طراحی، ساخت و آزمایش دستگاه بارگذاری ضربه ای برای مطالعه رفتار مکانیکی محصولات کشاورزی

سعید مینایی[1]- امیر حسین افکاری سیاح[2]- محمد هادی خوش تقاضا[3]

چکیده

به منظور انجام آزمایشات بارگذاری ضربه ای بر روی محصولات کشاورزی، یک دستگاه تست ضربه طراحی و ساخته شد. این دستگاه که از نوع آونگی می باشد از یک شاسی وزین و بدون لرزش، بازوی چوبی و وزنه بارگذاری، صفحه مدرج، یک پتانسیومتر و دیتا لاگر تشکیل شده است. مشخصات فنی و ابعاد دستگاه بگونه ای است که امکان بررسی خصوصیات مکانیکی انواع محصولات کشاورزی از جمله محصولات دانه ای را طی یک بارگذاری ضربه ای در حالت دست نخورده فراهم میکند. با کمک این دستگاه، امکان اندازه گیری میزان انرژی برای تخریب دانه، انرژی کرنشی منتقل شده به دانه، ضریب بازگشت و انرژی ویژه فراهم می گردد. در آزمایشی به منظور بررسی خصوصیات فنی دستگاه، دانه های پنج رقم مختلف گندم در دو سطح رطوبتی تحت آزمون ضربه قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی اثر رطوبت بر پارامترهای بدست آمده، نشان دهنده تاثیر معنی دار رطوبت بر ضریب بازگشت و انرژی کرنشی بوده، درحالیکه با اعمال ابعاد دانه در فاکتورهای مورد نظر (تحت عنوان انرژی ویژه و انرژی مخصوص) تاثیر رطوبت بسیار کاهش می یابد. با استفاده از داده های بدست آمده، کمینه انرژی سینتیک لازم برای گسیختگی دردانه های خشک (۶/۵٪ رطوبت بر پایه تر) و مرطوب (۱۵٪ بر پایه تر) به ترتیب معادل ۳۳ و ۷۲ میلی ژول تعیین گردید. بر مبنای نتایج این آزمایش، مشخص شد که میتوان ارقام مختلف گندم را بر اساس پارامترهای مکانیکی استخراج شده، از یکدیگر متمایز نمود. همچنین مشخص شد که میزان پراکندگی داده در این نوع تست کمتر از تست فشاری است .

۱- عضو هیئت علمی گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس
۲- عضو هیئت علمی گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی
۳- عضو هیئت علمی گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

واژه های کلیدی: گندم، بارگذاری ضربه ای، ضریب بازگشت، خـواص مکـانیکی، طراحـی و ساخت ، انرژی کرنشی

مقدمه و هدف

محصولات کشاورزی در مراحل برداشت، حمل و نقل، نگهداری و فرآوری، تحت تاثیر نیروهای استاتیک و دینامیک قرار میگیرند. در بسیاری از موارد این نیروها میتوانند موجب آسیب دیدگی مکانیکی محصول گردند. این آسیب دیدگی هر چند کوچک (ایجاد ترک و شکاف در داخل یا سطح محصول) می تواند شرایط را برای فساد محصول فراهم نموده و یا آن را آماده تخریب کامل نماید. لذا آگاهی از این ویژگی ها که بنوان خواص مکانیکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی شناخته می شوند، از اهمیت زیادی برخوردار بوده و در طراحی و ساخت ماشین آلات فرآوری و نیز در بهینه سازی انواع ماشینها و تجهیزات کشاورزی بویژه در مراحل پس از برداشت و به منظور کاهش ضایعات کاربرد دارد. در بسیاری از این موارد، آسیب دیدگی، بواسطه اعمال بارهای ضربه ای رخ میدهد. یکی از راه های اصولی برای جلوگیری ازبروز صدمات در چنین حالتی، شناخت خصوصیات مقاومتی محصول تحت شرایط مختلف است.

یکی از روشهایی که از آن طریق می توان به خصوصیات مقاومتی یک ماده (در اینجا یک محصول کشاورزی) پی برد استفاده از آزمون ضربه می باشد. در این روش نیرو بصورت لحظه‌ای (کسری از ثانیه) بر جسم اعمال می گردد. از آنجاکه مواد بیولوژیک دارای ماهیتی ویسکوالاستیک می باشند، لذا پیش بینی عکس العمل این مواد نسبت به بار اعمال شده به سهولت امکان پذیر نیست. به ویژه آنکه با افزایش سرعت بارگذاری عموما ماده تحت ضربه (حتی در مواد مهندسی) خصوصیات تردی[۱] بیشتری از خود نشان می دهد. از لحاظ نظری و بر مبنای پیش بینی رفتار مواد به کمک مدل های مکانیکی، این پدیده ناشی از یک تکه شدن و به عبارتی عمل نکردن جزء ضربه گیر[۲] می باشد.

آزمایش بارگذاری ضربه ای، در شرایطی که فاکتور آهنگ بارگذاری[۳] اهمیت داشته باشد، اطلاعات مفیدی به دست می دهد. هدف عمده در اغلب آزمایشاتی که بر این اساس انجام گرفته اند، مطالعه بر روی محصولات کشاورزی از نظر ضایعات مستقیم و غیر مستقیم ناشی از پدیده ضربه و کسب اطلاعات لازم در طراحی و بهینه سازی ماشین های برداشت و فرآوری بوده است (*Mathew and*

[۱] Brittleness

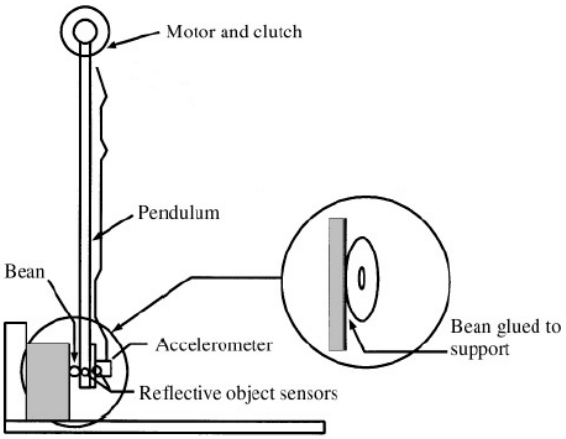
[2] Dashpot

[3] Loading rate

Hyde, 1997; Srivastava, et al., 1976; Mohsenin and Gohlich, 1962; Ajaya and Clarke, 1997). بیلانسکی (۱۹۶۴ و ۱۹۶۶)، به منظور برآورد شرایط واقعی اعمال بار در عملیات برداشت و فرآوری، پنج نوع دانه غله شامل سویا، ذرت، گندم پاییزه، جو و یولاف را تحت سه نوع آهنگ بارگذاری (فشاری تدریجی[۴]، ضربه با سرعت کم[۵] و ضربه با سرعت بالا[۶]) و سطوح مختلف رطوبتی قرار داد. برای اعمال ضربه با سرعت پایین، از یک دستگاه آونگی استفاده شد که در آن هر بار یک دانه بوسیله چسب بر روی سندان قرار می گرفت . وزن آونگ معادل ۱۹۰ گرم و ارتفاع حرکت مرکز ثقل آن بیش از ۷ سانتیمتر بود. نتایج این تحقیق نشان داد که بطور کلی، اندازه دانه، میزان رطوبت و جهت دانه بر مقاومت به آسیب دید گی غلات تاثیر می گذارند.

ژیندال و محسنین (۱۹۷۶) نیزدستگاه ضربه آونگی را طراحی و پس از ساخت مورد آزمایش قرار دادند. با کمک این دستگاه خصوصیات مقاومت به ضربه ، شامل سختی دینامیک و انرژی جذب شده برای شکست در میوه سیب و دانه ذرت مورد بررسی قرار گرفت.

در تحقیقی دیگر دستگاهی آونگی (شکل ۱) به منظور بررسی خواص دینامیکی دانه لوبیا چشم بلبلی طراحی و ساخته شد (*Allen and Watts, 1997*).



شکل۱- مکانیسم دستگاه تست ضربه در تحقیق آلن و واتز (۱۹۹۷)

در عین حال برخی مطالعات نیز با هدف مقایسه مواد ضربه گیر[۷] که در مراحل پس از برداشت بکار می روند انجام شده است (*Kennish and Henderson, 1978*). تحقیقات محدودی نیز با هدف استخراج برخی خصوصیات کیفی (به ویژه در مورد میوه و سبزی)، مانند سفتی[۸] و نیز

[4] Gradually applied load

[5] Low velocity impact

[6] High velocity impact

[7] Cushioning materials

[8] Firmness

مطالعاتی به منظور کسب اطلاعات اولیه در تدوین آزمایشات غیر مخرب بر مبنای بارگذاری ضربه ای[9] و استخراج پارامترهایی همچون سرعت موج[10] انجام پذیرفته است (*Bajema, et al., 1998*).

درحالیکه کشور ما یکی از بزرگترین تولید کنندگان محصولات کشاورزی و به ویژه انواع غله در منطقه بوده و درعین حال با مقادیر قابل ملاحظه ای از ضایعات در مرحله تولید روبروست اما تاکنون تحقیقات بسیار محدودی در زمینه مبانی ضایعات مکانیکی در داخل کشور انجام شده است. در این رابطه نگارندگان هیچ گونه سابقه ای از بررسی خواص دینامیکی محصولات کشاورزی و به ویژه غلات در کشور نیافتند. بر این مبنا، هدف از این مطالعه عبارت است از طراحی و ساخت دستگاهی به منظور اندازه گیری برخی پارامترهای مکانیکی دانه گندم تحت بارگذاری ضربه ای و بررسی تاثیر رطوبت بر این خواص.

مواد و روش ها

مبانی استخراج برخی پارامترهای مکانیکی با کمک تست ضربه

در این رابطه می توان با اعمال ضربه از طریق یک جسم صلب با جرم معین بر دانه کامل[11] با کمک معادله تعادل انرژی (رابطه ۱)، پارامترهای مختلفی را از یک تست ضربه استخراج نمود.

$$W_i = W_R + W_p + W_L \qquad (۱)$$

در معادله فوق، W_i انرژی ضربه (یا همان انرژی سینتیک معادل $½\ mV^2$) است که با لحاظ اینکه مقداری از این انرژی در طی وقوع ضربه هدر می رود (مثلا به صورت ایجاد ارتعاش یا حرارت)، W_L ، می توان پذیرفت که بخشی از آن به انرژی کرنشی تبدیل گردد، W_p ، که در مواد نرم دلالت بر ایجاد تغییر شکل دائم و در مواد ترد حکایت از ایجاد یا گسترش ترک در جسم دارد. همچنین در معادله (۱)، W_R انرژی جهش[12] یا بازگشت می باشد که تا حدی می تواند مبین خصوصیات کشسانی ماده باشد. به سادگی مشخص میگردد که با اندازه گیری مقادیر انرژی کل و انرژی جهش، و تخمین انرژی تلف شده میتوان انرژی کرنشی را محاسبه نمود. برای رسیدن به یک مبنای نظری جهت استخراج پارامترهای دیگری که بتوانند معرف خصوصیات الاستوپلاستیک محصول باشند، می توان از فرض الاستیک بودن دانه گندم با دقت قابل قبولی استفاده نمود (*Sitkei, 1986*). در بدو امر، مقدار W_p به عنوان میزان انرژی کرنشی، که از رابطه ۲ قابل محاسبه است، نخستین پارامتر مکانیکی قابل دست یابی خواهد بود (شکل ۲).

---

[9] Impulse loading

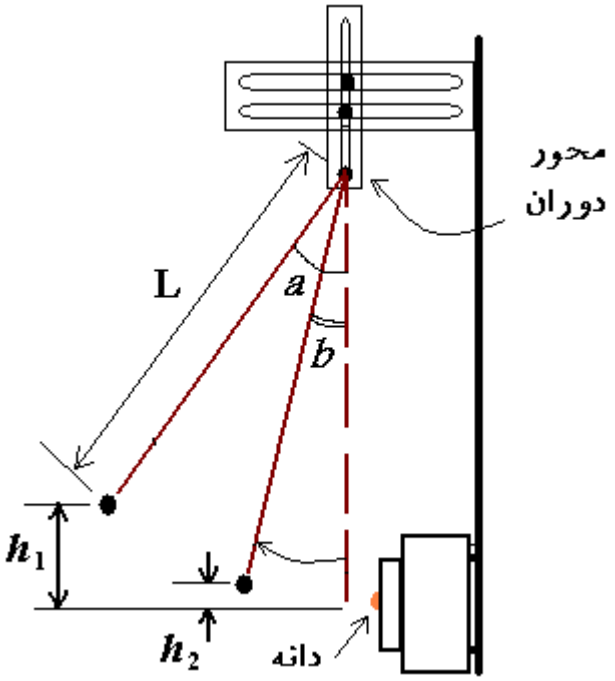
[10] Wave speed

[11] Whole kernel

[12] Rebound energy

$$W_p = mg\,(h_1 - h_2) - W_L \qquad (۲)$$

که در آن m جرم وزنه، g شتاب ثقل و h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع سقوط و جهش وزنه و W_L انرژی تلف شده می باشند.



شکل ۲-مکانیسم یک سیستم تست ضربه آونگی و پارامترهای قابل اندازه گیری در آن

پارامتر دیگری که می تواند به عنوان معیاری از مقاومت بافت محصول اندازه گیری شده و مورد بررسی قرار گیرد، پارامتر ضریب بازگشت[۱۳] می باشد. این ضریب که یکی از مهمترین مشخصه های مکانیکی جسم تحت ضربه می باشد (*Bajema, et al., 1998*)، بیان کننده میزان پلاستیک بودن برخورد است و معمولا بر اساس نسبت سرعت نسبی نهایی به سرعت نسبی اولیه اجسام برخورد کننده در جهت عمود بر سطح تماس تعریف می شود. (شاکری و درویزه، ۱۳۷۶) (رابطه ۳).

$$e = (V2 - V1)/(U2 - U1) \qquad (۳)$$

در رابطه ۳، U سرعت پیش از برخورد و V سرعت پس از برخورد می باشد و اندیس های ۱ و ۲ دلالت بر برخورد دو جسم دارند. طبیعتا اگر یکی از اجسام ثابت باشد، مقدار این ضریب به شکل

[13] Coefficient of restitution

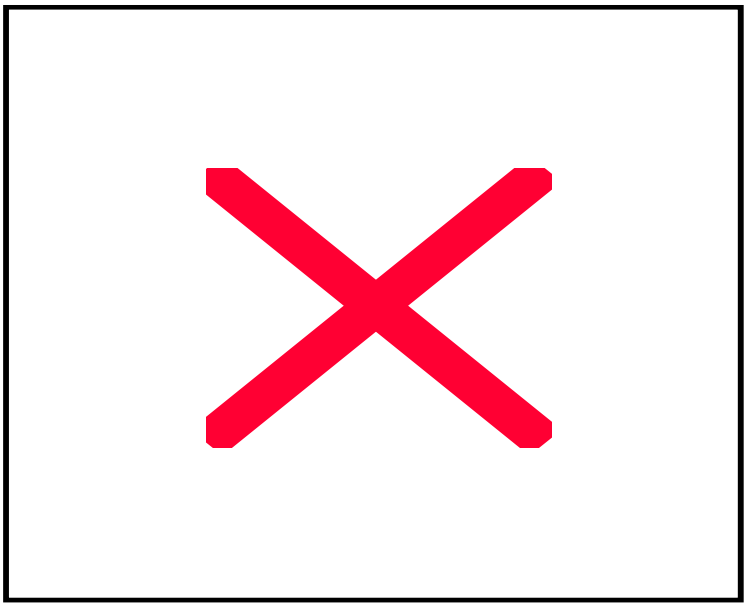
$e = -V1/U1$ خواهد بود. درصورتیکه بخواهیم ضریب بازگشت را از طریق یک آزمون ضربه تعیین کنیم، می توان از رابطه ۴ (با صرفه نظر از علامت منفی) استفاده نمود (*Mohsenin, 1978*).

$$e = \sin(\beta/2)/\sin(\alpha/2) \qquad (۴)$$

در اینجا α و β به ترتیب زاویه اولیه و زاویه پس از جهش آونگ می باشند. مقدار **e** برای اجسام مطلقا الاستیک برابر با واحد بوده و برای اجسام غیر الاستیک کوچک تر از یک می باشد (*Bueche and Hecht, 1997*).

طراحی و ساخت دستگاه آزمون ضربه

به منظور ایجاد امکان اندازه گیری پارامترهای مکانیکی که در بخش پیشین بدانها اشاره شد، دستگاه بارگذاری ضربه ای از نوع آونگی طراحی و ساخته شد(شکل ۳). نکاتی که در طراحی دستگاه بارگذاری ضربه ای مد نظر قرار گرفت اساسا تحت تاثیر فاکتورهای مورد بررسی و نوع آزمایش (به عنوان یک آزمایش عینی) بود.



شکل ۳- دستگاه تست ضربه و امکان اندازه گیری زوایای برخورد و جهش آونگ

در واقع آنچه در طراحی دستگاه اهمیت داشت، این بود که بتوان تا حد امکان مقدار دقیق و قابل اندازه گیری از انرژی را به شکل ضربه ای بر دانه اعمال نموده و در عین حال بتوان میزان جهش آونگ را نیز اندازه گیری نمود. همچنین به عنوان یک آزمایش عینی باید کلیه شرایط در هنگام آزمایش ثابت باقی بماند. لذا فرض می شود که با توجه به نوع روش اعمال ضربه و عدم وجود موانع

اصطکاکی، فاکتور مهم آهنگ بارگذاری در طول آزمایش و نیز در آزمایش های مکرر بدون تغییر خواهد ماند. همچنین نکته بسیار مهم دیگر کمینه نمودن ارتعاش دستگاه پس از اعمال ضربه می باشد. بر این اساس، برای انجام تست ضربه و اندازه گیری فاکتورهای ذکر شده، دستگاه اندازه گیری مورد نظر دارای خصوصیاتی به شرح زیر است (شکل های ۳ و ۴):

۱– قابلیت ایجاد ضربه در محدوده گسترده ای از انرژی ضربه ای از طریق تغییر اندازه وزنه و ارتفاع سقوط آونگ

۲- عدم لرزش بدنه به علت جرم زیاد آن و نیز داشتن قابلیت نصب بر روی دیوار

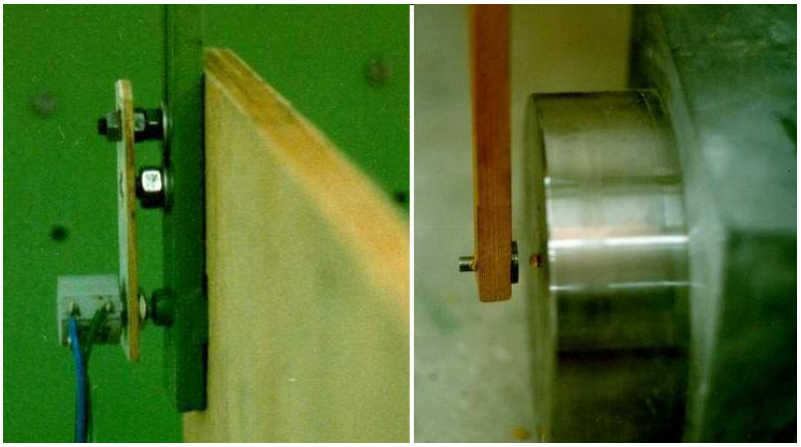
۳- قابلیت آزمایش انواع دانه، میوه و سبزی به دلیل داشتن سطح وسیع تکیه گاهی

۴- قابلیت اندازه گیری جهش آونگ پس از برخورد

۵- استفاده از نوعی پتانسیومتر با اصطکاک بسیار کم روی محور دوران، برای اندازه گیری زوایا بطور دیجیتال

برای افزایش دقت اندازه گیری میزان جهش، سامانه آونگی برنوع سقوطی ترجیح داده شد. شکل ۲ نمایی از مکانیسم دستگاه تست ضربه را نشان میدهد که قطعات اصلی در آن نامگذاری شده اند. سطح تکیه گاهی از یک استوانه فولادی تشکیل شده است که در داخل یک بلوک آهنی جایگذاری شده است. وزنه (۱۰ تا ۲۰۰ گرمی) که بصورت آونگ به یک رابط چوبی متصل شده، در امتداد مرکز استوانه فولادی به یک یاتاقان ساچمه ای در ارتفاع ۱/۴ متری متصل میگردد. موقعیت نقطه اتصال رابط به یاتاقان در هر سه جهت عمودی و افقی (در جهت ضربه و عمود بر آن) قابل تنظیم می باشد.

محور دورانی آونگ از اصطکاک اندکی برخوردار بوده و به نوعی طراحی شده است که امکان نصب هر نوع حسگر دورانی در سمت دیگر آن وجود دارد. در بخش بالایی دستگاه از مقیاسی به شکل ربع دایره به عنوان شاخص اندازه گیری زاویه آونگ استفاده میگردد. همچنین اندازه گیری میزان جهش وزنه از طریق یک سیستم دیجیتال و از طریق پتانسیومتر انجام می پذیرد(شکل ۴).



شکل ۴-راست-نحوه قرارگیری دانه بر روی استوانه فولادی با کمک اندکی چسب چپ- استفاده از پتانسیومتر روی محور دوران برای اندازه گیری جهش آونگ

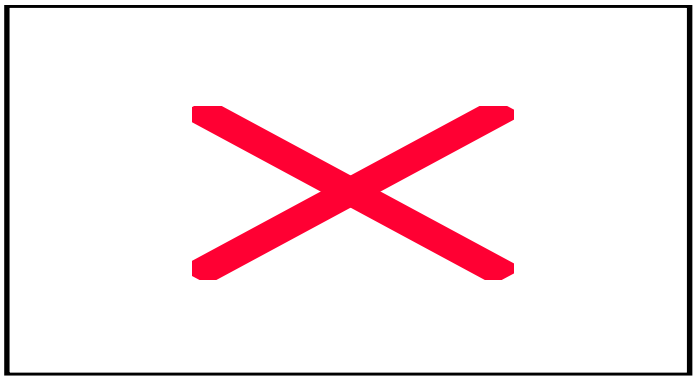
فرض میکنیم که وزنه آونگ از ارتفاعی معادل ($h_1 = L - L.cos\ \theta_1$) سقوط میکند که در آن L طول رابط آونگ از محل دوران تا گرانیگاه بوده و θ_1 زاویه رها سازی آونگ می باشد (شکل ۲). پس از برخورد وزنه به بلوک، آونگ تا ارتفاعی معادل ($h_2 = L - L.cos\ \theta_2$) بازگشت میکند که در آن $\theta 2$ معادل زاویه بازگشت آونگ است. از آنجاکه $(mgh_1)_{top} = (½mV^2)_{bottom}$ میباشد، لذا سرعت وزنه در زمان برخورد به بلوک در پایین ترین نقطه نوسان، معادل ($\sqrt{2gh}$) مقداری معلوم خواهد بود.

برای اندازه گیری میزان انرژی کل و انرژی حاصل از جهش، لازم بود که موقعیت گرانیگاه آونگ به عنوان یک جسم مرکب تعیین گردد. برای اینکار از دو روش توزین[۱۴] و روش تعلیق[۱۵] استفاده شد (*Martin, 1982*). بدین منظور، مطابق شکل ۶ مجموعه وزنه و رابط چوبی از دو سمت بر روی دو ترازوی دقیق قرار گرفت. مقادیر خوانده شده در دو سمت به عنوان نیروی عکس العمل دو سمت آونگ در نظر گرفته شده و سپس با گرفتن گشتاور نسبت به یکی از نقاط تکیه گاهی و با اطلاع از فاصله دو تکیه گاه، موقعیت طولی گرانیگاه به صورت زیر اندازه گیری شد (شکل ۵):

$$\Sigma M_A = ۰$$

$$l_{AG} . (۱/۲۳\ N) = (۱۱۱\ cm).(۰/۶۸\ N)$$

$$l_{AG} = ۶۱/۳\ cm$$



شکل ۵ – نحوه تعیین گرانیگاه آونگ به روش توزین

همچنین برای تعیین موقعیت عرضی گرانیگاه نیز از روش آویختن آونگ (از محور دوران) استفاده شد. بر این اساس گرانیگاه آونگ در نقطه ای مجازی قرار گرفت. برای تعیین میزان انرژی،

[14] Scale Method

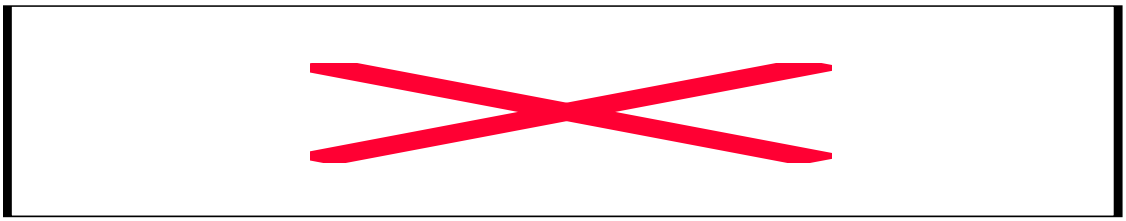
[15] Suspension Method

آنچه اهمیت داشت اطلاع از فاصله گرانیگاه از محور دوران و جرم آن بود که به ترتیب برابر ۶۱ سانتی متر و ۱۲۲ گرم بدست آمد.

آماده سازی نمونه ها و انجام آزمایش

به منظور بررسی کارایی و قابلیت های دستگاه تست ضربه، آزمایشی با هدف استخراج برخی پارامترهای مکانیکی دانه گندم تحت بارگذاری ضربه ای انجام پذیرفت. دانه های گندم شامل پنج رقم قدس، بزوستایا، روشن، الموت و مهدوی، بترتیب از نوع خیلی سخت تا نرم، در دو سطح رطوبت ۶/۵ و ۱۵٪ مورد بررسی قرارگرفتند. برای رسیدن به رطوبت ۱۵٪ با اضافه نمودن مقادیر محاسبه شده آب به هریک از نمونه ها در ظروف آب بندی شده شیشه ای، رطوبت تعادلی پس از ۲۴ ساعت بدست آمد. رطوبت ۶/۵٪ نتیجه استفاده از دانه در شرایط محیطی آزمایشگاه بود که بدون هرگونه تغییر عمدی در رطوبت دانه حاصل شد. مقدار معینی از نمونه ها درست پیش از آزمایش، درون اجاق خشک کن قرارگرفته و بر اساس روش وزنی استاندارد (*ASAE, 1999*) مقادیر رطوبت هریک اندازه گیری شد. دانه های مرطوب بلافاصله پس از خروج از بطری در سطح صفحه تکیه گاه با کمک اندکی چسب مایع چسبانده شده و آزمون های ضربه با شرایط مندرج در جدول ۱ بر روی هر یک از دانه ها انجام پذیرفت. پس از انجام آزمون ها، تحلیل داده ها شامل تجزیه واریانس بر روی داده های جمع آوری شده انجام پذیرفت.

جدول ۱ –مشخصات دستگاه از لحاظ مولفه های فنی جهت انجام محاسبات (انرژی و ....)



یافته ها

۱- نتایج عینی

بخش قابل ملاحظه ای از مدت زمانی که برای طراحی و راه اندازی دستگاه گذشت، عمدتا صرف آزمایش های اولیه با انواع سیم و رابطهای مختلف برای آونگ شد. از لحاظ نظری، استفاده از سیم (کابل انعطاف پذیر) بهترین گزینه برای انتخاب می باشد. زیرا در این وضعیت کمینه ارتعاش در

عامل ضربه (وزنه) ایجاد میگردد. در دستگاه های مشابه برای تست ضربه از چنین سامانه ای استفاده شده است (*Bajema, et al., 1998*). برای این منظور از انواع سیم فولادی نازک (سیم موسیقی) و الیاف پلاستیکی (سیم ماهیگیری) استفاده شد. هرچند در استفاده از این روش (آونگ با اتصال سیمی) ارتعاش بسیار کم بود اما عملا، حتی با استفاده از دو رشته سیم موازی، کنترل آونگ در برخورد دقیق وزنه به دانه امکان پذیر نبود. این مسئله به ویژه در زوایای بیشتر از ۱۵ درجه کاملا بارز بود. به نظر میرسد که در تست محصولات بزرگتری همچون انواع میوه، سبزی و غده (محصولات غیر دانه ای) استفاده از روش سیمی امکان پذیر باشد. در بررسی های انجام شده و مقایسه رابط های فولادی، برنجی و چوبی، در نهایت از یک رابط چوبی با کمترین وزن ممکن به عنوان آونگ استفاده شد.

همچنین بخش دیگری از آزمایشهای اولیه صرف تعیین سطح انرژی مناسب برای تست ضربه شد. یکی از محدودیت های تست ضربه پایین بودن میزان حساسیت سامانه اندازه گیری می باشد. برای افزایش حساسیت، لازم است که دامنه تغییرات فاکتورهای مورد بررسی افزایش یابد. لذا لازم است که از بیشینه انرژی ضربه ای استفاده نمود که در عین حال سبب تخریب دانه نگردد. برای این منظور، یک سری آزمایش اولیه در هر دو سطح از دانه های خشک و مرطوب با زاویه سقوط در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درجه، هریک در ۱۰ تکرار انجام پذیرفت. نتایج آزمایش در نمونه های خشک به این ترتیب بود. در زاویه ۱۰ درجه (با انرژی ضربه ای معادل ۹/۲۵ میلی ژول)، در هیچ یک از ۱۰ دانه مورد بررسی تخریب مشاهده نشد. درحالیکه در زوایای ۲۰ و ۲۵ درجه (به ترتیب با انرژی ضربه ای معادل۳۶/۷ و ۵۷/۱ میلی ژول) به ترتیب در ۲۰ و ۸۰ درصد موارد تخریب دانه بصورت شکستگی کامل مشاهده شد. بر این اساس مجددا آزمایش بر روی ۱۰ دانه گندم در زاویه سقوط ۱۸ درجه تکرار شد که نتیجه آن عدم مشاهده هر نوع گسیختگی (شکست) در دانه های مورد آزمایش بود. بر این مبنا، زاویه ۱۸ درجه برای سقوط آونگ با انرژی کل معادل ۲۹/۸ میلی ژول، معادل ارتفاع سقوط ۳ سانتی متری وزنه، برای تست دانه های خشک انتخاب شد. از آنجاکه یکی از اهداف مطالعه حاضر بررسی تاثیر رطوبت بر خواص مکانیکی بود، از سطح انرژی مشابه برای دانه های مرطوب استفاده شد. در آزمایش های اولیه بر روی نمونه های خشک، دانه هایی که در زوایای ۱۸ درجه و یا بالاتر از آن تحت ضربه قرار گرفتند و دچار گسیختگی نشدند، مجددا تحت همان میزان انرژی ضربه قرار داده شدند. نتایج عینی نشان داد که در بیش از ۹۰٪ موارد (۴۶ مورد از ۵۰ تست)، دانه در دومین بارگذاری ضربه ای بطور کامل دچار تخریب گردید[۱۶]. این نتیجه مشخص نمود که در اولین بارگذاری، هر چند با انرژی کرنشی اعمال شده به دانه تحت ضربه هیچگونه شکست ظاهری در دانه مشاهده نشد، اما احتمالا این انرژی عامل ایجاد تعدادی ترک و شکاف جدید در بافت دانه بوده و یا اینکه ترک و شکاف های موجود در دانه را بطور مشخص گسترش داده است. بطور مشابه در دانه های مرطوب

[۱۶] در اینجا منظور از تخریب دانه عبارت است از ایجاد هر نوع شکست یا ترک در سطح دانه که در ضربات شدید تر ممکن است به دو یا چند تکه شدن دانه بیانجامد.

۳۰ تست ضربه در سه سطح انرژی ۶۰، ۶۸ و ۷۵ میلی ژول انجام پذیرفت. میزان دانه های تخریب شده در سه سطح ذکر شده به ترتیب معادل صفر، ۱۷ و ۱۰۰ درصد بود. بنابراین کمینه انرژی لازم برای تخریب دانه های با رطوبت ۱۵٪ حدود ۷۲ میلی ژول تعیین شد. این میزان انرژی در مقابل انرژی مورد نیاز برای شکست یک دانه خشک (۳۳ میلی ژول) به مراتب بیشتر می باشد و نشاندهنده این واقعیت است که با افزایش رطوبت دانه، مقاومت آن به ضربه افزایش می یابد. این نتیجه، نتایج مطالعات پیشین در این زمینه را تایید می کند (*Ajayi & Clarke,1997; Chawla, et al., 1998*).

۲- میانگین پارامترهای مکانیکی

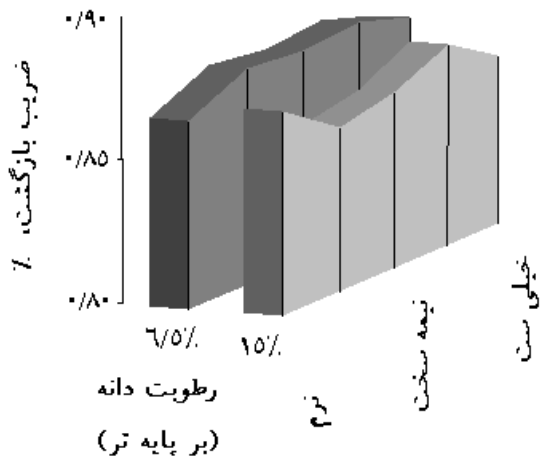
جدول شماره ۲، مقادیر میانگین پارامترهای استخراج شده از تست ضربه بر روی دانه های گندم را در دو سطح رطوبتی نشان میدهند. با توجه به مطالعات محدودی که با هدف اندازه گیری خصوصیات مکانیکی دانه گندم با کمک تست ضربه انجام پذیرفته است، مقایسه نتایج بسختی صورت میگیرد. با اینهمه نتایج حاصل از انرژی کرنشی بدست آمده نشاندهنده آنست که در دانه های مرطوب، در شرایط معادل، انرژی بیشتری توسط دانه جذب می گردد که این نتیجه مشابه نتایجی است که در مورد ذرت، لوبیا ، باقلا و لوبیا چشم بلبلی بدست آمده است (*Ajayi & Clarke, 1997; Chawla, et al., 1998; Allen and Watts, 1997*). آلن و واتس(۱۹۹۷) مقادیر انرژی جذب شده، آزاد شده و نیز انرژی مورد نیاز برای شکست دانه لوبیا چشم بلبلی تحت بار ضربه ای با سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه و در رطوبت ۱۱٪ (بر پایه تر) را به ترتیب معادل ۲۴، ۷ و ۴۶ میلی ژول برآورد گردند. همچنین این محققین نشان دادند که با افزایش رطوبت به سطح ۱۵٪، میزان انرژی جذب شده نیز افزایش می یابد. این نتیجه با یافته های تحقیق جاری مطابقت می کند. با اینهمه، با توجه به تفاوت در نوع بافت دانه امکان مقایسه نتایج بسختی امکان پذیر است.

جدول ۲ – مقادیر میانگین مهمترین پارامترهای استخراج شده از تست ضربه در دو سطح رطوبتی و ارقام پنچگانه گندم

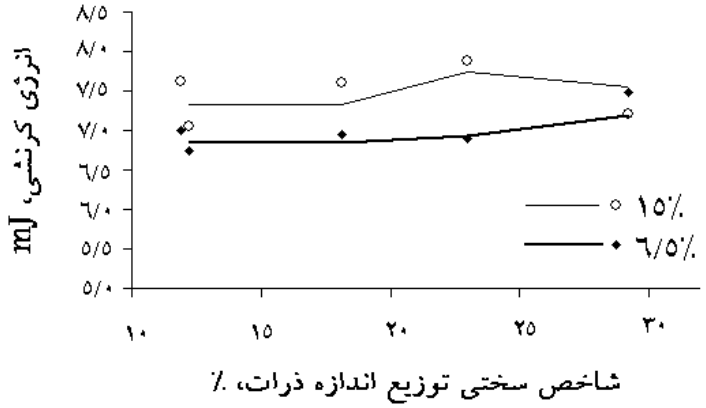
رقم	انرژي مخصوص m.J/mm²	انرژي ويژه m.J/mm³	انرژي كرنشي m.J	ضريب جبران %	رطوبت (wb)
مهدوي	۰/۱۰۷	۰/۱۵۹	۷/۲۱۳	۰/۸۷۰	۱۵٪
الموت	۰/۱۲۸	۰/۲۰۵	۷/۸۸۳	۰/۸۵۸	
روشن	۰/۱۲۱	۰/۱۸٤	۷/٦۱۰	۰/۸٦۳	
بزوستايا	۰/۱۱٤	۰/۱۷٦	۷/۰٤۸	۰/۸۷٤	
قدس	۰/۱۲۸	۰/۲۰۰	۷/٦۱۸	۰/۸٦۳	
مهدوي	۰/۱۲۲	۰/۱۹۱	۷/٤۷۷	۰/۸٦٥	٦/٥٪
الموت	۰/۱۲۷	۰/۲۱٤	٦/۹۰۲	۰/۸۷٦	
روشن	۰/۱۱۸	۰/۱۸۷	٦/۹٤٦	۰/۸۷٦	
بزوستايا	۰/۱۰۸	۰/۱٦۷	٦/۷۳٥	۰/۸۸۰	
قدس	۰/۱۳۲	۰/۲۲۱	٦/۹۹٥	۰/۸۷٥	

۳- تاثیر شرایط مرزی بر پارامترهای تست ضربه

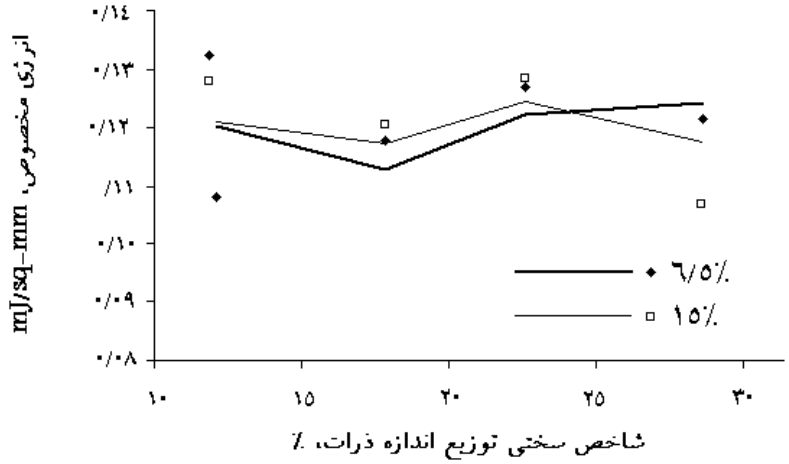
همانطور که از شکل های ۶، ۷ و ۸ ملاحظه می‌گردد تاثیر رطوبت بر فاکتورهای مکانیکی بارز می باشد. این نتیجه با کمک آزمون t نیز مورد بررسی و تایید قرار گرفت. بطور مشخص در نمونه های مرطوب، انرژی کرنشی بیشتری از طریق بارگذاری ضربه ای به دانه منتقل می گردد. آزمایشات اولیه نیز نشان داده بود که برای تخریب دانه های مرطوب به سطح انرژی بالاتری نیاز است. همچنین، همانطور که در بخش نتایج عینی نیز بدان اشاره شد، بیشینه دانه های خشک در دومین بارگذاری (در همان سطح از میزان انرژی سینتیک) دچار گسیختگی شدند، درحالیکه این حالت در نمونه های مرطوب اساسا مشاهده نشد. نتایج آزمون t نیز دلالت برتفاوت معنی دار در فاکتورهای ضریب بازگشت و انرژی کرنشی در اثر تیمار رطوبت دارد. اما آنچه اهمیت دارد این است که این نتیجه در مورد انرژی در واحد حجم و سطح دانه (انرژی ویژه و انرژی مخصوص)، که مقادیر آنها اساسا تحت تاثیر ابعاد دانه می باشند، صادق نبود. به عبارت روشن تر خصوصیات الاستوپلاستیک دانه های گندم تحت بارگذاری ضربه ای ، حتی در یک اختلاف قابل ملاحظه در سطوح رطوبتی(۶/۵ تا ۱۵ درصد)، بطور معنی داری تحت تاثیر رطوبت دانه قرار ندارد.



شکل۷ – نحوه تاثیر عامل رطوبت بر پارامتر ضریب بازگشت در ارقام گندم با سختی متفاوت



شکل ۸- تاثیر رطوبت بر میزان انرژی کرنشی جذب شده توسط دانه در ارقام مختلف گندم



شکل ۹- نحوه تاثیر رطوبت بر میزان انرژی مخصوص در ارقام مختلف گندم

از لحاظ میزان پراکندگی داده ها همانگونه که از جدول ۲ ملاحظه میگردد مقادیر ضریب تغییرات، به ویژه در مقایسه با تست های استاتیک، بسیار کمتر می باشد. نکته جالب اینکه در مقایسه دو سطح رطوبتی نیز ملاحظه میگردد که این پراکندگی در نمونه های خشک کمتر از نمونه های مرطوب است. در تحقیق *Srivastava* و همکاران (۱۹۷۶) نیز که هدف استخراج فاکتورهای مکانیکی حاصل از تست ضربه بود، مقادیر ضریب تغییرات بطور متوسط بیش از ۳۰ درصد گزارش شد، درحالیکه در تحقیق حاضر ضریب تغییرات برای پارامتر مورد نظر ۱۶ درصد بوده است که دلالت بر دقت مناسب در اندازه گیری دارد. ضریب تغییرات به ویژه در مورد پارامتر ضریب بازگشت بسیار کم و در حدود ۲ درصد می باشد (جدول ۳).

جدول ۳- مقادیر میانگین فاکتورهای مکانیکی حاصل از تست ضربه و میزان پراکندگی در دو سطح رطوبتی

	انرژي مخصوص $m.J/mm^2$	انرژي ويژه $m.J/mm^3$	انرژي كرنشي m.J	ضريب بازگشت
نمونه خشك (٦/٥٪)	۰/۱۲۱	۰/۱۹٦	۷/۰۱۱	۰/۸۷٤
ضريب تغييرات	۱۸٪	۲۳٪	۱۳٪	۱٪
نمونه مرطوب (۱۵٪)	۰/۱۲۰	۰/۱۸۵	۷/٤۷٤	۰/۸٦۵
ضريب تغييرات	۲۲٪	۲۷٪	۱۹٪	۳٪

منابع

شاکری، م. و درویزه، ا. (۱۳۷۶). مکانیک ضربه. چاپ اول، ۳۱۷ص، انتشارات دانشگاه گیلان.

Ajayi, O. A. and Clarke, B. *(1997). High velocity impact of maize kernels. J. agric. Engng Res.* ***67,*** *97-104.*

Allen, A. W. and Watts, K, C. *(1997). Properties of cowpeas. Journal of Agricultural Engineering Research,* ***68****: 159-167.*

ASAE Standards, *(1999). Moisture measurement - unground grain and seeds. American Society of Agricultural Engineers SAE S352.2 .*

Bajema, R; Hyde, G. M. and Peterson, K. *(1998). Instrumentation design for dynamic axial compression of cylindrical tissue samples. Transactions of ASAE, Vol.,* ***41****(3): 747-754.*

Bilanski, W. K. (*1964). Breaking strength of seed grain. Transactions of the ASAE, Vol.,* ***7****(1): 21-24.*

Bilanski, W. K. (*1964).Damage resistance of seed grains. Transactions of the ASAE, Vol.,* ***9****(3): 360-363.*

Bueche, F. J. and Hecht, E. *(1997). College Physics. 9th edn. McGraw-Hill Companies Inc. New york, NY.*

Chawla, K, K,; Tabil, L. G. and Likhyani, S. *(1998). Impact damage to peas and beans during free fall. Paper No. 98-312, presented to the CSAE/SCGR meetings, Vancouver, CANADA.*

Jindal, V. K, and Mohsenin, N. N. *(1976). Analysis of a simple pendulum impacting device for determining dynamic strength of selected food materials. Transactions of the ASAE, Vol.,* ***19****(3): 766-770.*

Kennish, W. J. and Henderson, J. M. *(1978). Formulation of models for cushion materials for impact application. Transactions of the ASAE,* ***21****(3) : 793-796.*

Mohsenin , N. N. *(1978) . Physical Properties of Plant and Animal Materials . 1st edn. Gordon and Breach , New York , USA .*

Sitkei, G. *(1986). Mechanics of Agricultural Materials.1st edn., Elsevier Science Pub. Co. 483p. New York, N.Y.*

Srivastava, A. K,; Herum, F. L. and Stevens, K, K. *(1976). Impact parameters related to physical damage to corn kernel, Transactions of the ASAE,* ***19****(2): 1147-1151.*