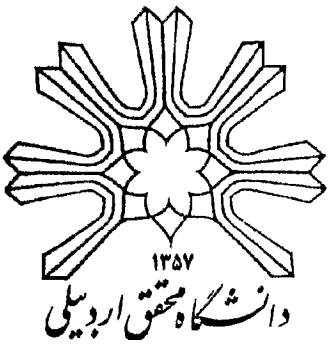
٩٤٢٢٤

۸۷/۱/۱۰۴۶۸۳
۸۷/۱۱/۱۹



دانشکده کشاورزی

گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی

بررسی خواص مکانیکی دانه شلتوک برنج (آزمون خمش و ضربه) تحت دماهای مختلف خشک کردن

استاد راهنما:

دکتر امیرحسین افکاری سیاح

اساتید مشاور:

دکتر عزت‌اله عسکری اصلی ارده

دکتر علی اسحق‌بیگی

توسط:

مجید دایی‌جواد

دانشگاه محقق اردبیلی

تابستان ۱۳۸۷

۹۴۲۲۶

بررسی خواص مکانیکی شلتوک برنج (آزمون خمش و ضربه) تحت دماهای مختلف خشک‌کردن

توسط:

مجید دایی‌جواد

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مکانیک ماشین‌های کشاورزی

از

دانشگاه محقق اردبیلی

ایران-اردبیل

۱۳۸۷ /۹/ ۵-

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر امیرحسین افکاری سیاح (استاد راهنما و رئیس کمیته داوران).....استادیار

دکتر عزت‌اله عسگری اصلی ارده (استاد مشاور اول).....استادیار

دکتر علی اسحق‌بیگی (استاد مشاور دوم).....استادیار

دکتر عبداله گل‌محمدی (داور داخلی).....استادیار

دکتر محمدرضا علیزاده (داور خارجی).....استادیار

شهریور-۱۳۸۷

تقدیم به دو ستارهٔ زیبای زندگی‌ام

پدر بزرگوارم

سبزترین سایهٔ بالای سرم، محکم‌ترین تکیه‌گاهم، او که پیچک مهربانی‌اش را میهمان وجودم نمود، او که پیشانی بلندش طلوع هزاران خورشید است.

مادر مهربانم

عروس آفرینش، گل هستی، محبت بی‌تمنا، رساترین معنای عاطفه، لطیف‌ترین احساس بودن، مظهر ایثار، سخی‌ترین چشمهٔ خدا، او که زمستانی‌ترین لحظاتم با وجودش بهار می‌شود.

دو بزرگواری که لبانشان بارگاه دعاست و شبنم نگاهشان بدرقهٔ همیشگی راه، بودنشان نعمتی عظیم و ماندنشان موهبتی عظیم‌تر، وجودشان همیشه پرفروغ.

برادران عزیزم

مهدی و حمید

استوارترین پشتوانه‌های دوران تحصیلم

زندادش عزیزم

مظهر عطوفت

سرچمشهٔ مهربانی

و همهٔ آنهایی که قلبم به خاطر آنها می‌تپد، آنهایی که دوستشان دارم و دوستم دارند.

تقدیر و تشکر

با حمد و سپاس به درگاه پروردگار متعال که توفیق انجام این تحقیق را به بندهٔ حقیر ارزانی داشت، اکنون بر خود واجب می‌دانم از تمامی عزیزانی که به نحوی مرا در اجرای این امر یاری نمودند تشکر و قدردانی نمایم.

سپاس اولین و برترین معلمان زندگی، **پدر** و **مادر** مهربانم را، که بودنم و تمام توفیقاتم را مدیون قلب مهربانشان هستم و در سایهٔ دعای خیرشان، تحمل تمام مشکلات برایم مقدور می‌گردد.

از **برادران عزیز** و **زنداداش مهربانم** به خاطر دلگرمی‌هایشان در راه کسب دانش و همراهی بی‌توقعشان تشکر می‌کنم.

از محضر استاد راهنمای ارجمندم **جناب آقای دکتر امیرحسین افکاری سیاح** کمال سپاسگزاری را دارم که همواره با صبر و حوصلهٔ فراوان، راهنمایی این رساله را انجام داده و با نظرهای ارزشمند و راهگشای خویش، با درایت تمام مرا در امر تهیه و تدوین مطالب یاری نمودند. ایشان برای من یک معلم علم و اخلاق بودند.

از زحمات و راهنمایی‌های اساتید مشاور فرزانه، **جناب آقای دکتر عزت‌اله عسکری اصلی ارده** و **جناب آقای دکتر علی اسحق‌بیگی** که صادقانه و با رویی گشاده مرا در طول اجرای پایان‌نامه راهنمایی و مساعدت کردند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

از مدیر گروه محترم، **جناب آقای دکتر یوسف عباسپور** به خاطر مساعدت‌ها و حمایت‌های بی‌دریغشان سپاسگزارم.

از استاد گرامی **جناب آقای دکتر رسول اصغری زکریا** کمال تشکر را دارم که فن تجزیه و تحلیل مطالب را با ایشان آموختم.

در پایان از همهٔ دوستان و همکلاسی‌های عزیزم، آقایان مهندس محمد رنجبر کهن، سعید عباسی، رضا اسدی، مهدی ترکیان، رضا ابراهیم‌زاده، ایوب ارغوانی، مجید آذری، محسن حسنی، مهدی بخشی‌زاده و بویژه خانم مهندس سمانهٔ شجاعی، خانم مهندس ثمانه لواسانی و خانم مهندس فرناز فرهپور بسیار سپاسگزارم که در طول تحصیل و انجام این پژوهش همراه من بودند و کمک‌های شایانی به این حقیر نمودند.

نام خانوادگی دانشجو: دایی‌جواد	**نام:** مجید
عنوان پایان نامه: بررسی خواص مکانیکی دانه شلتوک برنج (آزمون خمش و ضربه) تحت دماهای مختلف خشک کردن	
استاد راهنما: دکتر امیرحسین افکاری سیاح	
اساتید مشاور: دکتر عزت اله عسکری اصلی اردہ – دکتر علی اسحق‌بیگی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مکانیک ماشین‌های کشاورزی	**دانشگاه:** محقق اردبیلی
دانشکده: کشاورزی **تاریخ فارغ التحصیلی:** ۱۳۸۷/۷/۲	**تعداد صفحه:** ۱۲۱
کلید واژه‌ها : برنج، خشک کردن، ضربه، شاخص قابلیت شکست، آزمون خمش سه نقطه‌ای	

چکیده: در بین غلات، برنج غذای اصلی حدود دو سوم مردم جهان را تشکیل می‌دهد. این محصول نیز همچون سایر محصولات کشاورزی در مراحل مختلف برداشت، حمل و نقل و فرآوری تحت تأثیر نیروهای استاتیک و دینامیک متعددی قرار می‌گیرد. در حال حاضر، طی تبدیل شلتوک به برنج سفید، درصد نسبتاً زیادی از محصول خرد شده و قسمت عمده‌ای از ضایعات را موجب می‌گردد که یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این تلفات، نحوهٔ اعمال فرآیند خشک‌کردن است. بنابراین برای کسب اطلاع از تأثیر روش خشک‌کردن بر تلفات مکانیکی، ارزیابی قابلیت شکست برنج و تعیین خصوصیات استحکامی دانه پس از فرآیند خشک‌کردن ضروریست. لذا طی این پژوهش، سه رقم برنج متداول در کشور شامل ارقام هاشمی، دیلمان و علی‌کاظمی پس از خشک‌کردن در دماهای مختلف، ازطرف پهلو تحت دو آزمایش بارگذاری ضربه‌ای و خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند. در ابتدا خواص فیزیکی دانه‌ها شامل ابعاد سه‌گانه، ضریب کرویت، جرم، حجم و چگالی دانه اندازه‌گیری شد. آنگاه با انجام آزمون ضربه، اثر رقم، دمای خشک کردن (در سه سطح ۳۰، ٤٥ و ٦٠ درجهٔ سانتیگراد)، میزان انرژی ضربه‌ای (در سه سطح ۱۰، ۲۳ و ۳۷ میلی‌ژول) و روش خشک کردن (استفاده از خشک‌کن و نیز روش طبیعی) در ۱۰ تکرار، بر قابلیت شکست دانهٔ برنج بررسی شد. به منظور کمی کردن میزان آسیب وارده به دانه، از معیاری به نام شاخص قابلیت شکست (*BSI*) استفاده شد. همچنین با انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، پارامترهای نیروی شکست، بیشینه تغییرشکل، انرژی شکست، انرژی ویژهٔ شکست، بیشینه تنش خمشی، چغرمگی و ضریب کشسانی ظاهری اندازه‌گیری شدند. سپس به بررسی تأثیر رقم، دمای خشک‌کردن و روش خشک‌کردن در ۱۰ تکرار بر پارامترهای فوق پرداخته شد. در آزمون ضربه، نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که در دانه‌های خشک شده به روش مصنوعی (استفاده از خشک‌کن)، رقم و میزان انرژی سینتیک اثر معنی‌داری در سطح ۱٪ بر قابلیت شکست دانهٔ برنج داشته است. اما از این نظر تفاوت معنی‌داری بین دماهای خشک‌کردن مشاهده نشد. در دانه‌های خشک شده به صورت طبیعی، میزان انرژی اعمالی تأثیر معنی‌داری در سطح ۱٪ بر میزان شکست دانه داشت ولی تفاوت معنی‌داری بین ارقام مختلف مشاهده نشد. همچنین اثر متقابل رقم و میزان انرژی اعمالی بر قابلیت شکست دانه معنی‌دار بود. نتایج این آزمون نشان داد که ارقام علی‌کاظمی و دیلمان با داشتن میانگین شاخص قابلیت شکست ۰/۰۱۰۱ و ۰/۰۲۳۵، به ترتیب مقاوم‌ترین (نرم‌ترین) و حساس‌ترین (تردترین) رقم نسبت به تنش‌های ناشی از بارگذاری ضربه‌ای می‌باشند. همچنین مشخص شد که خشک کردن برنج به روش مصنوعی، قابلیت شکست دانه‌ها را تا بیش از ٦٠ درصد افزایش می‌دهد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های بدست‌آمده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای نشان داد که در دانه‌های خشک شده به روش مصنوعی، اثر رقم بر ضریب کشسانی ظاهری، انرژی شکست و نیروی شکست معنی‌دار است، اما تأثیر دمای خشک‌کردن بر هیچ یک از پارامترها معنی‌دار نبود. نتایج تجزیهٔ واریانس داده‌ها در مورد دانه‌های خشک شده به روش طبیعی نشان داد که تأثیر رقم بر پارامترهای چغرمگی، انرژی شکست، انرژی ویژهٔ شکست، نیروی شکست و تغییرشکل در نقطهٔ شکست معنی‌دار است. بر این اساس، بیشینه ضریب کشسانی در مورد رقم هاشمی خشک شده در دمای ٦٠ درجه معادل ۱۸۷/۸۵ مگاپاسکال و کمینه ضریب کشسانی برای رقم علی‌کاظمی خشک شده به صورت طبیعی معادل ۱۰۷/۷٦ مگاپاسکال بدست آمد. همچنین بیشینه و کمینه انرژی لازم برای شکست به ترتیب مربوط به رقم علی‌کاظمی خشک شده در دمای ٦٠ درجه و رقم هاشمی خشک شده به روش طبیعی به ترتیب معادل ۲/۸۳ و ۱/۲۱ میلی‌ژول اندازه‌گیری شد. بر اساس این آزمون، ارقام هاشمی و علی‌کاظمی به ترتیب به عنوان تردترین و نرم‌ترین ارقام نسبت به تنش‌های ناشی از بارگذاری خمشی شناخته شدند. در مجموع می‌توان گفت استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای، از نظر کاربرد عملی و گسترهٔ نتایج بدست‌آمده برای بررسی کیفیت دانهٔ برنج، مناسب‌تر از روش ضربه‌ای می‌باشد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته ۲-۴۲

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- اهداف تحقیق ٤

۱-۳- کلیات و تعاریف ٥

۱-۳-۱- آسیب‌های مکانیکی ٥

۱-۳-۱-۱- علل و شکل‌های ایجاد آسیب ٥

۱-۳-۱-۲- شدت آسیب ٦

۱-۳-۱-۳- طبقه‌بندی آسیب‌های مکانیکی ۷

۱-۳-۱-٤- روش‌های کاهش آسیب‌های مکانیکی ۸

۱-۳-۲- غلات ۹

۱-۳-۳- برنج، تاریخچه و منشأ پیدایش ۹

۱-۳-٤- سابقهٔ برنجکاری در ایران ۹

۱-۳-٥- سطح زیر کشت، عملکرد و میزان تولید برنج در ایران و جهان ۱۰

۱-۳-٦- مواد تشکیل‌دهندهٔ دانهٔ برنج ۱۰

۱-۳-۷- تکنولوژی پس از برداشت برنج ۱۱

۱-۳-۸- ضایعات برنج ۱۱

۱-۳-۹- شاخص عملکرد برنج سالم ۱۲

۱-۳-۱۰- ترک‌خوردگی شلتوک ۱۳

۱-۳-۱۰-۱- روش‌های بررسی ترک ۱٤

۱-۳-۱۰-۲- مقاومت به شکست ۱۷

۱-۳-۱۰-۳- قابلیت شکست ۱۷

۱-۳-۱۰-٤- ملاک ارزیابی کیفی برای قابلیت شکست دانه و صدمهٔ ناشی از ترک ۱۹

۱-۳-۱۱- خواص مکانیکی شلتوک ۲۰

۱-۳-۱۲- آزمون‌های مکانیکی ۲۲

۱-۳-۱۲-۱- بارگذاری ضربه‌ای ۲۳

۱-۳-۱۲-۱-۱- آسیب‌های ناشی از ضربه ۲۳

۱-۳-۱۲-۱-۲- رفتار مواد تحت بارهای ضربه‌ای ۲٤

۱-۳-۱۲-۱-۳- مراحل چهارگانهٔ ضربه ۲٥

۱-۳-۱۲-۲- بارگذاری شبه‌استاتیک ۲۸
۱-۳-۱۲-۲-۱- مفاهیم اساسی ۲۸
۱-۳-۱۲-۲-۲- نقطهٔ تسلیم بیولوژیکی ۲۸
۱-۳-۱۲-۲-۳- نقطهٔ گسیختگی (شکست) ۲۸
۱-۳-۱۲-۲-٤- حد الاستیک ۲۹
۱-۳-۱۲-۲-٥- حد تناسب ۲۹
۱-۳-۱۲-۲-٦- ضریب کشسانی (مدول الاستیسیته) ۲۹
۱-۳-۱۲-۲-۷- ضریب پواسن ۲۹
۱-۳-۱۲-۲-۸- چغرمگی ۳۰
۱-۳-۱۲-۲-۹- منحنی نیرو- تغییرشکل ۳۰
۱-۳-۱۲-۲-۱۰- ضریب کشسانی ظاهری ۳۱
۱-۳-۱۲-۳- آزمون خمش سه‌نقطه‌ای ۳۲
۱-٤- پیشینه تحقیق ۳٤
۱-٤-۱- بررسی پیشینهٔ تحقیق مربوط به بارگذاری ضربه‌ای ۳٤
۱-٤-۲- بررسی پیشینهٔ تحقیق مربوط به بارگذاری‌های شبه‌استاتیک ۳٦
۱-٤-۳- بررسی پیشینهٔ تحقیق مربوط به بارگذاری خمشی ٤۱

فصل دوم: مواد و روش تحقیق ۷۱-٤٤

۲-۱- مقدمه ٤٤
۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها ٤٤
۲-۳- خشک‌کردن نمونه‌ها ٤٥
۲-۳-۱- خشک‌کردن نمونه‌ها به روش مصنوعی ٤٥
۲-۳-۱-۱- قسمت‌های اصلی (بخش تولید حرارت) خشک‌کن ٤٥
۲-۳-۱-۱-۱- سیستم تأمین و انتقال هوا ٤٦
۲-۳-۱-۱-۲- گرمکن ٤۷
۲-۳-۱-۱-۳- محفظهٔ آرام‌کننده ٤۷
۲-۳-۱-۱-٤- بستر خشک‌کن ٤۷
۲-۳-۱-۲- سیستم‌های اندازه‌گیری خشک‌کن ٤۸
۲-۳-۱-۲-۱- اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوا ٤۸
۲-۳-۱-۲-۲- اندازه‌گیری سرعت هوای ورودی و خروجی از بستر ٤۸
۲-۳-۱-۳- خشک‌کردن نمونه‌ها توسط خشک‌کن وعده‌ای بستر عمیق ٤۹

۲-۳-۲- خشک‌کردن نمونه‌ها به صورت طبیعی ۵۰
۲-٤- تعیین خواص فیزیکی شلتوک ۵۰
۲-٤-۱- وزن ۵۱
۲-٤-۲- ابعاد ۵۱
۲-٤-۳- ضریب کرویت ۵۱
۲-٤-٤- حجم و چگالی ۵۲
۲-۵- آزمون ضربه ۵۳
۲-۵-۱- طراحی و ساخت دستگاه آزمون ضربه ۵۳
۲-۵-۱-۱- انتخاب نوع دستگاه بارگذاری ضربه‌ای ۵۳
۲-۵-۱-۲- ساخت آونگ ٥٤
۲-۵-۱-۳- تعیین مرکز ثقل آونگ ۵۵
۲-۵-۱-٤- ابعاد آونگ ٥٦
۲-۵-۱-۵- محاسبهٔ انرژی وارده به دانه‌ها طی بارگذاری ضربه‌ای ۵۷
۲-۵-۱-٦- محاسبهٔ سرعت آونگ در لحظهٔ برخورد به دانه ۵۹
۲-۵-۱-۷- تکیه‌گاه دانه ٦۰
۲-۵-۱-۸- اتصالات لازم جهت دوران آونگ ٦۰
۲-۵-۱-۹- قرائت زوایای تصادم و بازگشت ٦۰
۲-۵-۱-۱۰- چرخدنده‌ها ٦۱
۲-۵-۱-۱۱- کالیبراسیون زوایای قرائت‌شده ٦٤
۲-۵-۲- انجام آزمون ضربه بر روی دانه‌های برنج ٦٤
۲-۵-۳- انتخاب معیاری برای تعیین قابلیت شکست ذانه ٦۵
۲-٦- آزمون خمش سه‌نقطه‌ای ٦۷
۲-٦-۱- انتخاب دستگاه بارگذاری جهت انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای ٦۷
۲-٦-۲- انجام آزمون‌های خمش بر روی شلتوک ٦۹
۲-٦-۳- استخراج پارامترهای لازم ۷۰
۲-۷- دسته‌بندی اطلاعات و تجزیه و تحلیل آماری ۷۱
فصل سوم: نتایج و بحث ۷۳-۱۰۵
۳-۱- مقدمه ۷۳
۳-۲- محتوای رطوبتی نمونه‌ها ۷۳
۳-۳- رفتار دانهٔ برنج تحت بارگذاری ضربه‌ای ۷٤

۳-۳-۱- نتایج عینی ۷٤
۳-۳-۲- خواص فیزیکی دانه‌ها ۷۵
۳-۳-۳- تأثیر رقم و دمای خشک‌کردن بر خواص فیزیکی دانه‌ها ۸۰
۳-۳-٤- تأثیر فرآیند خشک‌کردن بر قابلیت شکست دانهٔ برنج ۸۱
۳-۳-۵- مقایسهٔ دو روش خشک‌کردن ۹۱
۳-٤- رفتار دانهٔ برنج تحت بارگذاری خمشی ۹۲
۳-٤-۱- نتایج عینی ۹۲
۳-٤-۲- خواص مکانیکی حاصل از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای ۹۲
۳-٤-۳- تأثیر فرآیند خشک‌کردن بر پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای ۹۸
۳-٤-٤- مقایسهٔ دو روش خشک‌کردن ۱۰٤

فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۷-۱۱۰

٤-۱- نتایج حاصل از بارگذاری ضربه‌ای ۱۰۷
٤-۲- نتایج حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای ۱۰۸

پیوست ۱۱۲-۱۱۵

پیوست (۱) ۱۱۲
پیوست (۲) ۱۱٤

منابع ۱۱۷-۱۲۱

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل۱-۱- طرح‌وارهٔ سیستم میکروسکوپ ویدئویی (باتیستا و سایبنمورگن، ۱۹۹۹) ۱۵
شکل۱-۲- نمونهٔ تصویر گرفته‌شده از دانهٔ برنج پس از فرآیند خشک‌کردن توسط یک سیستم میکروسکوپ ویدئویی (باتیستا و سایبنمورگن، ۱۹۹۹) ۱۵
شکل۱-۳- دستگاه ترک‌بین جهت مشاهدهٔ ترک‌های درون دانهٔ برنج (کرمانی، ۱۳۸۵) ۱۶
شکل۱-٤- نمونه‌ای از دستگاه ترک‌بین ۱۶
شکل۱-۵- طرح‌واره‌هایی از ترک‌های ایجاد شده درون دانهٔ برنج قهوه‌ای (نوسن و همکاران، ۲۰۰۳) ۱۶
شکل۱-٦- چهار مرحلهٔ پدیدهٔ ضربه بر اساس منحنی تغییرشکل- زمان ۲۵
شکل۱-۷- نمای شماتیکی از دستگاه تست ضربه (روش چارپی و آیزود) ۲۷
شکل۱-۸- منحنی‌های نیرو-تغییرشکل برای دو مادهٔ مختلف (یکی دارای نقطهٔ تسلیم و دیگری بدون نقطهٔ تسلیم). ۲۹
شکل۱-۹- تفاوت بنیادین در منحنی "نیرو-تغییرشکل" مواد بیولوژیک و مواد پلیمری ۳۱
شکل۱-۱۰- نحوهٔ قرارگیری نمونه بر روی تکیه‌گاه و بارگذاری در آزمون خمش سه نقطه‌ای ۳۲
شکل۱-۱۱- نحوهٔ اتصال دانهٔ برنج برای آزمون کشش (کونز و چودهاری، ۱۹۷۲) ۳۸

شکل۲-۱- نمای خشک‌کن وعده‌ای بستر عمیق (زارع، ۱۳۸۵) ٤۵
شکل۲-۲- نمای دمنده و خط انتقال هوا ٤٦
شکل۲-۳- تصویر اینورتور تنظیم‌کنندهٔ سرعت دمنده ٤۷
شکل۲-٤- بستر خشک‌کن و هود هدایت‌کنندهٔ هوای خروجی ٤۸
شکل۲-۵- سرعت‌سنج پره‌ای دیجیتالی ٤۹
شکل۲-٦- نمای کلی از دستگاه تست ضربهٔ آونگی ۵٤
شکل۲-۷- تعیین موقعیت گرانیگاه آونگ به روش توزین ۵٦
شکل۲-۸- ابعاد آونگ و نحوهٔ اتصال میلهٔ آونگ به محور دوران (شافت افقی) ۵۷
شکل۲-۹- نمایی از نوسان آونگ به منظور محاسبهٔ انرژی وارده بر دانه طی بارگذاری ضربه‌ای ۵۸
شکل۲-۱۰- تصویر تکیه‌گاه دستگاه برای قرارگیری دانهٔ برنج توسط چسب بر روی استوانهٔ فولادی ٦۱
شکل۲-۱۱- تصویر اتصالات محل دوران آونگ ٦۲
شکل۲-۱۲- تصویر پتانسیومتر برای قرائت زوایای چرخش آونگ ٦۲
شکل۲-۱۳- مدار قرائت‌کنندهٔ دیجیتالی جهت ثبت زوایای تصادم و بازگشت آونگ ٦۳
شکل۲-۱٤- چرخدنده‌های با قطر متفاوت برای افزایش دور محور دوران آونگ ٦۳
شکل۲-۱۵ نمای کلی دستگاه تست کشش و فشار سنتام سری STM-20 ..... ٦۸

شکل۲-۱۶- نمایی از تکیه‌گاه و عامل بارگذاری ساخته‌شده جهت انجام آزمون خمش با دستگاه آزمون فشاری..... ۶۸
شکل۲-۱۷- نمونه‌ای از منحنی "نیرو-تغییرشکل" رسم‌شده برای دانهٔ شلتوک توسط دستگاه طی بارگذاری خمشی ۶۹

شکل۳-۱- مکانیسم ایجاد ترک در دانهٔ برنج ناشی از بارگذاری ضربه‌ای..... ۷۵
شکل۳-۲- مقادیر میانگین شاخص قابلیت شکست در سه سطح دمای خشک‌کردن و سه سطح انرژی سینتیک، برای رقم علی‌کاظمی خشک شده به صورت مصنوعی..... ۸۴
شکل۳-۳- مقادیر میانگین شاخص قابلیت شکست برای سه رقم در روش مصنوعی..... ۸۷
شکل۳-۴- مقایسهٔ شاخص قابلیت شکست بین سطوح مختلف انرژی سینتیک در نمونه‌های خشک‌شده به صورت مصنوعی..... ۸۸
شکل۳-۵- اثر متقابل رقم و انرژی ضربه‌ای بر شاخص قابلیت شکست ۸۹
شکل۳-۶- مقایسهٔ مقادیر میانگین شاخص قابلیت شکست بین سطوح انرژی سینتیک در نمونه‌های خشک شده به روش طبیعی..... ۹۰
شکل۳-۷- مقایسهٔ مقادیر میانگین شاخص قابلیت شکست بین دو روش خشک‌کردن..... ۹۱
شکل۳-۸- مقایسهٔ مقادیر میانگین ضریب کشسانی ظاهری بین سه رقم ۱۰۱
شکل۳-۹- مقایسهٔ مقادیر میانگین ضریب کشسانی ظاهری بین سه دمای خشک‌کردن..... ۱۰۲
شکل۳-۱۰- مقایسهٔ مقادیر میانگین انرژی شکست در بین سه رقم..... ۱۰۳
شکل۳-۱۱- مقایسهٔ مقادیر میانگین نیروی شکست در بین سه رقم ۱۰۴

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول۲-۱- روابط به‌کار رفته برای کالیبره کردن زوایای قرائت‌شده ٦٤

جدول۳-۱- محتوای رطوبتی نمونه‌ها قبل از انجام آزمون‌های مکانیکی ٧٤

جدول۳-۲- مقادیر میانگین ابعاد سه‌گانه و ضریب کرویت برای رقم هاشمی خشک شده به صورت مصنوعی ٧٦

جدول۳-۳- مقادیر میانگین ابعاد سه‌گانه و ضریب کرویت برای رقم دیلمان خشک شده به صورت مصنوعی ٧٦

جدول۳-٤- مقادیر میانگین ابعاد سه‌گانه و ضریب کرویت برای رقم علی‌کاظمی خشک شده به صورت مصنوعی .. ٧٧

جدول۳-٥- مقادیر میانگین ابعاد سه‌گانه و ضریب کرویت برای نمونه‌های خشک شده به روش طبیعی ٧٧

جدول۳-٦- مقادیر میانگین جرم، حجم و چگالی دانه برای رقم هاشمی خشک شده به صورت مصنوعی ٧٨

جدول۳-۷- مقادیر میانگین جرم، حجم و چگالی دانه برای رقم دیلمان خشک شده به صورت مصنوعی ٧٩

جدول۳-۸- مقادیر میانگین جرم، حجم و چگالی دانه برای رقم علی‌کاظمی خشک شده به صورت مصنوعی ٧٩

جدول۳-۹- مقادیر میانگین جرم، حجم و چگالی دانه برای نمونه‌های خشک شده به روش طبیعی ٧٩

جدول۳-۱۰- نتایج تجزیهٔ واریانس خواص فیزیکی در نمونه‌های خشک شده به صورت مصنوعی (در ۱۰ تکرار) . ۸۰

جدول۳-۱۱- مقایسهٔ مقادیر میانگین خواص فیزیکی بین سه رقم در روش مصنوعی ۸۱

جدول۳-۱۲- مقادیر میانگین شاخص قابلیت شکست برای نمونه‌های خشک‌شده به صورت مصنوعی ۸۲

جدول۳-۱۳- مقادیر میانگین شاخص قابلیت شکست برای نمونه‌های خشک‌شده به صورت طبیعی ۸۳

جدول۳-۱٤- نتایج تجزیهٔ واریانس متغیرها برای شاخص قابلیت شکست (BSI) در نمونه‌های خشک‌شده به صورت مصنوعی ۸۵

جدول۳-۱٥- مقایسهٔ مقادیر میانگین شاخص قابلیت شکست بین دماهای خشک‌کردن (آزمون دانکن) ۸۵

جدول۳-۱٦- مقایسهٔ مقادیر میانگین شاخص قابلیت شکست بین سه رقم (آزمون دانکن) در روش مصنوعی ۸٦

جدول۳-۱۷- مقایسهٔ مقادیر میانگین شاخص قابلیت شکست بین سطوح انرژی سینتیک (آزمون دانکن) در روش مصنوعی ۸٦

جدول۳-۱۸- نتایج تجزیهٔ واریانس متغیرها برای شاخص قابلیت شکست (BSI) در نمونه‌های خشک شده به روش طبیعی (در ۱۰ تکرار) ۸۹

جدول۳-۱۹- مقادیر میانگین پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش برای رقم هاشمی خشک‌شده به صورت مصنوعی ۹۳

جدول۳-۲۰- مقادیر میانگین پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش برای رقم دیلمان خشک شده به صورت مصنوعی ۹۳

جدول۳-۲۱- مقادیر میانگین پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش برای رقم علی‌کاظمی خشک شده به صورت مصنوعی ۹٤
جدول۳-۲۲- مقادیر میانگین پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش برای نمونه‌های خشک شده به صورت طبیعی ۹٤
جدول۳-۲۳- مقادیر میانگین پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش برای رقم هاشمی خشک شده به صورت مصنوعی ۹٦
جدول۳-۲٤- مقادیر میانگین پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش برای رقم دیلمان خشک شده به صورت مصنوعی ۹٦
جدول۳-۲۵- مقادیر میانگین پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش برای رقم علی‌کاظمی خشک شده به صورت مصنوعی ۹۷
جدول۳-۲٦- مقادیر میانگین پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش برای نمونه‌های خشک شده به صورت طبیعی ۹۷
جدول۳-۲۷- نتایج تجزیهٔ واریانس پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش در نمونه های خشک شده به صورت مصنوعی (در ۱۰ تکرار) ۹۹
جدول۳-۲۸- نتایج تجزیهٔ واریانس پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش در نمونه های خشک شده به صورت مصنوعی (در ۱۰ تکرار) ۹۹
جدول۳-۲۹- نتایج تجزیهٔ واریانس پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش در نمونه‌های خشک شده به صورت طبیعی (در ۱۰ تکرار) ۱۰۰
جدول۳-۳۰- نتایج تجزیهٔ واریانس پارامترهای مکانیکی حاصل از آزمون خمش در نمونه‌های خشک شده به صورت طبیعی (در ۱۰ تکرار) ۱۰۱
جدول پ-۱-۱- مقادیر میانگین جرم و حجم برای رقم هاشمی خشک شده به صورت مصنوعی ۱۱۲
جدول پ-۱-۲- مقادیر میانگین جرم و حجم برای رقم دیلمان خشک شده به صورت مصنوعی ۱۱۲
جدول پ-۱-۳- مقادیر میانگین جرم و حجم برای رقم علی‌کاظمی خشک شده به صورت مصنوعی ۱۱۲
جدول پ-۱-٤- مقادیر میانگین جرم و حجم برای نمونه‌های خشک شده به روش طبیعی ۱۱۳
جدول پ-۲-۱- مقادیر میانگین ابعاد سه‌گانه برای رقم هاشمی خشک شده به صورت مصنوعی ۱۱٤
جدول پ-۲-۲- مقادیر میانگین ابعاد سه‌گانه برای رقم دیلمان خشک شده به صورت مصنوعی ۱۱٤
جدول پ-۲-۳- مقادیر میانگین ابعاد سه‌گانه برای رقم علی‌کاظمی خشک شده به صورت مصنوعی ۱۱۵
جدول پ-۲-٤- مقادیر میانگین ابعاد سه‌گانه برای نمونه‌های خشک شده به روش طبیعی ۱۱۵

فصل اول

مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته

۱-۱- مقدمه

برنج یکی از قدیمی‌ترین و پرمصرف‌ترین محصولات زراعی است و غذای اصلی حدود دو سوم مردم جهان را تشکیل می‌دهد (شیتاندا[1] و همکاران، ۲۰۰۲). این محصول علاوه بر تأمین کالری و بخشی از پروتئین، مادهٔ غذایی اصلی مردم قارهٔ آسیا می‌باشد. با توجه به روند رو به رشد جمعیت کشور و افزایش تقاضا در سال‌های اخیر، افزایش سطح زیر کشت برنج و کاهش ضایعات در عملیات تولید برنج ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس اطلاعات منتشر شده از سوی سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد[2]، سطح زیر کشت برنج در ایران در سال ۲۰۰۶، حدود ۶۲۰ هزار هکتار و میزان تولید شلتوک حدود ۳/۶ میلیون تن گزارش شده است (FAOSTAT, 2006). زراعت این محصول در مناطقی مانند استان‌های گیلان و مازندران که شرایط اقلیمی و اکولوژیکی برای کشت برنج مناسب می‌باشد، رواج بیشتری یافته است (خدابنده، ۱۳۸۲).

از زمانی که برنج به صورت شالی برداشت می‌شود تا موقعی که به صورت برنج سفید به بازار عرضه می‌گردد، فرآیندهای مختلفی بر روی آن انجام می‌گیرد. از جمله مراحلی که در روند تولید برنج، ضایعات عمده‌ای را به همراه دارد، فرآیند تبدیل[3] شلتوک به برنج سفید است. منظور از تبدیل برنج، کلیهٔ عملیات انجام گرفته بر روی برنج از انتهای فرآیند خشک‌کردن تا پایان مرحلهٔ درجه‌بندی می‌باشد. کیفیت تبدیل در ارتباط مستقیم با راندمان برنج سفید سالم است، به عبارت دیگر آن رقم از شلتوک که طی مرحلهٔ تبدیل به برنج سفید، راندمان بیشتری ایجاد کند، از کیفیت تبدیل بالاتری برخوردار خواهد بود. فرآوری دانهٔ برنج دارای مراحل مختلفی شامل تمیزکردن[4]، خشک‌کردن[5]، پوست‌کنی[6]، سفیدکردن[7] و درجه‌بندی[8] است (شیتاندا و همکاران، ۲۰۰۲). بنابراین طی تبدیل شلتوک به برنج سفید، درصد نسبتاً زیادی از محصول به ضایعات تبدیل می‌شود. این ضایعات شامل خردشدن، کپک‌زدگی و تغییررنگ دانه

---

1. Shitanda
2. FAO
3. Milling
4. Cleaning
5. Drying
6. Dehusking
7. Whitening
8. Grading

می‌باشد. برنج، ترجیحاً به صورت دانهٔ کامل[1] مصرف می‌شود و قیمت دانه‌های شکسته حدود یک‌سوم قیمت برنج سالم است. از این رو، تولید برنج سالم همراه با صرف انرژی و زمان فرآوری حداقل، هدف صنعت برنج می‌باشد (سارکر[2] و همکاران، ۱۹۹۶). مهم‌ترین مشکل در صنعت برنج، ترک خوردن دانه یا خردشدگی آن می‌باشد. دانه‌های ترک خورده ممکن است در فرآیند تبدیل دچار شکستگی شوند و در نتیجه میزان شاخص کیفی «عملکرد برنج سالم[3]» کاهش یابد.

در بین مراحل فرآوری برنج، فرآیند خشک‌کردن یکی از مهم‌ترین مراحل فرآوری است که درصد وسیعی از ضایعات را به خود اختصاص می‌دهد. پارامترهای زیادی بر کیفیت دانهٔ برنج طی مرحلهٔ خشک کردن تأثیر می‌گذارند که دما و رطوبت مهم‌ترین آن‌ها می‌باشند. طی عملیات خشک‌کردن، دانه به صورت غیریکنواخت خشک می‌شود و بنابراین از سطح دانه به طرف داخل آن گرادیان رطوبتی به وجود خواهد آمد (یانگ[4] و همکاران، ۲۰۰۳). این گرادیان رطوبتی سبب ایجاد تنش‌های کششی و فشاری در سطح و داخل دانه شده که منجر به ترک‌خوردگی و شکستگی دانه می‌گردد (آکیورتا[5] و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین از طریق تعیینِ و بررسی خواص مکانیکی دانهٔ برنج پس از مرحلهٔ خشک‌کردن، می‌توان قابلیت شکست دانهٔ برنج تحت دماهای مختلف خشک‌کردن را بررسی کرد و شرایط بهینه‌ای را برای عملیات خشک کردن دانهٔ شلتوک برنج مشخص نمود. خواص مکانیکی شامل شاخص‌های سختی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت برشی و مقاومت به ضربه می‌باشد. تحقیقاتی در این زمینه و با هدف بررسی عوامل موثر در عملیات خشک‌کردن شلتوک انجام شده است. اما تا کنون تحقیقی در زمینهٔ اندازه‌گیری خواص مکانیکی دانهٔ برنج توسط آزمون ضربه، به منظور بررسی تأثیر عملیات خشک کردن بر قابلیت شکست دانهٔ برنج صورت نگرفته است. در مورد آزمون خمش نیز، تحقیقات انجام شده بسیار معدود بود.

---

1. Whole grain
2. Sarker
3. HRY (Head Rice Yield): یک استاندارد رایج برای ارزیابی کیفیت تبدیل برنج تجاری است و عبارت است از نسبت برنج سفید سالم به کل برنج سفید بدست آمده از فرآیند تبدیل.
4. Yang
5. Aquerreta

۱-۲- اهداف تحقیق

به طور کلی اهداف این پژوهش عبارتند از: استخراج خواص فیزیکی و مکانیکی ارقام متداول برنج پس از فرآیند خشک‌کردن (به دو روش مصنوعی و طبیعی) و تعیین قابلیت شکست برنج به کمک آزمون ضربه. به‌طور دقیق، اهداف این تحقیق را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

۱- استخراج خواص فیزیکی دانه‌ها (شامل ابعاد سه‌گانه، ضریب کرویت، جرم، حجم و چگالی توده) پس از فرآیند خشک‌کردن

۲- مشاهدهٔ عینی عکس‌العمل دانهٔ برنج نسبت به بارگذاری‌های خمشی و ضربه‌ای در شرایط متفاوت خشک کردن

۳- تعیین قابلیت شکست برنج به کمک آزمون ضربه تحت دماهای مختلف خشک‌کردن

٤- استخراج خواص مکانیکی دانه‌ها به کمک آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

٥- مقایسهٔ نتایج حاصل از این دو آزمون بین دو روش خشک‌کردن

٦- مقایسهٔ این دو روش بارگذاری در تعیین مقاومت مکانیکی دانه نسبت به شکست.

۱-۳- کلیات و تعاریف

۱-۳-۱- آسیب‌های مکانیکی

در اکثر شاخه‌های کشاورزی، مکانیزاسیون عمومیت پیدا کرده است، ولی در برخی موارد دارای معایبی است که از آن جمله می‌توان افزایش تلفات در برداشت محصول، خسارت وارده در عملیات مکانیکی یا کاهش کیفیت و نهایتاً کم‌ارزش شدن آن‌ها را نام برد. این تلفات در جمع‌آوری و جابجایی میوه خیلی زیاد است.

کاهش تلفات حاصل از خسارت مکانیزاسیون و حفظ کیفیت محصولات کشاورزی در صورتی ممکن است که قوانین مربوطه و خواص محصولات در نظر گرفته شود. شناخت خواص محصولات کشاورزی اجازه می‌دهد ماشین‌ها و فرآیندهای جدید بر اساس شرایط و ویژگی‌های فیزیکی محصولات طراحی شوند و بدین ترتیب خسارت کاهش و بهره‌دهی عملیات افزایش یابد. به همین دلیل مکانیک محصولات کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و همین امر دلیلی بر توسعهٔ این علم جوان است. با قطعیت می‌توان پیش‌بینی کرد که بحث مکانیک محصولات کشاورزی موضوع پایه‌ای مهندسی کشاورزی قرار گیرد. برداشت مکانیزهٔ محصولات نتایج نامناسبی دارد که عموماً منجر به افزایش آسیب در فرآوری محصولات می‌شود. در نتیجه کیفیت محصول مستقیماً پایین می‌آید و در بعضی موارد فساد سریع محصولات به دنبال آسیب‌های مکانیکی بوجود آمده و بدین ترتیب مواد کاملاً از بین خواهند رفت. محصولات فاسد شده، در مدت زمان طولانی نگهداری در انبار، مواد سالمی را که با آن‌ها در تماس هستند به خطر خواهند انداخت. بنابراین تلاش به منظور کاهش آسیب‌های مکانیکی از نظر اقتصادی اهمیت زیادی دارد (توکلی هشجین، ۱۳۸۲).

۱-۳-۱-۱- علل و شکل‌های ایجاد آسیب

آسیب در محصولات کشاورزی به شکل‌های متنوعی ایجاد می‌شود. شکل آسیب بستگی به ساختمان فیزیکی و بیولوژیکی محصول و نوع بار دارد. دانه‌ها عموماً در موقع خرمنکوبی و حمل و نقل آسیب می‌بینند. در این حالت، آسیب به شکل شکستگی و در اثر تغییر شکل‌های پی در پی یا نیروهای ضربه‌ای بوجود می‌آید. تغییرشکل‌های زیاد هنگامی حاصل می‌شوند که محصول باید اجباراً از سوراخ‌هایی عبور نماید و یا در اثر برخورد دانه‌ها با هم به هنگام خرمنکوبی یا پر کردن برج‌های انباری (سیلو)، نیروهای زیادی به آن‌ها وارد شود. آسیب در شکل‌های مختلف دیگر از ترک‌های مویی تا شکستگی کامل ظاهر

می‌شود. آسیب، قوهٔ نامیه را در دانه‌های غلات کاهش می‌دهد و سرعت اکسیداسیون را در مدت انبار زیاد می‌کند، در این صورت خسارت محصولات افزایش پیدا می‌کند و کیفیت آرد حاصل از این نوع دانه‌ها پایین می آید. طرز ایجاد آسیب در محصولات کشاورزی در حال حاضر کاملاً شناخته شده نیست ولی گسیختگی‌ها و پارگی‌های حاصل در داخل و خارج مجموعهٔ سلول‌ها در مدت آسیب‌دیدگی قطعاً پیچیده است. آغاز گسیختگی در مجموعه سلول‌های محصولات بیولوژیکی به‌وسیلهٔ نقطهٔ تسلیم بیولوژیکی مشخص می‌شود. بنابراین، وقتی بار وارده از حد تسلیم تجاوز کند، آسیب شروع می‌شود، ولی نیروهای تکراری، حتی نیروهای کوچکتر از حد تسلیم نیز بعد از مدتی تکرار، به این حد می‌رسند، زیرا بعضی مواد در اثر بارهای تکراری نرم می‌شوند و از مقاومت آن‌ها کاسته می‌شود. برای تعیین بار مجاز در هر یک از محصولات کشاورزی، شناخت خواص مکانیکی محصولات در حالت تنش‌های ساده (بارهای کششی، فشاری و برشی ساکن یا متحرک) لازم است. به کمک شناخت این خواص مکانیکی، می‌توان حالت‌های بارگذاری پیچیده‌تری را که در عمل اتفاق می‌افتند ارزیابی کرد و به طور تقریبی وقوع و عدم وقوع آسیب را پیش‌بینی نمود (توکلی هشجین، ۱۳۸۲).

۱-۳-۱-۲- شدت آسیب

در حالت کلی شدت آسیب وارده به یک محصول، علل مختلفی دارد از جمله:

- نوع و روش اعمال نیرو (بار ایستا یا دینامیک)
- دامنهٔ اعمال نیرو (مدت‌زمان بار اعمالی و یا تعداد ضربات وارده به محصول)
- شدت بار اعمالی (میزان انرژی اعمالی)
- نوع سطح ضربه زننده
- خواص فیزیکی محصول مثل رقم، دما، رطوبت و میزان رسیدگی محصول