی و رو، میلی ژول

D = میانگین هندسی قطر دانه، میلی‌متر

M = درصد رطوبت دانه، بر مبنای تر

تاثیر رقم نخود. نتایج آنالیز واریانس داده نشان داد که تاثیر

رقم بر نیروی شکست در سطح ۱٪ معنی دار بود. از جدول ۴ پیداست، اختلاف بین نیروی شکست ارقام مختلف در رطوبت

نیروی شکست، انرژی مصرفی برای شکست دانه‌های ارقام جم، بیونیژ و کاکا به ترتیب معادل ۱۱۳/۶، ۱۰۴/۹ و ۹۹/۲ میلی ژول بدست آمده که اختلاف بین هر سه رقم در سطح ۱٪ معنی دار بود.

جدول ۴- مقایسه میانگین های نیروی شکست دانه نخود (نیوتن) حاصل از اثر متقابل رقم با دو متغیر رطوبت و قطر دانه نخود با استفاده از آزمون دانکن.

درصد رطوبت دانه، (بر مبنای تر)			
رقم نخود	۷	۱۲	۱۶
بیونیژ	۳۱۳ b	۲۳۹ e	۱۴۵ g
کاکا	۲۸۵ c	۲۱۸ f	۱۳۶ g
جم	۳۲۹ a	۲۵۹ d	۱۴۷ g
میانگین قطر هندسی دانه نخود، (میلیمتر)			
	۶/۲	۷/۲	۸/۲
بیونیژ	۱۸۶ ef	۲۳۲ c	۲۷۹ a
کاکا	۱۷۷ f	۲۱۱ d	۲۵۲ b
جم	۱۹۳ e	۲۵۴ b	۲۸۷ a

برای هر یک از اثرات متقابل، اعداد موجود در هر ردیف یا ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، اختلاف معنی داری در سطح ۱٪ ندارند.

پیش‌بینی سرعت ضربه‌ای که می‌تواند سبب شکست دانه نخود در بارگذاری دینامیک شود

نتایج محاسبه سرعت ضربه بحرانی برای دانه نخود بر اساس انرژی شکست در بارگذاری شبه استاتیک در جدول ۵ ارائه شده است. چون در محاسبه این سرعت‌ها میانگین جرم و انرژی شکست دانه‌ها استفاده شده است. بنابراین طبق نظر کیرک و مک لئود (۱۹۷۸)، اگر دانه‌ها تحت ضربه‌ای با سرعت محاسبه شده قرار گیرند، انتظار می‌رود که حداقل ۵۰٪ آنها شکسته شود. این بدین معناست که در هر سرعتی، انرژی جذب شده توسط دانه معادل میانگین ظرفیت جذب انرژی آن خواهد بود.

جدول ۵ - مقادیر سرعت های ضربه بحرانی، محاسبه شده بر اساس انرژی مصرفی در بارگذاری شبه استاتیک.

رطوبت دانه (%)	جرم دانه (گرم)	انرژی شکست دانه در حالت شبه استاتیک (میلی ژول)	سرعت بحرانی (متر بر ثانیه)
۷	۰/۲۵	۵۹	۲۱/۷
۱۲	۰/۲۴	۹۵/۵	۲۸/۲
۱۶	۰/۲۲	۱۶۳/۳	۳۸/۵

از جدول ۵ پیداست که با افزایش رطوبت دانه از ۷٪ به ۱۶٪، پیش‌بینی می‌شود که سرعت ضربه لازم برای شکست دانه، از ۲۱/۷ به ۳۸/۵ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. این بدین معناست که با افزایش درصد رطوبت دانه‌های نخود، مقاومت به شکست آنها تحت اثر نیروهای دینامیک افزایش می‌یابد. نتایج آزمون بارگذاری دینامیک دانه‌های نخود، این پیشگویی را تأیید می‌کنند (۱، ۲). بارتچ و همکاران (۱۹۸۶)، کلر و همکاران (۱۹۷۲) و هوکی و پی‌کت (۱۹۷۳) نیز تاثیر معنی دار و کاهنده رطوبت دانه بر درصد دانه‌های شکسته را برای سایر محصولات گزارش کرده‌اند. این موضوع از نظر برداشت ماشینی حائز اهمیت است. چون انتظار می‌رود که در صورت برداشت زود هنگام محصول، درصد دانه‌های شکسته ناشی از ضربه کوبنده بطور معنی داری کاهش یابد (۱، ۲).

خزائی (۱۳۸۲) و خزائی و همکاران (۱۳۸۲) با انجام آزمون بارگذاری دینامیک بر روی دانه‌های نخود، مدل ریاضی مناسب برای تحلیل رابطه بین درصد دانه‌های شکسته با دو فاکتور سرعت خطی کوبنده و رطوبت غلاف را بصورت زیر تدوین کردند:

(۷)

$$D_g = 14.70 - 2.029V + 234875 \frac{V^{1.4}}{80m} - 6486 \frac{V}{100m} \quad r = 0.98$$

که در آن:

D_g - درصد دانه های شکسته

V - سرعت خطی کوبنده، متر بر ثانیه

M - درصد رطوبت غلاف، بر مبنای تر

طبق این رابطه، پیش‌بینی می‌شود که برای دانه‌های با رطوبت ۷٪ و در سرعت ۲۱/۷ m/s حدود ۸۱/۳٪، برای دانه‌های با رطوبت ۱۲٪ و در سرعت ۲۸/۲ m/s حدود ۶۷/۴٪ و برای دانه‌های با رطوبت ۱۶٪ و در سرعت ۳۸/۵ m/s حدود ۶۸/۳٪ از دانه‌ها شکسته شوند. این نتیجه‌گیری با آنچه که در جدول ۵ دیده می‌شود منطبق است. چرا که طبق این جدول، پیش‌بینی می‌شود که اگر دانه‌های با رطوبت ۷٪، ۱۲٪ و ۱۶٪ به ترتیب تحت اثر ضربه‌ای با سرعت‌های ۲۱/۷، ۲۸/۲ و ۳۸/۵ متر بر ثانیه قرار گیرند، حداقل ۵۰٪ از آنها شکسته شوند. بنابراین پیداست که مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از تحقیقات خزائی (۱۳۸۲) و خزائی و همکاران (۱۳۸۲) تأییدی است بر نظر کیرک و مک لئود (۱۹۷۸) که انرژی مصرفی برای

دینامیک بر روی پنبه دانه دریافتند که درصد دانه‌های شکسته در آزمون دینامیک با آنچه که بر اساس انرژی شکست دانه در بارگذاری استاتیک پیش بینی شده بود، مطابقت داشته است.

شکست دانه در حالت استاتیک (یا شبه استاتیک) معیار مناسبی برای تخمین مقاومت به شکست دانه در بارگذاری دینامیک است. کیرک و مک لئود (۱۹۷۸) نیز با انجام آزمون بارگذاری

REFERENCES

مراجع مورد استفاده

۱. خزائی، ج. ۱۳۸۲. تعیین نیروی چیدن غلاف نخود و مقاومت مکانیکی آن به کوبیدن. رساله دوره دکترا، گروه ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
۲. خزائی، ج. م. بهروزی لار، ع. رجبی پور و س. محتسبی. ۱۳۸۲. اثر سرعت کوبنده، رطوبت و اندازه غلاف نخود بر درصد جدا سازی دانه و درصد دانه‌های شکسته در یک کوبنده انگشتی دار. مجله علوم کشاورزی ایران. جلد ۳۴ (۴): ۸۳۶-۸۲۵.
۳. رضائی، ع. و ا. سلطانی. ۱۳۷۷. مقدمه ای بر تحلیل رگرسیون کاربردی. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان. ۲۹۴ صفحه.
4. ASAE. 1995. ASAE Standard S368. Compression test of food materials of convex shape.
5. ASAE. 1999. ASAE Standard S352. Moisture measurement- unground grain and seeds
6. Bilanski, W. K. 1966. Damage resistance of seed grains. Trans. of the. ASAE . 19(2): 360 – 363.
7. Chandrasekar, V. and R. Viswanathan. 1999. Physical and thermal properties of coffee. J. Agric. Engng Res. 73:227-234.
8. Chang, C. S. 1988. Measuring density and porosity of grain kernels using a gas pycnometer. Cereal Chem. 65:13-15.
9. Fiscus, D. E., G. H. Foster, & H. H. Kaufmann. 1971. Physical damage of grain caused by various handling techniques. Trans. of the ASAE. 14(3):480-485.
10. Foutz, T. L., S. A. Thompson & M. D. Evans. 1993. Comparison of loading response of packed grain and individual kernels. Trans. of the ASAE. 36(2):569-576.
11. Kang, Y. S., C. K. Spillman., J. L. Steele & D. S. Chung. 1995. Mechanical properties of wheat. Trans. of the ASAE. 38(2):573-578
12. Kirk, I. W., & H. E. McLeod. 1967. Cottonseed rupture from static energy and impact velocity. Trans. of the ASAE. 10(2): 217-219.
13. Konak, M., K. Carman, & C. Aydin. 2002. Physical properties of chick pea seeds. Biosystems Engineering. 82(1):73-78.
14. Liu, M., K. Haghghi., R. L. Strohshine & E. C. Ting . 1990 . Mechanical properties of the soybean cotyledon and failure strength of soybean kernels . Trans. of the. ASAE . 33(3): 559 – 566
15. Mohsenin, N. N. 1984. Physical properties of plant and animal materials. New york : Gordon Science Publishers
16. Paulsen, M. R. 1978. Fracture resistance of soybeans to compressive loading. Trans. of the ASAE. 21(6): 1210-1216.
17. Praveen, C. B. & J. Irudayaraj. 1995. Mechanical strength and rheological behaviour of barley kernels. Int. J. Food Science and Technology. 30:609-623.
18. Waananen., K. M. & M. R. Okos. 1988. Failure properties of yellow – dent corn kernel. Trans. of the. ASAE. 31(5) :1816-1827.
19. Wouters, A. & J. D. Baerdemaeker. 1988. Effect of moisture content on mechanical properties rice kernels under quasi-static compressive loading. J. Food Engineering. 7:83-111.
20. Zoerb, G. C. & C. W. Hall. 1960. Some mechanical and rheological properties of grains. J. Agr. Engng Res. 5(1):83-93.

Required Force and Energy For Chickpea Grain Fracture under Compressive Quasi-Static Loading

**J. KHAZAEI¹, A. RAJABI POUR², S. MOHTASEBI³
AND M. BEHROOZI-LAR⁴**

1, Assistant Professor, Aboureyhan Higher Education Complex, University of Tehran

2, 3, 4, Assistant Professors and Professor, Faculty of Agriculture,

University of Tehran

Accepted Dec. 24, 2003

SUMMARY

In this research, the effect of moisture content, (7, 12 and 16% w.b.) grain size (small, medium and large), loading direction (sideward and topward) on fracture force and energy requirement in three varieties of Iranian chickpea (Bivanij, Kaka, and Jam) under quasi-static loading were studied. The mean values of fracture force and energy required were 230 N and 105.7 mJ, and the variation ranges were equal to 47-522 N and 20.8-275 mJ, respectively. Moisture content, grain size, variety and loading direction all had a significant effect on fracture force and energy requirement. By increasing the grain moisture content, the amount of fracture force increased while fracture energy decreased significantly. Grain size had a significant increasing effect on both fracture force and energy requirement. The amount of fracture force and energy in sideward direction was significantly higher than that in the topward direction. The results indicated that Jam variety was stronger than the other two varieties, Bivanij and Kaka. Also, based on these results it is predicted that 50% of grains of 7, 12, and 16% moisture content would be fractured if undergone impacts with velocities of 21.7, 28.2, and 38.5 m/sec, respectively.

Key words: Chickpea, Force, Energy, Fracture, Physical and mechanical properties.