اصلاح عملکرد دستگاه پوست‌کن شلتوک با بکارگیری سامانه های کنترل خودکار و ماشین بینایی

محمد شاکر[1*]، سعید مینایی[2]، محمد هادی خوش تقاضا[2]، احمد بناکار[2]، عبدالعباس جعفری[3]

۱- دانش آموخته دوره دکتری مکانیک ماشین های کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

۳- عضو هیئت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

* ایمیل نویسنده مسئول: m.shaker1348@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، به‌منظور اصلاح عملکرد دستگاه پوست‌کن شلتوک و کاهش ضایعات برنج، سامانهٔ کنترل خودکار و ماشین بینایی طراحی، ساخته و آزمایش شد. این سامانه به‌گونه‌ای طراحی شد که بر حسب نوع و میزان رطوبت شلتوک بتواند فاصلهٔ غلتک‌ها و سرعت دورانی موتور را به مقدار بهینه تنظیم کند. پس از آن با به‌کارگیری سامانهٔ ماشین بینایی و دستگاه تک‌دانه‌ساز، میزان شکستگی برنج تعیین شد. میزان شکستگی برنج اگر بیش از حد مورد نظر بود تنظیمات لازم روی دستگاه پوست‌کن انجام می‌شد. شرایط کاری دستگاه پوست‌کن، برای دو رقم شلتوک با اعمال تیمارهای رطوبت شلتوک، فاصلهٔ غلتک‌ها و سرعت دورانی موتور بررسی و فاکتورهای شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج اندازه‌گیری شد. الگوریتم پردازش تصویر به‌منظور تعیین درصد شکستگی برنج در نرم افزار متلب کدنویسی و ارزیابی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب سرعت دورانی موتور و فاصلهٔ غلتک‌ها برای شلتوک دانه متوسط، میانگین شاخص پوست‌کنی برابر با ۸۲/۶۵ درصد و میانگین شکستگی برنج سبوس‌دار برابر با ۳/۸۸ درصد است. برای شلتوک دانه بلند، میانگین شاخص پوست‌کنی و شکستگی برنج به‌ترتیب برابر با ۵۱/۴۰ و ۲۷/۴۶ درصد است. نتایج ارزیابی الگوریتم دقت آن را برابر با ۹۱/۸۱ درصد نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی دستگاه تک‌دانه‌ساز نیز نشان می‌دهد که مقدار مکش ۴۵- تا ۵۰- میلی‌متر جیوه با میزان جداسازی ۸۱/۳ درصد مناسب‌ترین مقدار است. نتایج مناسب‌ترین سرعت دورانی موتور و فاصله غلتک‌ها در سامانه کنترل، برنامه‌ریزی و تنظیم شد و با نصب آن روی دستگاه مناسب‌ترین شرائط کاری برای دستگاه پوست‌کن به‌صورت خودکار فراهم آمد.

واژه‌های کلیدی : پوست‌کن، شلتوک، کنترل‌خودکار، ماشین‌بینایی.

مقدمه

برنج به‌عنوان دومین محصول استراتژیک، نقش تعیین کننده‌ای در تأمین نیاز غذایی مردم کشور ما دارد و به‌علت وجود ویتامین‌ها، مواد معدنی و نشاسته یک ماده غذایی پر مصرف به شمار می‌رود (پیمان و همکاران، ۱۳۷۸). کاهش ضایعات در مراحل مختلف تولید و به ویژه در عملیات پس از برداشت یکی از راهکارهای عملی و موثر به منظور دستیابی به افزایش تولید داخل و کاهش واردات این محصول محسوب می‌شود، به‌طوری‌که حتی یک درصد کاهش ضایعات، با توجه به تولید زیاد این محصول، چشم‌گیر خواهد بود. برنج با سطح زیرکشت ۵۶۵ هزار هکتار و تولید ۲/۴۵ میلیون تن شلتوک و متوسط عملکرد ۴/۳۳۶ تن بر هکتار از محصولات استراتژیک کشاورزی ایران محسوب می شود. بیشترین سطح زیرکشت در استان مازندران با ۲۲۰۹۶۸ هکتار می‌باشد. پس از مازندران، استان‌های گیلان، خوزستان، گلستان، فارس و اصفهان به ترتیب مقام دوم تا ششم را به خود اختصاص داده‌اند (آمارنامه سالانه کشاورزی، ۱۳۹۳).

از مراحلی که نقش مهمی در مقدار ضایعات برنج دارد، تبدیل شلتوک به برنج سفید است که شامل چهار مرحلهٔ کلی: تمیزکردن، پوست‌کندن، سفیدکردن و درجه‌بندی است. در هر یک از مراحل فوق آسیب‌هایی به برنج وارد می‌شود، که البته بیشتر از جنبه کیفی دارای اهمیت است. کیفیت برنج با استفاده از شاخص‌هایی نظیر سالم، شکسته، ترک‌دار، گچی، نارس، خشکیده و آسیب‌دیده بیان می‌شود. با توجه به اینکه قیمت برنج شکسته، کمتر از نصف قیمت برنج سالم است، این موضوع از دیدگاه اقتصادی نیز اهمیت زیادی دارد (پیمان و همکاران، ۱۳۷۸).

به دلیل ماهیت عملیات پوست‌کنی شلتوک در فرآیند تبدیل، بخشی از ضایعات کیفی در این مرحله ظاهر می‌شود زیرا این عملیات مکانیکی است و شدت و پیچیدگی خاص خود را دارد. عوامل مختلفی از جمله رقم و رطوبت شلتوک، فاصله بین غلتک‌ها و سرعت دورانی موتور محرک بر عملکرد دستگاه پوست‌کن تاثیرگذار است، از این رو به‌کارگیری فناوری‌های نوین، همچون پردازش تصویر، می‌تواند راه‌کاری مؤثر و دقیق در کنترل و بهسازی عملکرد دستگاه‌های پوست‌کن باشد. هدف از اجرای این پژوهش، به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار و ماشین بینایی در دستگاه پوست‌کن غلتک لاستیکی شلتوک به‌منظور اصلاح عملکرد و کاهش ضایعات برنج است. در اینجا به چند نمونه از تحقیقات انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

در تحقیقی، با مقایسهٔ دو نوع پوست‌کن غلتک لاستیکی و تیغه‌ای، از نظر درصد شکستگی برنج سبوس‌دار خروجی دستگاه، به این نتیجه دست یافتند که میانگین درصد شکستگی برنج در پوست‌کن غلتک لاستیکی برابر با ۹/۳ درصد و در نوع تیغه‌ای برابر با ۱۷/۶ درصد است (Afzalinia *et al.*, 2004).

در تحقیقی محدوده‌های مختلف رطوبت شلتوک، از نظر درصد ترک و شکستگی برنج روی ارقام دانه متوسط و دانه بلند، بررسی گردید. نتایج تحقیقات نشان داد که مناسب‌ترین محدودهٔ رطوبتی شلتوک ارقام دانه بلند برای تبدیل به برنج، ۱۰ تا ۱۲ درصد است. در شلتوک‌های دانه متوسط، مشخص شد که میزان رطوبت ۸ تا ۱۰ درصد مناسب‌ترین محدودهٔ رطوبتی است (شاکر و علیزاده، ۱۳۸۲).

دو نوع پوست‌کن غلتک لاستیکی و تیغه‌ای با سه سطح پوست‌گیری شلتوک برای رقم هاشمی بررسی شد و درصد خرد، راندمان تبدیل و درجه سفیدی نمونه‌ها به‌دست آمد. نتایج نشان داد که به‌کارگیری ماشین پوست‌کن غلتک لاستیکی می‌تواند میزان خرد برنج را برای رقم هاشمی تا ۵۸/۲ درصد براساس وزن برنج و ۴/۵ درصد براساس وزن شلتوک اولیه کاهش دهد (صبوری هلستانی و روفیگری حقیقت، ۱۳۹۲).

در پژوهشی اثر اختلاف سرعت محیطی غلتک‌ها و رطوبت شلتوک را در یک پوست‌کن غلتک لاستیکی روی شاخص پوست‌کنی و درصد برنج شکسته بررسی شد. نتیجهٔ آزمایش‌ها روی دو رقم شلتوک، در ۶ سطح اختلاف سرعت محیطی غلتک‌ها و ۳ سطح رطوبت شلتوک نتایج نشان داد که با افزایش میزان رطوبت شلتوک از ۹–۸ به ۱۳–۱۲ درصد، میانگین درصد دانه‌های شکسته از ۱۳ به ۱۴/۶۱ درصد افزایش و شاخص پوست‌کنی از ۷۱/۶۴ به ۶۱/۸۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین وقتی سرعت غلتک‌ها از ۱/۵ به ۵ متر بر ثانیه تغییر می‌یابد، مقدار برنج شکسته از ۱۸/۸۳ به ۹/۹۷ درصد کاهش پیدا می‌کند (Firouzi *et al.*, 2010).

براساس تحقیقات انجام شده، برنج‌های با طول بیشتر و ضخامت کمتر نسبت به برنج‌های متوسط و کوتاه در فرآیند تبدیل دچار شکستگی بیشتری می‌شوند. افزون‌براین، بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که برنج‌های کوتاه در فرآیند تبدیل، در مقایسه با برنج‌های بلند و متوسط، تحت تاثیر نیروی کمتری هستند (Goodman and Rao, 1985).

به منظور تحلیل شکل‌های برنج سبوس‌دار و سفید شده، با پردازش تصویر روی چهار رقم برنج با سه روش سفیدکردن فاکتورهای سطح، محیط، بیشینه طول، بیشینه پهنا، سفتی و مقاومت کششی اندازه‌گیری گردید. نتایج این پژوهش روی دانه‌های برنج سبوس‌دار و سفید شده نشان داد که جداسازی ارقام برنج با پردازش تصویر در سطح احتمال ۹۵/۴ درصد با بهره‌گیری از فاکتورهای ابعاد و شکل امکان‌پذیر است (Sakai *et al.*, 1996).

عملکرد یک سامانه بازرسی خودکار برای دسته‌بندی کیفیت برنج آزمایش شد. با این سامانه دانه‌های سالم، ترک‌دار، گچی، نارس، خشکیده، شکسته و آسیب‌دیده از یکدیگر تفکیک شد. نرم‌افزار ویژه بازرسی کیفیت برنج برای بهبود دقت تفکیک دانه‌ها و عملکرد ماشین تدوین شد. نتایج نشان داد که سامانه بازرسی خودکار، در مقایسه با بازرسی انسانی، می‌تواند بیش از ۹۰ درصد دانه-

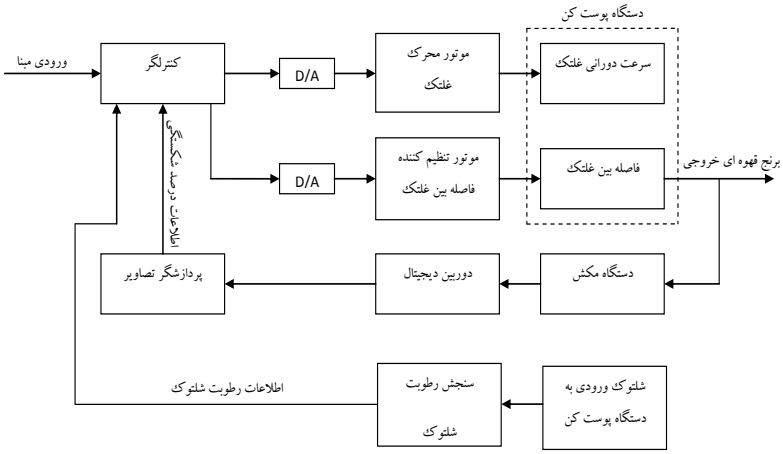
های برنج را به طور صحیح دسته‌بندی کند. دسته‌بندی دانه‌های سالم، گچی و ترک‌دار به ترتیب با ۹۵، ۹۲ و ۸۷ درصد از دقت بالایی برخوردار بود. متوسط سرعت فرایند برای بازرسی کیفی برنج بیش از ۱۲۰۰ دانه در دقیقه بود (Wan *et al*., 2002).

در پژوهشی، یک سامانهٔ هوشمند با استفاده از ماشین بینایی و منطق فازی برای درجه‌بندی کیفیت محصول خروجی از دستگاه سفیدکن برنج و کنترل پارامترهای عملکردی دستگاه با توجه به شاخص‌های درجهٔ سفیدی و درصد دانه‌های شکسته ایجاد گردید. سامانهٔ کنترل متشکل از واحد نمونه‌گیری از محصول خروجی دستگاه سفیدکن، واحد تک‌سازی و انتقال محصول، واحد تصویربرداری و پردازش تصویر، و واحد کنترل فازی بود. ارزیابی عملکرد سامانه کنترل خودکار نشان داد که دقت سامانه کنترل در تعیین شرایط کاری مناسب برای عملگر کنترلی برابر با ۸۹/۲ درصد است (ذرعی فروش و همکاران، ۱۳۹۴). در بیشتر پژوهش‌ها (که به چند مورد آن اشاره شد) ویژگی‌های برنج سفید شده با به‌کارگیری روش پردازش تصویر بررسی شده اما در مورد شلتوک و برنج سبوس‌دار تحقیق کمتری شده است. در بارهٔ کاربرد انواع دستگاه پوست‌کن، مقایسه آنها با یکدیگر، تنظیمات لازم بر روی سرعت خطی غلتک‌ها و فاصله بین آنها تحقیقاتی انجام شده است اما در رابطه با سامانه کنترل خودکار دستگاه پوست‌کن، نه تنها در ایران بلکه در دنیا نیز پژوهشی گزارش نشده است، از این رو به‌منظور رفع این کمبود، تحقیق حاضر اجرا شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از یک دستگاه پوست‌کن غلتک لاستیکی شلتوک آزمایشگاهی استفاده شد و در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس اجرا گردید (شکل۱). در این دستگاه شلتوک از مخزن دستگاه وارد و پس از عبور از میان دو غلتکی که با سرعت‌های مختلف و در خلاف جهت یکدیگر در گردش هستند، پوست آن کنده می‌شود و سپس بوسیله نیروی مکش یک مکنده پوست آن جدا می‌شود. در زیر دستگاه نیز مخلوطی از برنج سبوس‌دار سالم، شکسته و شلتوک‌های پوست‌گیری نشده جمع‌آوری می‌شود. سامانهٔ کنترل خودکار بر این اساس طراحی شد که شلتوک ورودی به دستگاه ابتدا رطوبت‌سنجی و پس از آن بر حسب نوع شلتوک و میزان رطوبت آن، فاصلهٔ بین غلتک و سرعت دورانی موتور محرک به مقدار بهینه خود (براساس بیشترین میزان شاخص پوست‌کنی و کمترین مقدار درصد شکستگی برنج) تنظیم شود. سپس از خروجی دستگاه پوست‌کن، از مسیر انشعابی و دستگاه مکش نمونه‌گیری و پس از جداسازی دانه‌ها با به‌کارگیری سامانه ماشین بینایی درصد شکستگی دانه‌های برنج تعیین می‌شود. اگر میزان شکستگی برنج بیش از حد تعریف شده باشد، سیگنالی به مدار کنترلگر ارسال و سرعت دورانی موتور محرک روی دستگاه پوست‌کن تنظیم می‌شود (شکل ۲).

شکل ۱- مجموعه، کامل دستگاه پوست کن و سامانه کنترل خودکار.



شکل ۲- نمودار روندنمای سامانه کنترل خودکار دستگاه پوست‌کن.

دستگاه رطوبت‌سنج شلتوک

به منظور اندازه‌گیری میزان رطوبت شلتوک ورودی به دستگاه پوست‌کن، یک مدار الکترونیکی مجهز به حسگر رطوبت مدل SHT 15 تهیه و آزمایش‌های لازم برای واسنجی آن به شرح زیر اجرا شد (شکل ۳). مقداری شلتوک در رطوبت‌های مختلف تهیه شد، برای این کار دستگاه رطوبت‌سنج رسا ۳۰۰۰ با دقت ۰/۱ ± درصد به‌کارگرفته شد که به روش وزنی و با استفاده از دستگاه آون، واسنجی شده بود. برای واسنجی رطوبت‌سنج ساخته شده، حسگر به مدت ۱۰ دقیقه در توده شلتوک قرار گرفت و هر یک دقیقه عدد نشان داده شده روی صفحه نمایشگر قرائت و یادداشت شد. نتایج آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. یادآوری می‌شود که این حسگر، رطوبت نسبی هوای تودهٔ شلتوک را اندازه‌گیری می‌کند و نشان می‌دهد.

جدول ۱- خروجی حسگر رطوبت به تناسب محدوده رطوبت شلتوک

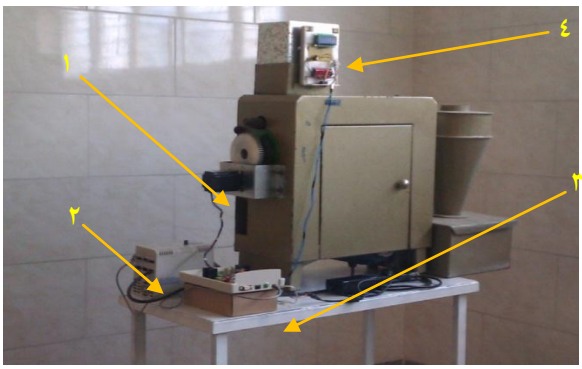
محدوده رطوبت شلتوک (٪)	خروجی حسگر رطوبت*
۹-۱۰	۵۳-۵۴
۱۱-۱۲	۶۳-۶۴
۱۵-۱۶	۶۸-۷۲
۱۷-۱۸	۷۴-۷۶

* خروجی حسگر در دمای ۲۳/۹ تا ۲۵/۶ درجه سلسیوس اندازه‌گیری گردید.

تنظیم فاصلهٔ بین غلتک‌ها و نصب موتور پله‌ای

فاصلهٔ بین غلتک‌های پوست‌کن با چرخاندن یک محور تنظیم می‌شد و از این رو لازم بود حدود گشتاور مورد نیاز برای به حرکت در آوردن آن و همچنین جابه‌جایی زاویه‌ای محور برای تنظیم فاصله‌های مورد نیاز بین غلتک‌ها اندازه‌گیری شود. برای اندازه‌گیری گشتاور، از یک نیروسنج دیجیتال استفاده شد و با آن مقدار نیروی مورد نیاز برای به حرکت در آوردن محور حدود ۷/۵ تا ۸ کیلوگرم نیرو اندازه‌گیری شد. با توجه به قطر محور که ۳۸ میلی‌متر بود، مقدار گشتاور مورد نیاز بین ۱۴/۲۵ تا ۱۵/۲ کیلوگرم نیرو در سانتی‌متر محاسبه شد.

برای اندازه‌گیری زاویهٔ حرکت محور، یک نقاله ۳۶۰ درجه اطراف آن نصب و با استفاده از شاخص نصب شده روی محور، زاویهٔ حرکت آن اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. فاصله بین غلتک‌ها نیز با فیلر (با ضخامت ۰/۲۵ تا ۱/۰۵ میلی-متر) اندازه‌گیری گردید. با توجه به گشتاور مورد نیاز و زاویهٔ حرکت محور، موتور پله‌ای مدل 57PH20 با گشتاور ۲ نیوتن متر و زاویهٔ چرخش ۱/۸ درجه در هر پله، انتخاب و تهیه شد. برای اتصال موتور پله‌ای به محور دستگاه پوست‌کن، از دو عدد چرخ-دنده (از جنس آلومینیوم به دلیل سبک بودن و جلوگیری از زنگ زدگی) به منظور افزایش گشتاور بهره‌برداری شد (شکل ۳). نسبت چرخ‌دنده‌ها ۱ به ۴ انتخاب و این نسبت سبب شد که موتور پله‌ای با یک سوم گشتاور واقعی خود قادر به چرخاندن محور باشد.



شکل ۳- سامانهٔ کنترل خودکار و اجزای آن.

۱- موتور پله‌ای، ۲- اینورتر، ۳- برد الکترونیکی، ٤- رطوبت‌سنج شلتوک

جدول ۲- محدودهٔ زاویهٔ چرخش محور به تناسب فاصلهٔ بین غلتک‌ها

محدوده زاویه چرخش شافت (درجه)	محدودهٔ فاصلهٔ بین غلتک‌ها (میلی‌متر)
۰ –۱	۰/۲ –۰/۳
۹۵ –۹۷	۰/۴ –۰/۵
۱۶۷ –۱۶۹	۰/۶ –۰/۷
۲۵۲ – ۲۵۴	۰/۸ – ۰/۹
۳۰۹ –۳۱۱	۱/۰ – ۱/۱

تنظیم سرعت دورانی الکتروموتور با به‌کارگیری دستگاه اینورتر

با توجه به اینکه الکتروموتور (ساخت شرکت موتوژن) نصب شده روی دستگاه پوست‌کن از نوع تکفاز با توان ۰/۲۵ کیلووات و سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بود، برای کنترل و تنظیم سرعت دورانی آن ابتدا یک الکتروموتور سه فاز با همان مشخصات، به جای تکفاز روی دستگاه پوست‌کن نصب شد و سپس اینورتر تکفاز به سه فاز مدل LS600-20-5S با توان ۰/۴ کیلووات تهیه و پس از تنظیم الکتروموتور به صورت مثلث، با اینورتر راه‌اندازی شد (شکل ۳).

به‌منظور تنظیم سرعت دورانی الکتروموتور محرک دستگاه پوست‌کن و تعیین سرعت خطی غلتک‌های تندگرد و کندگرد، با به‌کارگیری اینورتر و سرعت‌سنج مدل Pantec DTM 30 آزمایشی اجرا شد و محدوده سرعت دورانی الکتروموتور، عدد اینورتر و سرعت دورانی غلتک‌ها و همچنین سرعت خطی آنها به‌دست‌آمد. یادآوری می‌شود که قطر غلتک‌های تندگرد و کندگرد به‌ترتیب ۱۰/۵ و ۱۱ سانتی‌متر بود.

تعیین شرایط کاری دستگاه پوست‌کن شلتوک

به‌منظور تعیین شرایط کاری دستگاه پوست‌کن، برای دو رقم شلتوک (دانه متوسط و دانه بلند)، اثر تیمارهای رطوبت شلتوک (در دو محدوده رطوبتی ۱۲–۱۰ درصد=M_1 و ۱۰– ۸ درصد=M_2)، فاصلهٔ بین غلتک‌ها (در پنج سطح C_1=۱/۰۵، C_2=۰/۸۵، C_3=۰/۶۵، C_4=۰/۴۵ و C_5=۰/۲۵ میلی‌متر) و سرعت دورانی موتور محرک (در سه سطح R_1=۱۵۰۰، R_2=۱۴۵۰ و R_3=۱۴۰۰ دور بر دقیقه) بر فاکتورهای شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج بررسی و ارزیابی شد. از طرح آماری فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با ۳ تکرار برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و از آزمون دانکن نیز برای مقایسه بین میانگین‌ها بهره‌گیری شد.

در هر آزمایش پس از تنظیم فاصلهٔ غلتک‌ها و سرعت دورانی موتور، مقدار ۲۰۰ گرم شلتوک وارد دستگاه پوست‌کن شد. پس از پوست‌گیری، خروجی دستگاه که شامل شلتوک، برنج قهوه‌ای سالم و شکسته بود به همراه برچسب درون پلاستیک ریخته شد. پوست شلتوک‌ها با فن و سیکلون تفکیک و درون جعبه‌ای قرار داده شد پس از هر آزمایش محتویات جعبه نیز درون پلاستیک جداگانه‌ای ریخته و توزین شد. پس از پایان یافتن آزمایش‌ها، دانه‌های شلتوک، برنج قهوه‌ای سالم و شکسته در هر نمونه به‌طور دستی از یکدیگر تفکیک و پس از توزین، یادداشت برداری شد. فاکتور شاخص پوست‌کنی از رابطه (۱) محاسبه شد. درصد شکستگی برنج برابر با نسبت دانه‌های شکسته به مجموع دانه‌های برنج سبوس‌دار سالم و شکسته است (Anonymous, 1981).

$$HI = 100(1-\frac{W_2}{W_1})(\frac{W_3}{W_1 - W_2 - W_4}) \qquad (۱)$$

که در آن : HI= شاخص پوست‌کنی (درصد) ؛ W_1= وزن شلتوک وارد شده به پوست‌کن (گرم) ؛ W_2= وزن شلتوک خارج شده از پوست‌کن (گرم) ؛ W_3= وزن برنج قهوه‌ای سالم (گرم) ؛ و W_4= وزن پوست (گرم) است.

سامانه کنترل خودکار و ماشین بینایی

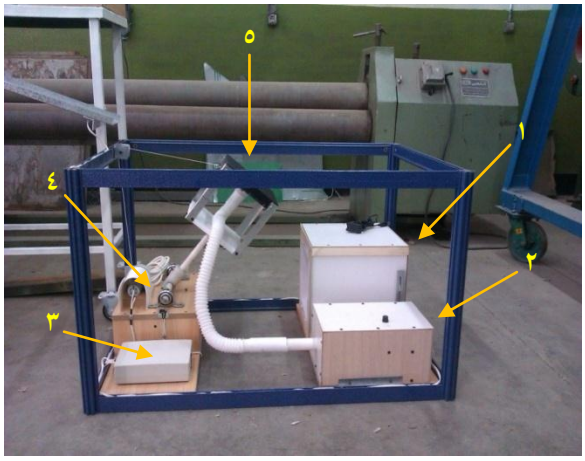
سامانه کنترل خودکار شامل یک برد الکترونیکی، رطوبت‌سنج شلتوک، موتور پله‌ای و اینورتر است. در برد الکترونیکی این سامانه، برای نوع شلتوک از یک کلید دو وضعیتی استفاده شد که برحسب دانه متوسط یا دانه بلند بودن شلتوک، یکی از دو وضعیت on و off را اپراتور انتخاب می‌کند. شلتوک به درون مخزن ورودی دستگاه پوست‌کن ریخته می‌شود که حسگر رطوبت‌سنج در آن تعبیه شده است. پس از سنجش رطوبت، چنانچه رطوبت شلتوک در محدوده ۸ تا ۱۰ درصد باشد سیگنالی به سامانه ارسال خواهد شد و بر اساس نتایج به‌دست آمده از شرایط کاری دستگاه پوست‌کن، فاصلهٔ بین غلتک‌ها و سرعت دورانی الکتروموتور محرک دستگاه (با به‌کارگیری موتور پله‌ای و اینورتر) به مقدار بهینه خود (براساس بیشترین شاخص پوست‌کنی و کمترین درصد شکستگی برنج) تنظیم می‌شود. چنانچه رطوبت شلتوک در محدوده ۱۰ تا ۱۲ درصد باشد، سیگنال دیگری به سامانه ارسال و تنظیمات لازم به طور خودکار انجام می‌پذیرد.

سامانه ماشین‌بینایی شامل سه بخش اصلی محفظه تصویربرداری، دوربین دیجیتال و نرم‌افزار پردازش تصویر است. یک جعبه چوبی مجهز به دوربین WebCam A4TECH 16 Megapixel برای تصویر برداری ساخته شد (شکل ۴). برای نورپردازی از دو عدد لامپ فلورسنت سفید بهره‌گیری شد که پس از آزمایش‌های مختلف، بهترین مکان برای نصب آن در قسمت پایین جعبه انتخاب شد.

برای تصویربرداری از دانه‌های شلتوک و برنج و تهیه الگوریتم پردازش تصویر، لازم بود مکانیزمی طراحی شود که بتوان به‌کمک آن دانه‌ها را از یکدیگر جدا کرد (دستگاه تک‌دانه‌ساز)، تا بدین وسیله کدنویسی الگوریتم تسهیل و ویژگی‌های دانه‌ها به

طور مستقل استخراج و در الگوریتم منظور شود. برای این منظور یک جعبه فلزی به رنگ مشکی ساخته شد و روی آن سوراخ‌هایی به قطر ۱ میلی‌متر ایجاد شد. یک موتور با فن مکشی ۱۴۰۰ وات که در یک جعبه چوبی تعبیه شده است به منظور ایجاد مکش در جعبه فلزی به‌کاربرده شد. برای تنظیم سرعت دورانی موتور و مقدار مکش تولید شده، از یک دستگاه دیمر ۲۰۰۰ وات استفاده شد (شکل ۴). عملکرد دستگاه تک‌دانه ساز، در ۳ سطح مکش بر اساس حداکثر مقدار مکش موتور و دو سطح پایین‌تر از آن، (۳۵- تا ۴۰- ، ۴۵- تا ۵۰- و ۵۵- تا ۶۰- میلی‌متر جیوه) بررسی شد.

برای حرکت رفت و برگشت جعبه نگهدارنده دانه‌ها، یک موتور DC با گشتاور ۱۰ کیلوگرم در سانتی‌متر و با سرعت دورانی ۱۰ دور بر دقیقه به‌کارگرفته شد. به همین منظور یک برد الکترونیکی تهیه شد که با آن و با کمک میکروسوئیچ‌های تعبیه شده، حرکت موتور و توقف آن کنترل شود. با کمک برد الکترونیکی، ابتدا جعبه فلزی به سمت بالا منتقل و لحظه‌ای که به بالاترین نقطه می‌رسید با برخورد به میکروسوئیچ شماره یک متوقف می‌شد. در همین زمان دستگاه مکش شروع به کار می‌کرد و همزمان یک شیر برقی دریچه مسیر انشعابی خروجی پوست‌کن را باز می‌نمود تا دانه‌ها (شامل شلتوک و برنج سبوس‌دار) روی صفحهٔ فلزی ریخته شوند. پس از گذشت چند ثانیه (که قابل تنظیم بود) شیر برقی بسته و جعبه فلزی، در حالی‌که دستگاه مکش روشن بود، به همراه دانه‌های چسبیده به جعبه به سمت پایین حرکت می‌کرد. در پایین‌ترین نقطهٔ با برخورد به میکروسوئیچ شماره دو، جعبه فلزی متوقف و تصویربرداری می‌شد. بعد از گذشت چند ثانیه (که قابل تنظیم بود) مکش قطع می‌شد و دانه‌ها در اثر وزن خود روی زمین می‌ریختند.



شکل ٤- مجموعه تصویربرداری و دستگاه تک‌دانه ساز

۱- جعبه تصویر برداری، ۲- دستگاه مکش، ۳- برد الکترونیکی، ٤- موتور DC ، ۵- جعبه نگهدارنده دانه‌ها

در زمان قرار گرفتن جعبهٔ نگهدارنده دانه‌ها در مقابل جعبه تصویربرداری، نورپردازی و تصویربرداری انجام می‌شد. این تصویر از طریق پورت USB به رایانه منتقل و با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر، درصد شکستگی دانه‌های برنج محاسبه شد. برای جداسازی شلتوک از برنج و محاسبهٔ درصد شکستگی برنج، الگوریتم پردازش تصویر با به‌کارگیری نرم افزار متلب در دو فضا تهیه و کدنویسی شد. ابتدا از فضای باینری یا سیاه و سفید برای تعیین تعداد دانه‌های شکسته برنج بهره‌گیری شد (دانهٔ‌های سالم از شکسته با استفاده از مساحت دانه‌ها (تعداد پیکسل‌های سفید) تشخیص داده شد، لذا ابتدا مساحت یک دانه برنج سالم محاسبه و بر اساس آن دانه‌های شکسته که کمتر از سه چهارم یک دانه کامل می‌باشند، شناسایی گردید.) پس از آن از فضای رنگی برای جداسازی شلتوک از برنج سبوس‌دار و سبز، با آستانه‌گذاری اعداد مربوط به رنگ‌ها استفاده شد. دقت الگوریتم پردازش تصویر نیز با تعداد مشخصی از دانه‌های شلتوک و برنج سبوس‌دار ارزیابی شد.

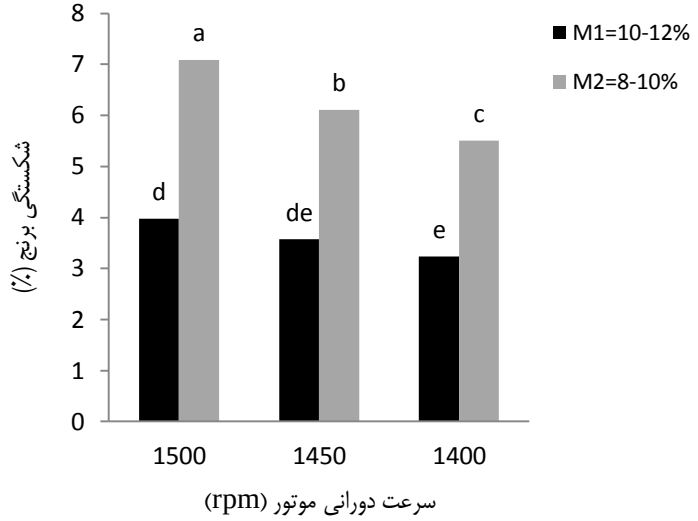
نتایج و بحث

نتایج تعیین شرائط کاری دستگاه پوست‌کن

نتایج تجزیهٔ واریانس شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج برای شلتوک دانه متوسط رقم لنجان نشان می‌دهد که اثر فاصلهٔ غلتک، میزان رطوبت شلتوک و اثر متقابل آنها بر شاخص پوست‌کنی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است. همچنین مشخص شد که اثر سرعت دورانی موتور، فاصلهٔ غلتک‌ها و رطوبت شلتوک بر درصد شکستگی برنج در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است. مقایسهٔ میانگین‌های شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج (رقم لنجان) ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک و سرعت دورانی موتور، حاکی از آن است که بیشترین شاخص پوست‌کنی در محدوده رطوبت ۱۰ تا ۱۲ درصد و سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه با مقدار ۷۹/۸۹ درصد و کمترین مقدار شاخص پوست‌کنی (۷۷/۴۴ درصد) در رطوبت ۸ تا ۱۰ درصد و سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه به‌دست آمده است که از نظر آماری نیز اختلاف معنی‌داری بین آنها وجود دارد. به نظر می‌رسد که با کاهش سرعت دورانی موتور، از سرعت خطی غلتک و اختلاف سرعت خطی غلتک تند و کند نیز کاسته خواهد شد و همین موضوع بر شاخص پوست‌کنی تاثیرگذار است که باعث کاهش آن شده است.

از نظر درصد شکستگی برنج (رقم لنجان)، بیشترین مقدار در رطوبت ۸ تا ۱۰ درصد و سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه با میزان ۷/۰۹ درصد و کمترین مقدار در رطوبت ۱۰ تا ۱۲ درصد و سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه به میزان ۳/۲۳ درصد است که از نظر آماری نیز دارای اختلاف معنی‌داری است. در رطوبت ۱۰ تا ۱۲ درصد بیشترین و کمترین مقدار درصد شکستگی برنج، به‌ترتیب در سرعت دورانی ۱۵۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه دیده می‌شود که دارای اختلاف معنی‌دار هستند (شکل ۵). این موضوع در رطوبت ۸ تا ۱۰ درصد نیز وجود دارد و نشان می‌دهد که شکستگی برنج با سرعت دورانی موتور نسبت مستقیم دارد و با کاهش سرعت دورانی موتور، شکستگی برنج نیز کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که با کاهش سرعت دورانی موتور، ضربات و تنش فشاری

کمتری از طرف غلتک‌های لاستیکی به دانه‌های برنج وارد خواهد شد که در نتیجه میزان شکستگی برنج کاهش می‌یابد. نتایج فوق نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب رطوبت شلتوک و سرعت دورانی موتور، می‌توان شکستگی برنج را ۵۴/۴ درصد کاهش داد. در تحقیق (صبوری هلستانی و روفیگری حقیقت، ۱۳۹۲) مشابه این نتیجه مشاهده می‌شود؛ این محققان میزان کاهش خرد برنج را ۵۸/۲ درصد گزارش داده‌اند.

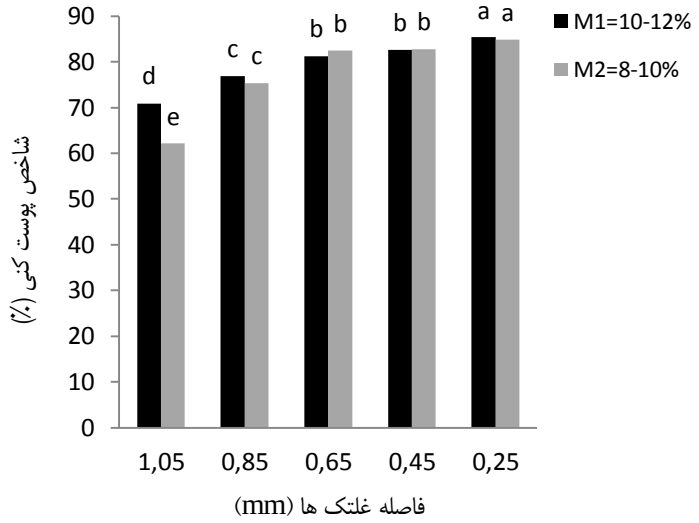


شکل ۵- مقایسه میانگین‌های مقادیر درصد شکستگی برنج ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک و سرعت دورانی موتور (رقم لنجان)

موضوع دیگری که از شکل ۵ مشخص می‌شود، تاثیر رطوبت شلتوک بر درصد شکستگی برنج است که نشان می‌دهد با کاهش رطوبت شلتوک، میانگین شکستگی برنج از ۳/۵۹ درصد به ۶/۲۳ درصد (حدود دو برابر) افزایش یافته است. با کاهش رطوبت، مقاومت دانه در برابر تنش‌های وارده کاهش می‌یابد و لذا شکستگی برنج بیشتر می‌شود (شاکر و علیزاده، ۱۳۸۲).

مقایسهٔ میانگین‌های شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج (رقم لنجان) ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک و فاصلهٔ غلتک نشان می‌دهد که بیشترین شاخص پوست‌کنی در رطوبت ۱۰ تا ۱۲ درصد و فاصلهٔ غلتک ۰/۲۵ میلی‌متر با مقدار ۸۵/۴۵ درصد و کمترین مقدار شاخص پوست‌کنی در رطوبت ۸ تا ۱۰ درصد و فاصله غلتک ۱/۰۵ میلی‌متر با ۶۲/۱۷ درصد است که از نظر آماری دارای اختلاف معنی‌دار هستند (شکل ۶). در محدوده رطوبت ۱۰ تا ۱۲ درصد، بیشترین و کمترین مقدار شاخص پوست‌کنی به‌ترتیب در فاصلهٔ غلتک ۰/۲۵ و ۱/۰۵ میلی‌متر دیده می‌شود. این موضوع در رطوبت ۸ تا ۱۰ درصد نیز مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد شاخص پوست‌کنی با فاصلهٔ غلتک نسبت عکس دارد و با کاهش فاصلهٔ غلتک مقدار شاخص پوست‌کنی افزایش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد، چون با کاهش فاصلهٔ غلتک، دانه‌های بیشتری در معرض تنش و برخورد غلتک قرار می‌گیرند، درصد

پوست‌گیری افزایش می‌یابد. از نظر درصد شکستگی برنج (رقم لنجان)، بیشترین مقدار (۶/۶۶ درصد) در رطوبت ۸ تا ۱۰ درصد و فاصلهٔ غلتک ۰/۲۵ میلی‌متر و کمترین مقدار (۳/۱۸ درصد) در رطوبت ۱۰ تا ۱۲ درصد و فاصلهٔ غلتک ۱/۰۵ میلی‌متر است که از نظر آماری بین تیمارها اختلاف معنی‌داری وجود دارد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که در رطوبت ۸ تا ۱۰ یا ۱۰ تا ۱۲ درصد، تغییر فاصلهٔ غلتک تاثیر معنی‌داری بر درصد شکستگی برنج ندارد.



شکل ٦- مقایسه میانگین‌های مقادیر شاخص پوست‌کنی ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک و فاصله غلتک (رقم لنجان)

نتایج تجزیه واریانس شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج برای شلتوک دانه بلند رقم شمیم نشان می‌دهد که اثر فاصلهٔ بین غلتک‌ها، رطوبت شلتوک، اثر متقابل آنها و سرعت دورانی موتور بر شاخص پوست‌کنی در سطح احتمال ۱ درصد معنی-دار است. همچنین مشخص می‌شود که اثر فاصلهٔ بین غلتک‌ها در سطح احتمال ۵ درصد و رطوبت شلتوک در سطح احتمال ۱ درصد بر شکستگی برنج معنی‌دار است.

مقایسهٔ میانگین‌های شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج (رقم شمیم) ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک و سرعت دورانی موتور نشان می‌دهد که بیشترین شاخص پوست‌کنی در رطوبت ۱۲–۱۰ درصد و سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه با ۴۹/۳۲ درصد و کمترین مقدار شاخص پوست‌کنی در رطوبت ۱۰–۸ درصد و سرعت دورانی ۱۴۵۰ دور بر دقیقه با ۳۳/۹۶ درصد است که از نظر آماری نیز اختلاف معنی‌داری میان آنها وجود دارد.

از نظر درصد شکستگی برنج (رقم شمیم)، بیشترین مقدار در رطوبت ۱۰–۸ درصد و سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه با ۳۲/۳۶ درصد و کمترین مقدار در رطوبت ۱۲–۱۰ درصد و سرعت دورانی ۱۴۵۰ دور بر دقیقه با ۲۷/۳۱ درصد است که از نظر آماری نیز دارای اختلاف معنی‌دار است. با توجه به اینکه در شلتوک دانه بلند، نسبت به شلتوک دانه متوسط، طول برنج حدوداً ۱/۵

برابر بلندتر است لذا به طور کلی میانگین شکستگی برنج دانه بلند بیشتر از دانه متوسط است. به‌نظر می‌رسد دلیل این موضوع افزایش بازوی گشتاور در صورت اعمال یک نیروی مساوی روی هر دو نوع دانه برنج باشد. در پژوهش (Goodman and Rao, 1985) نیز گزارش شده است که برنج‌های با طول بیشتر و ضخامت کمتر، نسبت به برنج‌های متوسط و کوتاه، در فرآیند تبدیل دچار شکستگی بیشتری می‌شوند؛ این نتیجه‌گیری با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

مقایسهٔ میانگین‌های مقادیر شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج (رقم شمیم) ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک و فاصلهٔ غلتک‌ها نشان می‌دهد که بیشترین شاخص پوست‌کنی در رطوبت ۱۰–۸ درصد و فاصلهٔ ۰/۲۵ میلی‌متر غلتک‌ها با مقدار ۵۴/۸۹ درصد و کمترین مقدار شاخص پوست‌کنی در رطوبت۱۰–۸ درصد و فاصلهٔ ۱/۰۵ میلی‌متر غلتک‌ها با ۲۰/۵۳ درصد است که از نظر آماری دارای اختلاف معنی‌دار هستند.

از نظر درصد شکستگی برنج (رقم شمیم)، بیشترین مقدار در رطوبت ۱۰–۸ درصد و فاصلهٔ ۱/۰۵ میلی‌متر غلتک‌ها با ۳۳/۳۷ درصد و کمترین مقدار در رطوبت ۱۲–۱۰ درصد و فاصلهٔ ۰/۸۵ میلی‌متر غلتک‌ها با ۲۶/۱۹ درصد است که از نظر آماری میان این دو تیمار اختلاف معنی‌دار وجود دارد. همچنین مشخص شد که در رطوبت ۱۰–۸ درصد یا ۱۲–۱۰ درصد، تغییر فاصلهٔ غلتک‌ها تاثیر معنی‌داری بر درصد شکستگی برنج ندارد.

نتایج ارزیابی الگوریتم پردازش تصویر و دستگاه تک‌دانه ساز

الگوریتم پردازش تصویر برای محاسبهٔ درصد شکستگی برنج در نرم افزار متلب کدنویسی شد. در این الگوریتم ابتدا تصویر رنگی خوانده و به تصویر باینری تبدیل شد. با توجه به اینکه دانهٔ سالم از دانهٔ شکسته در فضای سیاه و سفید و با استفاده از مساحت دانه‌ها (تعداد پیکسل‌های سفید) تشخیص داده می‌شود، ابتدا مساحت یک دانه برنج سالم محاسبه و بر اساس آن دانه‌های شکسته شناسایی شد. مشابه روش فوق، در پژوهش (Yadav and Jindal, 2001) نیز گزارش شده است. این محققان می‌گویند که اندازه‌گیری ویژگی‌های ابعادی نظیر طول، محیط و سطح در تصویر دو بعدی دانه‌های برنج می‌تواند برای ارزیابی کمی عملکرد برنج سالم به‌کاربرده شود.

برای جلوگیری از ایجاد مشکل در محاسبات به‌دلیل وجود ذرات ریز سفید رنگ (گرد و خاک) در تصویر، ابتدا ذرات ریز کمتر از ۳۵ پیکسل (یک چهارم سطح یک دانه سالم) در الگوریتم حذف و پس از آن با استفاده از دستورات متلب تعداد دانه‌های شکسته (K) محاسبه شد. از این قسمت الگوریتم به بعد، کار در فضای رنگی آغاز شد. ابتدا تصویر به کلاس دبل (Double) تبدیل و اعداد مربوط به رنگ‌های قرمز، سبز و آبی تفکیک شد؛ پس از حذف زمینه، نسبت اعداد مربوط به رنگ‌های آبی و قرمز

(B/R) محاسبه و با استفاده از آستانه‌گذاری، شلتوک‌های موجود در تصویر شناسایی و حذف شد. سپس تعداد دانه‌های برنج سبوس‌دار و سبز سالم (Z)، شمارش و بر اساس رابطهٔ ۲، درصد شکستکی برنج (F) محاسبه شد (Anonymous, 1981).

$$F = (K / (K + Z)) \times 100 \qquad (۲)$$

به منظور ارزیابی الگوریتم پردازش تصویر، مقداری شلتوک، برنج سبوس‌دار سالم و شکسته و برنج سبز به صورت دستی روی سوراخ‌های جعبه فلزی قرار داده شد. با به‌کارگیری جعبهٔ تصویربرداری از این نمونه تصویربرداری و فایل مورد نظر تهیه شد. سپس در نرم‌افزار متلب، الگوریتم اجرا شد و میزان شکستگی برنج (F) برابر با ۱۵/۴۶ درصد به‌دست آمد. برای محاسبه دقت اعداد به‌دست آمده، با شمارش تعداد دانه‌های شلتوک و برنج از روی تصویر، مشخص شد که تعداد دانه‌های برنج سالم و دانه‌های شکسته به‌ترتیب برابر با ۷۹ و ۱۶ است. بنابراین میزان شکستگی برنج برابر با ۱۶/۸۴ درصد است که به مقدار به‌دست آمده از الگوریتم بسیار نزدیک است. یعنی دقت عدد به‌دست آمده از الگوریتم برابر با ۹۱/۸۱ درصد است. در پژوهش (Sakai *et al.*, 1996) دقت جداسازی ارقام برنج با پردازش تصویر ۹۵/۴ درصد و در پژوهش (Wan *et al.*, 2002) ۹۵ درصد گزارش شده است. آنچه در پژوهش حاضر به‌دست آمده (۹۱/۸۱ درصد) با نتایج تحقیق پژوهشگران یاد شده بسیار نزدیک است. برای ارزیابی دستگاه تک‌دانه‌ساز، مقداری شلتوک، برنج سالم و شکسته روی جعبهٔ نگهدارندهٔ دانه‌ها ریخته و عملکرد دستگاه در ۳ سطح مکش با شمارش تعداد کل دانه‌های چسبیده به جعبه، دانه‌های جدا شده و دانه‌های به‌هم چسبیده محاسبه شد و درصد آنها به‌دست آمد (جدول ۳). نتایج نشان می‌دهد که مقدار مکش ۴۵- تا ۵۰- میلی‌متر جیوه با درصد جداسازی ۸۱/۳ درصد نسبت به دو مقدار دیگر (۳۵- تا ۴۰- و ۵۵- تا ۶۰-) مناسب‌تر است.

جدول ۳- نتایج ارزیابی دستگاه تک‌دانه ساز در سه سطح مکش

مقدار مکش (میلی‌متر جیوه)	تعداد کل دانه‌های چسبیده به جعبه	تعداد دانه‌های جدا شده	تعداد دانه‌های به‌هم چسبیده	درصد دانه‌های به‌هم چسبیده	درصد دانه‌های جدا شده
۳۵- تا ۴۰-	۸۶	۶۷	۱۹	۲۲/۱	۷۷/۹
۴۵- تا ۵۰-	۹۱	۷۴	۱۷	۱۸/۷	۸۱/۳
۵۵- تا ۶۰-	۱۰۲	۷۷	۲۵	۲۴/۵	۷۵/۵

نتیجه‌گیری کلی

۱- به‌منظور کاهش ضایعات برنج در دستگاه پوست‌کن، سامانه کنترل خودکار به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شد که پس از انتخاب نوع شلتوک، بر حسب رطوبت آن، بتواند فاصلهٔ غلتک‌ها و سرعت دورانی موتور محرک را در حد بهینه خود بر اساس بیشترین شاخص پوست‌کنی و کمترین درصد شکستگی برنج بدون دخالت اپراتور تنظیم کند (سرعت دورانی موتور سرعت خطی و اختلاف سرعت

خطی غلتک‌ها را تغییر می‌دهد). همچنین با نمونه‌گیری از خروجی دستگاه پوست‌کن و با به‌کارگیری سامانهٔ ماشین بینایی، میزان شکستگی برنج بررسی شد تا اگر از حد تنظیم شده بیشتر باشد با ارسال سیگنال به کنترلگر و کاهش سرعت دورانی موتور محرک، این عامل در حداقل ممکن تنظیم می‌شود.

۲- برای شلتوک دانه متوسط در رطوبت ۱۲-۱۰ درصد، فاصلهٔ غلتک‌ها برابر ۰/۲۵ میلی‌متر و سرعت موتور ۱۴۵۰ دور بر دقیقه با شاخص پوست‌کنی ۸۲/۶۵ درصد و شکستگی برنج ۳/۸۸ درصد و در رطوبت ۱۰- ۸ درصد، فاصلهٔ غلتک‌ها برابر ۰/۲۵ میلی‌متر و سرعت موتور ۱۴۰۰ دور بر دقیقه با شاخص پوست‌کنی ۸۱/۱۳ درصد و شکستگی برنج ۶/۰۸ درصد، مناسب‌ترین تیمار است.

۳- برای شلتوک دانه بلند در رطوبت ۱۲-۱۰ درصد، فاصلهٔ غلتک‌ها برابر ۰/۶۵ میلی‌متر و سرعت موتور ۱۴۵۰ دور بر دقیقه با شاخص پوست‌کنی ۵۱/۴۰ درصد و شکستگی برنج ۲۷/۴۶ درصد و در رطوبت ۱۰- ۸ درصد، فاصلهٔ غلتک‌ها برابر ۰/۲۵ میلی‌متر و سرعت موتور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه با شاخص پوست‌کنی ۴۶/۵۹ درصد و شکستگی برنج ۳۱/۵۱ درصد، مناسب‌ترین تیمار است.

۴- نتایج تحقیق نشان می‌دهد که بدون به‌کارگیری این سامانه و با انتخاب ۱۵۰۰ دور بر دقیقه برای سرعت دورانی موتور و ۰/۶۵ میلی‌متر برای فاصلهٔ غلتک‌ها (بیشترین سرعت دورانی موتور و میانگین فاصله بین غلتک‌ها که معمولاً در کارگاه‌ها توسط اپراتور تنظیم می‌شود)، برای شلتوک دانه متوسط شاخص پوست‌کنی برابر با ۶۱/۵۸ درصد و شکستگی برنج برابر با ۷/۵۱ درصد است. برای شلتوک دانه بلند، شاخص پوست‌کنی و شکستگی برنج به‌ترتیب برابر با ۱۹/۱۴ و ۳۵/۰۳ درصد است.

۵- نتایج ارزیابی الگوریتم پردازش تصویر برای محاسبهٔ درصد شکستگی برنج در یک نمونه نشان می‌دهد که میزان شکستگی برنج در الگوریتم برابر با ۱۵/۴۶ درصد است درحالی‌که مقدار واقعی آن برابر با ۱۶/۸۴ درصد محاسبه شده است. یعنی دقت عدد به‌دست آمده از الگوریتم برابر با ۹۱/۸۱ درصد است.

۶- نتایج ارزیابی دستگاه تک‌دانه ساز برای به‌دست آوردن حداقل مقدار مکش جهت نگه‌داشتن دانه‌های شلتوک و برنج روی جعبهٔ نگهدارنده دانه، نشان می‌دهد که مقدار مکش ۴۵- تا ۵۰- میلی‌متر جیوه با میزان جداسازی ۸۱/۳ درصد مناسب‌ترین مقدار است.

فهرست منابع

آمارنامه سالانه کشاورزی. ۱۳۹۳. وزارت جهاد کشاورزی، معاون برنامه‌ریزی، دفتر آمار و اطلاعات.

پیمان، م. ح.، توکلی هشتجین، ت.، و مینایی، س. ۱۳۷۸. تعیین فاصله مناسب بین غلطک‌ها در پوست‌کن غلطک لاستیکی برای تبدیل سه رقم برنج متداول در استان گیلان. مجله علمی پژوهشی علوم کشاورزی، سال پنجم، شماره ۲۰، صفحه ۳۷-۴۸.

ذرعی فروش، ح.، مینایی، س.، علیزاده، م. ر.، بناکار، ا.، حسین‌زاده، ب.، و منتظری، م. ۱۳۹۴. پایش عملکرد دستگاه سفیدکن برنج با توسعه سامانه کنترل خودکار مبتنی بر بینایی ماشین و منطق فازی. نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران، دانشگاه تهران، ۲ تا ۳ اردیبهشت ماه ۱۳۹۴، تهران.

شاکر، م.، و علی‌زاده، م. ر. ۱۳۸۲. بررسی اثر رطوبت شلتوک بر میزان شکستگی برنج و راندمان تبدیل. اولین کنفرانس ملی ضایعات محصولات کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

صبوری هلستانی، ص.، و روفی‌گری حقیقت، ش. ۱۳۹۲. تأثیر نوع ماشین پوست‌کن و درصد پوست‌گیری شلتوک بر کیفیت بـرنج تولیدی. بیست و یکمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه شیراز، شیراز.

Afzalinia, S., M. Shaker, and E. Zare. 2004. Comparison of different rice milling methods. Canadian biosystems engineering. 46: 3.63–3.66.

Anonymous. 1981. Development and evaluation of processing equipment, Tech. Bulletin No. CIAE/PHTS/81/24, CIAE, Nabi Bagh, Berasia Road, Bhopal, 10 pp.

Firouzi, S., M. R. Alizadehand, and S. Minaei. 2010. Effect of rollers differential speed and paddy moisture content on performance of rubber roll husker. World Academy of Science, Engineering and Technology. 47: 687-690.

Goodman, D. E., and R. M. Rao. 1985. Effect of grain type and milled rice kernel hardness on the head rice yield. Journal of Food Science. 50: 840-842.

- Sakai, N., S. Yonekawa, and A. Matsuzaki. 1996. Two-dimensional image analysis of the shape of rice and its application to separating varieties. Journal of Food Engineering. 27: 397-407.

Wan, Y. N., C. M. Lin, and J. F. Chiou. 2002. Rice quality classification using an automatic grain quality inspection system. Transactions of the ASAE. 45(2): 379–387.

Yadav, B. K., and V. Jindal. 2001. Monitoring milling quality of rice by image analysis. Computers and Electronics in Agriculture. 33: 19-33.