

به کارگیری ماشین بینایی به منظور اصلاح عملکرد و کاهش ضایعات در دستگاه

پوست کن شلتوک

محمد شاکر، سعید مینایی*، محمدهادی خوش تقاضا، احمد بناکار

و عبدالعباس جعفری**

* نگارنده مسئول: دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. تلفن: ۴۸۲۹۲۴۶۶ (۰۲۱)، پیام‌نگار: minaee@modares.ac.ir
** به ترتیب: دانشجوی دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی، استاد، دانشیار و استادیار گروه بیوسیستم دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس؛ و استادیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۸

چکیده

در این پژوهش، به منظور اصلاح عملکرد دستگاه پوست کن شلتوک و کاهش ضایعات برنج، سامانه کنترل خودکار و ماشین بینایی طراحی، ساخته و آزمایش شد. این سامانه به گونه‌ای طراحی شد که بر حسب نوع و میزان رطوبت شلتوک بتواند فاصله غلتک‌ها و سرعت دورانی موتور را به مقدار بهینه تنظیم کند. پس از آن با به کارگیری سامانه ماشین بینایی و دستگاه تک‌دانه‌ساز، میزان شکستگی برنج تعیین شد. میزان شکستگی برنج اگر بیش از حد مورد نظر بود تنظیمات لازم روی دستگاه پوست کن انجام می‌شد. شرایط کاری دستگاه پوست کن، برای دو رقم شلتوک با اعمال تیمارهای رطوبت شلتوک، فاصله غلتک‌ها و سرعت دورانی موتور بررسی و فاکتورهای شاخص پوست کنی و درصد شکستگی برنج اندازه‌گیری شد. الگوریتم پردازش تصویر به منظور تعیین درصد شکستگی برنج در نرم افزار متلب کدنویسی و ارزیابی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب سرعت دورانی موتور و فاصله غلتک‌ها برای شلتوک دانه متوسط، میانگین شاخص پوست کنی برابر با ۸۲/۶۵ درصد و میانگین شکستگی برنج سبوس‌دار برابر با ۳/۸۸ درصد است. برای شلتوک دانه بلند، میانگین شاخص پوست کنی و شکستگی برنج به ترتیب برابر با ۵۱/۴۰ و ۲۷/۴۶ درصد است. در حالی که بدون به کارگیری این سامانه و با انتخاب نامناسب سرعت دورانی موتور و فاصله غلتک‌ها، برای شلتوک دانه متوسط، شاخص پوست کنی برابر با ۶۱/۵۸ درصد و شکستگی برنج برابر با ۷/۵۱ درصد است. برای شلتوک دانه بلند، شاخص پوست کنی و شکستگی برنج به ترتیب برابر با ۱۹/۱۴ و ۳۵/۰۳ 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 شرایط کاری برای دستگاه پوست کن به صورت خودکار فراهم آمد.

واژه‌های کلیدی

پوست کن، شلتوک، کنترل خودکار، ماشین بینایی

مقدمه

مراحل مختلف تولید و به ویژه در عملیات پس از برداشت یکی از راهکارهای عملی و مؤثر به منظور دستیابی به افزایش تولید داخل و کاهش واردات این محصول محسوب می‌شود، به طوری که حتی یک درصد کاهش ضایعات، با توجه به تولید زیاد این محصول، چشم‌گیر خواهد بود. در

برنج دومین محصول استراتژیک، نقش تعیین کننده‌ای در تأمین نیاز غذایی مردم کشور ما دارد و به علت وجود ویتامین‌ها، مواد معدنی و نشاسته یک ماده غذایی پر مصرف به شمار می‌رود. کاهش ضایعات در

علیزاده (Shaker & Alizadeh, 2003) بررسی کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که مناسب‌ترین محدوده 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 محدوده رطوبتی است. به منظور مقایسه مقدار ضایعات تبدیل برنج، علیزاده و پیمان (Alizadeh & Peiman, 2004) دو روش یکی پوست‌کن غلتک لاستیکی + سفیدکن تیغه‌ای و دیگری پوست‌کن تیغه‌ای + سفیدکن تیغه‌ای را بر روی سه رقم هاشمی، بینام و خزر بررسی کردند. در هر یک از دو روش، درصد خرده برنج قهوه‌ای و سفید اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که میانگین مقدار خرده برنج قهوه‌ای در دو روش اول و دوم به ترتیب ۷/۰۶ و ۱۰/۰۵ درصد و مقدار خرده برنج سفید به ترتیب ۱۹/۴۱ و ۲۲/۶۰ درصد است. صبوری هلسستانی و روفیگری حقیقت (Saburi Helestanti & Rufigari Haghghat, 2013) دو نوع پوست‌کن غلتک لاستیکی و تیغه‌ای با سه سطح پوست‌گیری شلتوک را برای رقم هاشمی بررسی کردند و درصد خرد، راندمان تبدیل و درجه سفیدی نمونه‌ها را به دست آوردند. نتایج نشان داد که به کارگیری 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. در پژوهشی، فیروزی و همکاران (Firouzi et al., 2010) اثر اختلاف سرعت محیطی غلتک‌ها و رطوبت شلتوک را در یک پوست‌کن غلتک لاستیکی روی شاخص پوست‌کنی و درصد برنج شکسته بررسی کردند. نتیجه 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

استان فارس در سال زراعی ۹۲-۹۱ میزان تولید شلتوک، بیش از ۲۰۰ هزار تن در سطح ۴۸۶۹۲ هکتار بوده است (سالنامه آماری استان فارس، ۱۳۹۲). از مراحل که نقش مهمی در مقدار ضایعات برنج دارد، تبدیل شلتوک به برنج سفید است که شامل چهار مرحله 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 (Payman et al., 1999). 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 به کارگیری فناوری‌های نوین، همچون پردازش تصویر، می‌تواند راهکاری مؤثر و دقیق در کنترل و بهسازی عملکرد دستگاه‌های پوست‌کن باشد. هدف از اجرای این پژوهش، به کارگیری سامانه کنترل خودکار و ماشین بینایی در دستگاه پوست‌کن غلتک لاستیکی شلتوک به منظور اصلاح عملکرد و کاهش ضایعات برنج است. در اینجا به چند نمونه از تحقیقات انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود. افضل‌نیا و همکاران (Afzalnia et al., 2004)، با مقایسه 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. محدوده‌های مختلف رطوبت شلتوک، از نظر درصد ترک و شکستگی برنج روی ارقام دانه متوسط و دانه بلند را شاکر و

تفکیک شد. نرم افزار ویژه بازرسی کیفیت برنج برای بهبود دقت تفکیک دانه ها و عملکرد ماشین تدوین شد. نتایج نشان داد که سامانه بازرسی خودکار، در مقایسه با بازرسی انسانی، می تواند بیش از ۹۰ درصد دانه های برنج را به طور صحیح دسته بندی کند. دسته بندی دانه های سالم، گچی و ترک دار 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. یائو و همکاران (Yao et al., 2014) برای تصویر برداری آسان تر گیاهپُر^۲ در ساقه های برنج، یک دستگاه دستی و برای شمارش این حشره بر اساس پردازش تصویر، یک روش خودکار ارائه دادند. دستگاه دستی شامل یک دوربین دیجیتال با اینترنت بی سیم و یک گوشی هوشمند بود. آنها از این روش برای شناسایی و شمارش گیاهپُر روی تصاویر گیاه برنج بهره گیری کردند. این روش به عنوان یک روش آسان، سریع و دقیق برای برآورد تراکم جمعیت گیاهپُر برنج در مزارع شلتوک معرفی شد. به منظور تعیین محل و نوع گچی بودن برنج (قسمت های سفید شده درون دانه که یک عیب در برنج محسوب می شود)، سان و همکاران (Sun et al., 2014) تکنیک های پردازش تصویر را برای دانه برنج به کار بردند. دانه های برنج متصل (به هم چسبیده)، با به کارگیری یک روش تطبیق نقطه محدب^۳ از یکدیگر جدا شدند. گچی بودن بر اساس تفاوت در سطوح خاکستری بین گچ و مناطق طبیعی در دانه برنج استخراج شد. دانه های برنج گچی به کمک ماشین بردار پشتیبان^۴ و بر اساس مقدار گچی بودن برنج طبقه بندی شدند. نتایج تحقیقات نشان داد که با استفاده از این روش می توان ۲ تا ۵ دانه برنج متصل را با دقت از یکدیگر جدا و مناطق گچی را استخراج کرد. دقت طبقه بندی برای برنج هندی و ژاپنی به ترتیب برابر با ۹۸/۵ و ۹۷/۶ درصد بود. در پژوهشی، یک سامانه هوشمند با استفاده از ماشین بینایی و منطق فازی برای درجه بندی کیفیت محصول خروجی از دستگاه سفیدکن

به ۹/۹۷ درصد کاهش پیدا می کند. براساس تحقیقات گودمن و رائو (Goodman & Rao, 1985) برنج های با طول بیشتر و ضخامت کمتر نسبت به برنج های متوسط و کوتاه در فرآیند تبدیل دچار شکستگی بیشتری می شوند. افزون بر این، بررسی های آماری نشان می دهد که برنج های کوتاه در فرآیند تبدیل، در مقایسه با برنج های بلند و متوسط، تحت تاثیر نیروی کمتری هستند. به منظور تحلیل شکل های برنج سبوس دار و سفید شده، با پردازش تصویر روی چهار رقم برنج با سه روش سفید کردن ساکایی و همکاران (Sakai et al., 1996) فاکتورهای سطح، محیط، بیشینه طول، بیشینه پهنا، سفتی و مقاومت کششی را اندازه گیری کردند. نتایج این پژوهش روی دانه های برنج سبوس دار و سفید شده نشان داد که جداسازی ارقام برنج با پردازش تصویر در سطح احتمال ۹۵/۴ درصد با بهره گیری از فاکتورهای ابعاد و شکل امکان پذیر است. پژوهش های یاداو و جیندال (Yadav & Jindal, 2001) نشان می دهد که به منظور کاهش تلفات اقتصادی در تبدیل شلتوک به برنج سفید، کنترل درجه سفیدی و درصد شکستگی دانه های برنج ضروری است. به همین منظور این محققان پردازش تصویر دیجیتال را برای تعیین عملکرد برنج سالم و سفیدی برنج به کار بردند و دانه های با اندازه سه چهارم یک دانه کامل یا بیشتر را به عنوان دانه سالم در نظر گرفتند. از تصویر هر دانه برنج، ویژگی های ابعادی نظیر طول، محیط و سطح دانه اندازه گیری شد و برای محاسبه نسبت ابعاد ویژه^۱ استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تصویر دو بعدی دانه های برنج می تواند برای ارزیابی کمی عملکرد برنج سالم و درجه سفیدی برنج و کنترل بهتر عملیات تبدیل شلتوک به برنج سفید به کار برده شود. وان و همکاران (Wan et al., 2002) عملکرد یک سامانه بازرسی خودکار را برای دسته بندی کیفیت برنج آزمایش کردند. با این سامانه دانه های سالم، ترک دار، گچی، نارس، خشکیده، شکسته و آسیب دیده از یکدیگر

1- Characteristic Dimension Ratio
3- Convex Point Matching Method

2- Planthopper
4- Support Vector Machine (SVM)

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 مخلوط دانه و پوست در مسیری قرار می‌گیرد که نیروی مکش یک مکنده به آن اعمال خواهد شد. بدین ترتیب پوست که سبک‌تر است از مخلوط جدا می‌شود. در زیر دستگاه نیز مخلوطی از برنج سبوس‌دار سالم، شکسته و شلتوک‌های پوست‌گیری نشده جمع‌آوری می‌شود. سامانه 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، فاصله بین غلتک و سرعت دورانی موتور محرک به مقدار بهینه خود (بر اساس 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).

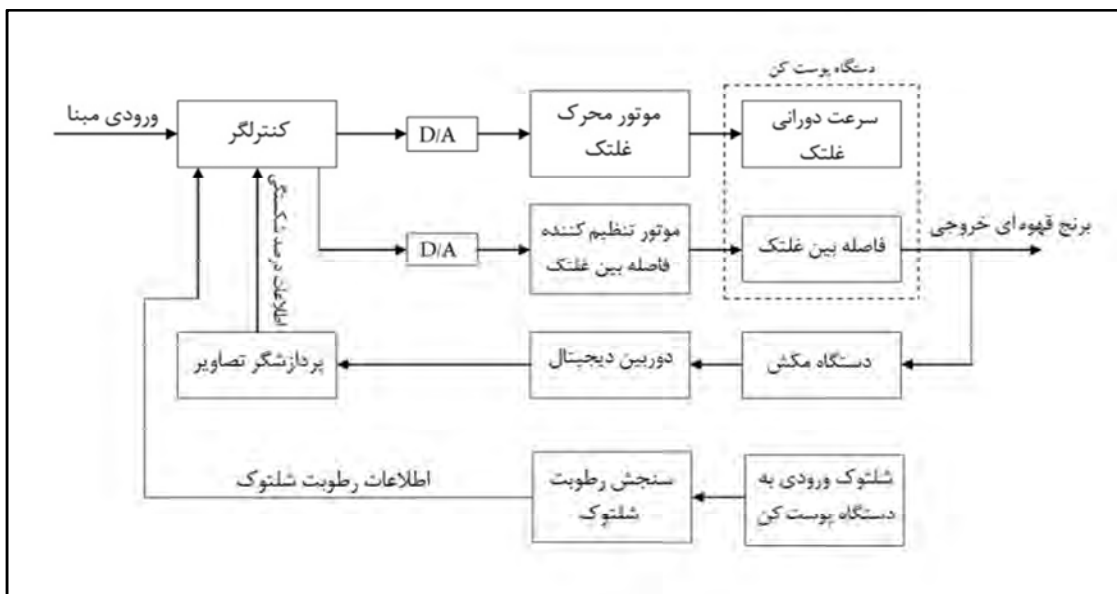
برنج و کنترل پارامترهای عملکردی دستگاه - با توجه به شاخص‌های درجه سفیدی و درصد دانه‌های شکسته - ایجاد گردید. سامانه کنترل متشکل از واحد نمونه‌گیری از محصول خروجی دستگاه سفیدکن، واحد تک‌سازی و انتقال محصول، واحد تصویربرداری و پردازش تصویر، و واحد کنترل فازی بود. ارزیابی عملکرد سامانه کنترل خودکار نشان داد که دقت سامانه کنترل در تعیین شرایط کاری مناسب برای عملکرد کنترلی برابر با ۸۹/۲ درصد است (Zarei Forush *et al.*, 2015). 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، همچنین در باره دستگاه پوست‌کن و کنترل خودکار آن پژوهشی نشده است، از این رو به منظور رفع این کمبود، تحقیق حاضر اجرا شد.

مواد و روش‌ها

برای اجرای این پژوهش، یک دستگاه پوست‌کن غلتک لاستیکی شلتوک آزمایشگاهی به کارگرفته شد که پیمان و همکاران (Payman *et al.*, 1999) ساخته بودند (شکل ۱). در این دستگاه شلتوک از مخزن دستگاه وارد و



شکل ۱- مجموعه، کامل دستگاه پوست‌کن و سامانه کنترل خودکار



شکل ۲- نمودار روند نمای سامانه کنترل خودکار دستگاه پوست کن

دستگاه رطوبت سنج شلتوک

دستگاه آون، واسنجی شده بود. برای واسنجی رطوبت سنج 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 می شود که این حسگر، رطوبت نسبی هوای توده شلتوک را اندازه گیری می کند و نشان می دهد.

به منظور اندازه گیری میزان رطوبت شلتوک ورودی به دستگاه پوست کن، یک مدار الکترونیکی مجهز به حسگر رطوبت مدل SHT 15 تهیه و آزمایش های لازم برای واسنجی آن به شرح زیر اجرا شد (شکل ۳). مقداری شلتوک در رطوبت های مختلف تهیه شد، برای این کار دستگاه رطوبت سنج رسا ۳۰۰۰ با دقت ± 0.1 درصد به کار گرفته شد که به روش وزنی و با استفاده از

جدول ۱- خروجی حسگر رطوبت به تناسب محدوده رطوبت شلتوک

| محدوده رطوبت شلتوک (درصد) | 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 اندازه گیری گردید.

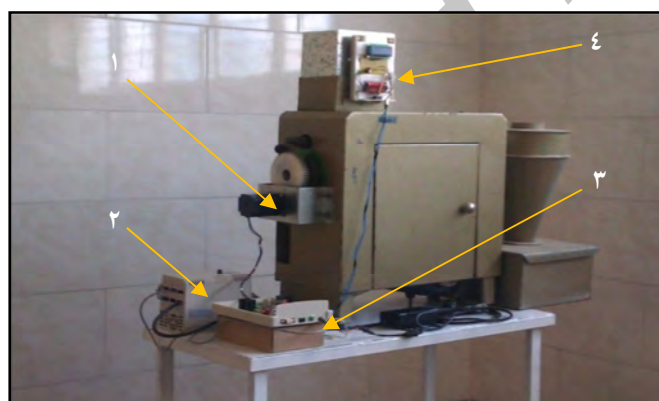
تنظیم فاصله بین غلتکها و نصب موتور پله ای

نیاز بین غلتکها (۰/۲۵، ۰/۴۵، ۰/۶۵، ۰/۸۵ و ۱/۰۵ میلی متر) اندازه گیری شود (Payman et al., 1999). برای اندازه گیری گشتاور، از یک نیروسنج دیجیتال (مدل WeiHeng با دقت ۱۰ گرم) استفاده شد و با آن مقدار نیروی مورد نیاز برای به حرکت در آوردن محور

فاصله بین غلتکهای پوست کن با چرخاندن یک محور تنظیم خواهد شد و از این رو لازم است حدود گشتاور مورد نیاز برای به حرکت در آوردن آن و همچنین جا به جایی زاویه ای محور برای تنظیم فاصله های مورد

۱/۸ درجه در هر پله، انتخاب و تهیه شد. برای اتصال موتور پله‌ای به محور دستگاه پوست‌کن، از دو عدد چرخ‌دنده (از جنس آلومینیم) 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 و در نتیجه جریان مصرفی آن کاهش یابد. ضمناً این انتخاب نسبت چرخ‌دنده‌ها باعث شد دقت چرخش محور دستگاه پوست‌کن به چهار برابر افزایش یابد. یعنی در هر استپ که محور موتور ۱/۸ درجه می‌چرخد، محور دستگاه پوست‌کن ۰/۴۵ درجه حرکت می‌کند.

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 زاویه حرکت محور، یک نقاله ۳۶۰ درجه اطراف آن نصب و با استفاده از شاخص نصب شده روی محور، زاویه حرکت آن اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است (نقاله به گونه‌ای نصب شد که صفر آن در بالای محور قرار داشت و در این حالت فاصله بین غلتک‌ها ۰/۲۵ میلی‌متر بود). فاصله بین غلتک‌ها نیز با فیلر (با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. با توجه به گشتاور مورد نیاز و زاویه حرکت محور، استپر موتور مدل 57PH20 با گشتاور ۲ نیوتن متر و زاویه چرخش



شکل ۳- سامانه کنترل خودکار و اجزای آن

۱- موتور پله‌ای، ۲- اینورتر، ۳- برد الکترونیکی، ۴- رطوبت‌سنج شلتوک

جدول ۲- محدوده زاویه چرخش محور به تناسب فاصله بین غلتک‌ها

| محدوده زاویه چرخش شافت (درجه) | محدوده فاصله 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 |

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

تنظیم سرعت دورانی الکتروموتور با به‌کارگیری دستگاه اینورتر

با توجه به اینکه الکتروموتور (ساخت شرکت موتوزن) نصب شده روی دستگاه پوست‌کن از نوع تکفاز با توان

محرك با اینورتر تنظیم شد. با توجه به سطوح تیمارهای مورد ارزیابی، برای هر رقم شلتوک با احتساب سه تکرار جمعا ۹۰ آزمایش اجرا شد.

در هر آزمایش پس از تنظیم فاصله غلتکها و سرعت دورانی موتور، مقدار ۲۰۰ گرم شلتوک وارد دستگاه پوست کن شد. پس از پوست گیری، 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. داده‌های خام به نرم‌افزار اکسل منتقل و محاسبات لازم انجام شد. فاکتور شاخص پوست کنی از رابطه ۱ محاسبه شد. درصد شکستگی برنج برابر با نسبت دانه‌های شکسته به مجموع دانه‌های برنج سیوس دار سالم و شکسته است (Anon, 1981). پس از محاسبه فاکتورهای شاخص پوست کنی و درصد شکستگی برنج، آنالیز آماری داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS ادامه یافت و نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها به دست آمد.

$$HI = 100 \left(1 - \frac{W_2}{W_1} \right) \left(\frac{W_3}{W_1 - W_2 - W_4} \right) \quad (1)$$

که در آن،

HI = شاخص پوست کنی (درصد)؛ W_1 = وزن شلتوک وارد شده به پوست کن (گرم)؛ W_2 = وزن شلتوک خارج شده از پوست کن (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 که

مدل LS600-20-5S با توان ۰/۴ کیلووات تهیه و پس از تنظیم الکتروموتور به صورت مثلث، با اینورتر راه‌اندازی شد (شکل ۳).

به منظور تنظیم سرعت دورانی الکتروموتور محرك دستگاه پوست کن و تعیین سرعت خطی غلتک‌های تندگرد و کندگرد، با به کارگیری 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 به دست آمد. یادآوری می‌شود که قطر غلتک‌های تندگرد و کندگرد به ترتیب ۱۰/۵ و ۱۱ سانتی‌متر بود.

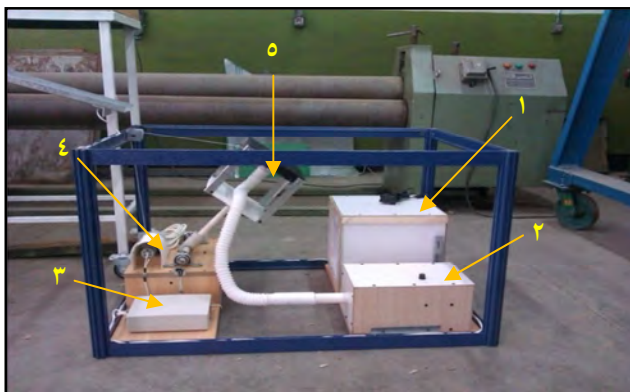
تعیین شرایط کاری دستگاه پوست کن شلتوک

به منظور تعیین شرایط کاری دستگاه پوست کن، برای دو رقم شلتوک (دانه متوسط و دانه بلند)، اثر تیمارهای رطوبت شلتوک (در دو محدوده رطوبتی ۱۰-۱۲ درصد M_1 و ۸-۱۰ درصد M_2)، فاصله بین غلتکها (در پنج سطح $C_1=1/0.5$ ، $C_2=0/85$ ، $C_3=0/65$ ، $C_4=0/45$ و $C_5=0/25$ میلی‌متر) و سرعت دورانی موتور محرك (در سه سطح $R_1=1500$ ، $R_2=1450$ و $R_3=1400$ دور بر دقیقه) بر فاکتورهای شاخص پوست کنی 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.

ابتدا حدود ۶۰ کیلوگرم شلتوک دانه متوسط (رقم لنجان) و دانه بلند (رقم شمیم) تهیه شده و در دو محدوده رطوبتی مورد نظر در آفتاب خشک شد. رطوبت دانه‌ها با به کارگیری دستگاه رطوبت‌سنج رسا ۳۰۰۰ که از قبل با استفاده از آن واسنجی شده بود اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌های ۲۰۰ گرمی شلتوک با استفاده از ترازوی دیجیتالی، در پلاستیک‌های جداگانه تهیه شد. فاصله بین غلتکها با به کارگیری محور مربوط و چرخش مقدار زاویه لازم مطابق جدول ۲ تنظیم شد. سرعت دورانی موتور

۲۰ × ۲۰ × ۳ سانتی‌متر ساخته شد. روی جعبه به فواصل ۱۵ میلی‌متر سوراخ‌هایی به قطر ۱ میلی‌متر ایجاد شد. رنگ مشکی مات که مناسب زمینه تصویربرداری است، برای رنگ‌آمیزی روی جعبه فلزی به‌کاربرده شد. یک موتور با فن مکشی ۱۴۰۰ وات که در یک جعبه چوبی تعبیه شده است به منظور ایجاد مکش در جعبه فلزی به کار برده شد. این دو جعبه با یک لوله خرطومی پلاستیکی به یکدیگر متصل شدند. 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 صفحه فلزی ریخته شوند. پس از گذشت چند ثانیه (که قابل تنظیم بود) شیر برقی بسته و جعبه فلزی، در حالی که دستگاه مکش روشن بود، به همراه دانه‌های چسبیده به جعبه به سمت پایین حرکت می‌کرد. در پایین‌ترین نقطه 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.

توضیحات هر قسمت ارائه شد. 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 به دست آمده از شرایط کاری دستگاه پوست‌کن، فاصله بین غلتک‌ها و سرعت دورانی الکتروموتور محرک دستگاه (با به کارگیری 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). یک صفحه چوبی که وسط آن به شکل مربع بریده شده است در وسط جعبه، به نحوی تعبیه شد که از انعکاس نور به درون دوربین جلوگیری کند ضمن اینکه مانع تصویربرداری نیز نشود. برای نورپردازی از دو عدد لامپ فلورسنت با نور 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 به کمک 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 ابعاد



شکل ۴- مجموعه تصویربرداری و دستگاه تکدانه ساز
 ۱- جعبه تصویر برداری، ۲- دستگاه مکش، ۳- برد الکترونیکی، ۴- موتور DC، ۵- جعبه نگهدارنده دانه‌ها

تعداد مشخصی از دانه‌های شلتوک و برنج سبوس‌دار ارزیابی شد.

نتایج و بحث

نتایج تعیین شرایط کاری دستگاه پوست‌کن

نتایج تجزیه واریانس شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج برای شلتوک دانه متوسط رقم لنجان نشان می‌دهد که اثر فاصله 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، فاصله غلتک‌ها و رطوبت شلتوک بر درصد شکستگی برنج در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۳).

در زمان قرارگرفتن جعبه 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 محاسبه درصد شکستگی برنج، الگوریتم پردازش تصویر با به کارگیری 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 و 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

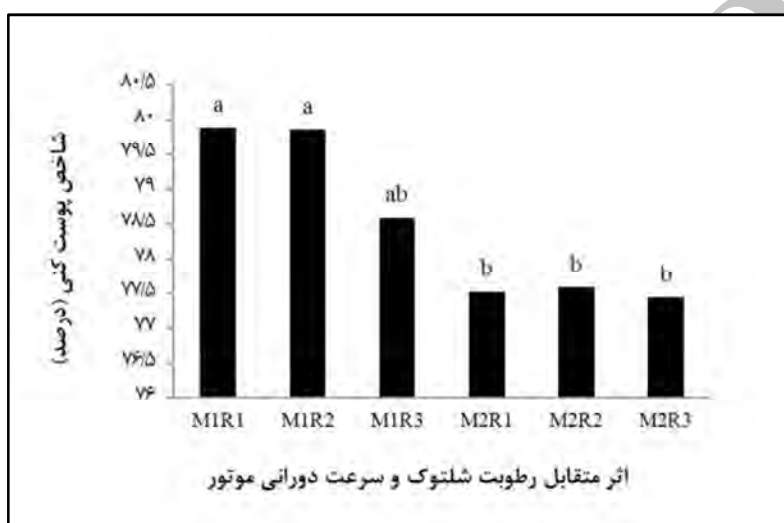
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس مقادیر شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج برای شلتوک دانه متوسط (رقم لنجان)

| منابع | درجه آزادی | میانگین مربعات | |
|-----------------------|------------|----------------------|----------------------|
| | | شاخص پوست‌کنی | درصد شکستگی برنج |
| سرعت دورانی موتور (R) | ۲ | ۴/۸۸ ^{ns} | ۱۰/۲۶ ^{**} |
| فاصله غلتک‌ها (C) | ۴ | ۹۹۸/۳۲ ^{**} | ۲/۰۲ ^{**} |
| اثر متقابل R * C | ۸ | ۳/۴۸ ^{ns} | ۰/۲۶ ^{ns} |
| رطوبت شلتوک (M) | ۱ | ۸۳/۳۷ ^{**} | ۱۵۷/۱۳ ^{**} |
| اثر متقابل R * M | ۲ | ۳/۳۹ ^{ns} | ۱/۳۸ ^{ns} |
| اثر متقابل C * M | ۴ | ۷۰/۴۴ ^{**} | ۰/۲۴ ^{ns} |
| اثر متقابل R * C * M | ۸ | ۳/۴۷ ^{ns} | ۰/۲۷ ^{ns} |
| خطا | ۶۰ | ۳/۹۹ | ۰/۵۱ |

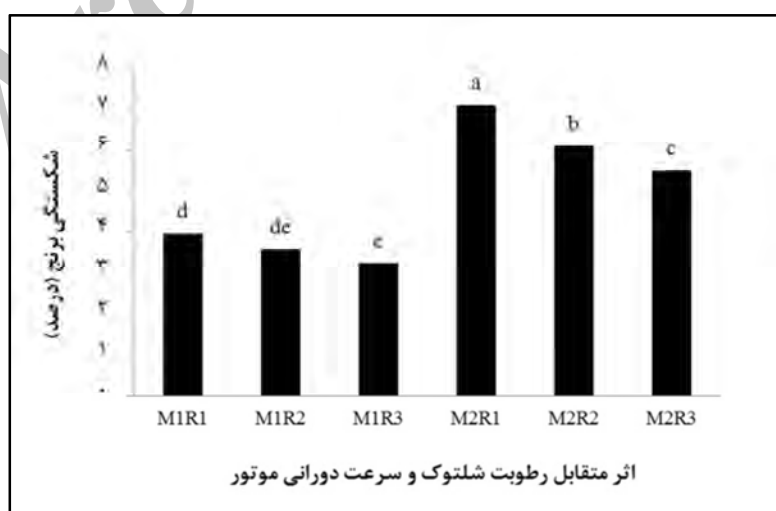
^{**} اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ^{*} اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ^{ns}: نبود اختلاف معنی‌دار

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.

مقایسه میانگین‌های شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج (رقم لنجان) ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک و سرعت دورانی موتور (شکل‌های ۵ و ۶) 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



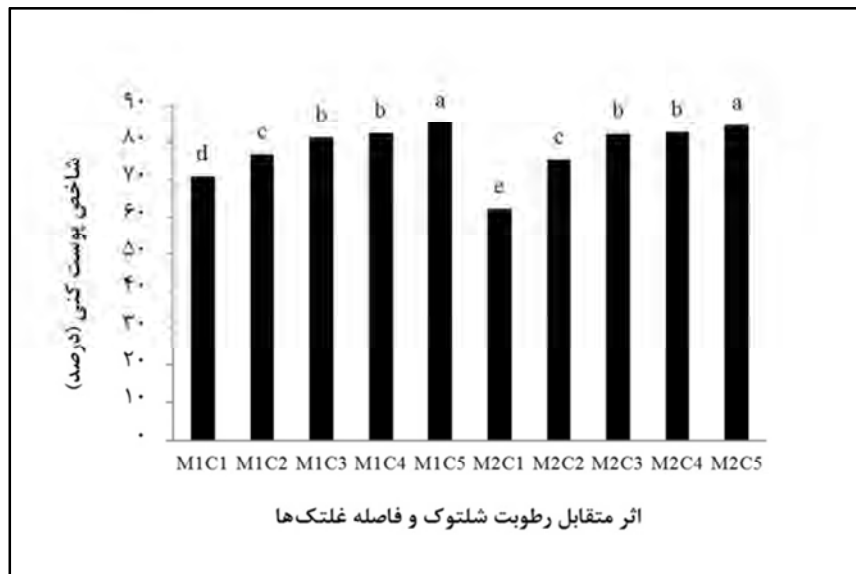
شکل ۵- مقایسه میانگین‌های شاخص پوست‌کنی ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک (M) و سرعت دورانی موتور (R) (رقم لنجان). (حروف مشابه نشان دهنده نبود اختلاف معنی‌دار است)



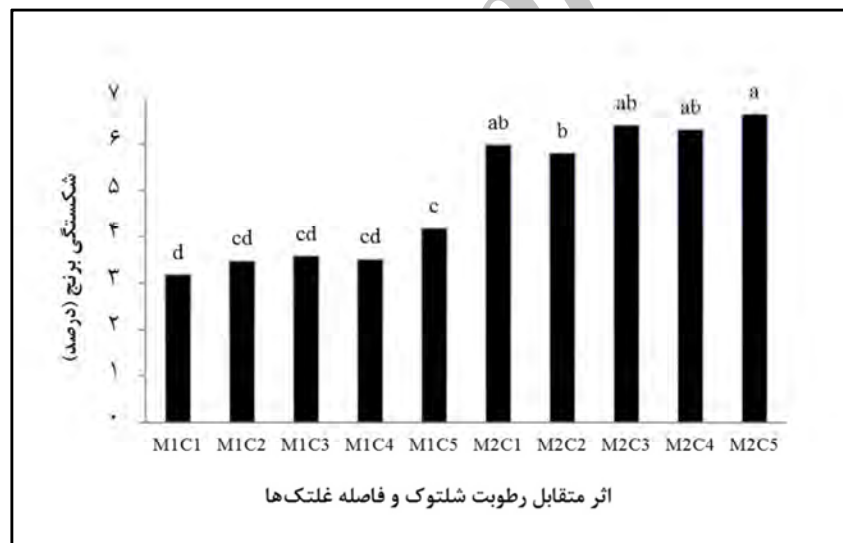
شکل ۶- مقایسه میانگین‌های درصد شکستگی برنج در اثر متقابل رطوبت شلتوک (M) و سرعت دورانی موتور (R) (رقم لنجان). (حروف مشابه نشان دهنده نبود اختلاف معنی‌دار است)

تنش‌های وارده کاهش می‌یابد و لذا شکستگی برنج بیشتر می‌شود (Shaker & Alizadeh, 2003). مقایسه میانگین‌های شاخص پوست‌کنی و درصد شکستگی برنج (رقم لنجان) ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک و فاصله غلتک در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است و نشان می‌دهد که بیشترین شاخص پوست‌کنی در رطوبت ۱۰ تا ۱۲ درصد و فاصله 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. در محدوده رطوبت ۱۰ تا ۱۲ درصد، بیشترین و کمترین مقدار شاخص پوست‌کنی به ترتیب در فاصله 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 فاصله غلتک نسبت عکس دارد و با کاهش فاصله غلتک مقدار شاخص پوست‌کنی افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد، چون با کاهش فاصله 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 فاصله غلتک ۰/۲۵ میلی‌متر و کمترین مقدار (۳/۱۸ درصد) در رطوبت ۱۰ تا ۱۲ درصد و فاصله غلتک ۱/۰۵ میلی‌متر است که از نظر آماری بین تیمارها اختلاف معنی‌داری وجود دارد. همچنین، نتایج ارائه شده در شکل ۸ نشان می‌دهد که در رطوبت ۸ تا ۱۰ یا ۱۰ تا ۱۲ درصد، تغییر فاصله غلتک تاثیر معنی‌داری بر درصد شکستگی برنج ندارد.

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، به ترتیب در سرعت دورانی ۱۵۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه دیده می‌شود که دارای اختلاف معنی‌دار هستند. 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 هلاستانی و روفیگری حقیقت (Saburi Helestani & Rufigari Haghghat, 2013) مشابه این نتیجه مشاهده می‌شود؛ این محققان میزان کاهش خرد برنج را ۵۸/۲ درصد گزارش داده‌اند. موضوع دیگری که از شکل ۶ 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



شکل ۷- مقایسه میانگین‌های شاخص پوست کنی ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک (M) و فاصله غلتک (C) (رقم لنجان). (حروف مشابه نشان دهنده نبود اختلاف معنی دار است)



شکل ۸- مقایسه میانگین‌های درصد شکستگی برنج ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک (M) و فاصله غلتک (C) (رقم لنجان). (حروف مشابه نشان دهنده نبود اختلاف معنی دار است)

در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است. همچنین مشخص می‌شود که اثر فاصله بین غلتک‌ها در سطح احتمال ۵ درصد و رطوبت شلتوک در سطح احتمال ۱ درصد بر شکستگی برنج معنی دار است (جدول ۴).

نتایج تجزیه واریانس شاخص پوست کنی و درصد شکستگی برنج برای شلتوک دانه بلند رقم شمیم نشان می‌دهد که اثر فاصله بین غلتک‌ها، رطوبت شلتوک، اثر متقابل آنها و سرعت دورانی موتور بر شاخص پوست کنی

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس مقادیر شاخص پوست کنی و درصد شکستگی برنج برای شلتوک دانه بلند (رقم شمیم)

| میانگین مربعات | | | |
|-----------------------|------------|---------------------|---------------------|
| منابع | درجه آزادی | شاخص پوست کنی | درصد شکستگی برنج |
| سرعت دورانی موتور (R) | ۲ | ۸۲/۷۳** | ۱۹/۲۶ ^{ns} |
| فاصله غلتکها (C) | ۴ | ۱۶۷۵/۴۱** | ۳۱/۷۱* |
| اثر متقابل R * C | ۸ | ۱۶/۸۷ ^{ns} | ۱۳/۹۰ ^{ns} |
| رطوبت شلتوک (M) | ۱ | ۳۲۰۶/۶۱** | ۲۸۲/۳۵** |
| اثر متقابل R * M | ۲ | ۲۴/۹۳ ^{ns} | ۶/۷۸ ^{ns} |
| اثر متقابل C * M | ۴ | ۴۷۷/۸۵** | ۱۳/۲۷ ^{ns} |
| اثر متقابل R * C * M | ۸ | ۱۸/۶۲ ^{ns} | ۴/۲۹ ^{ns} |
| خطا | ۶۰ | ۱۳/۰۶ | ۱۰/۵۶ |

** اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، * اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns: نبود اختلاف معنی دار

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.

مقایسه میانگین‌های مقادیر شاخص پوست کنی و درصد شکستگی برنج (رقم شمیم) ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک و فاصله غلتک‌ها نشان می‌دهد که بیشترین شاخص پوست کنی در رطوبت ۱۰-۸ درصد و فاصله ۰/۲۵ میلی‌متر غلتک‌ها با مقدار ۵۴/۸۹ درصد و کمترین مقدار شاخص پوست کنی در رطوبت ۱۰-۸ درصد و فاصله ۱/۰۵ میلی‌متر غلتک‌ها با ۲۰/۵۳ درصد است که از نظر آماری دارای اختلاف معنی دار هستند. از نظر درصد شکستگی برنج (رقم شمیم)، بیشترین مقدار در رطوبت ۱۰-۸ درصد و فاصله ۱/۰۵ میلی‌متر غلتک‌ها با ۳۳/۳۷ درصد و کمترین مقدار در رطوبت ۱۰-۱۲ درصد و فاصله ۰/۸۵ میلی‌متر غلتک‌ها با ۲۶/۱۹ درصد است که از نظر آماری میان این دو تیمار اختلاف معنی دار وجود دارد. همچنین مشخص شد که در رطوبت ۱۰-۸ درصد یا ۱۰-۱۲ درصد، تغییر فاصله غلتک‌ها تاثیر معنی داری بر درصد شکستگی برنج ندارد.

مقایسه میانگین‌های شاخص پوست کنی و درصد شکستگی برنج (رقم شمیم) ناشی از اثر متقابل رطوبت شلتوک و سرعت دورانی موتور نشان می‌دهد که بیشترین شاخص پوست کنی در رطوبت ۱۰-۱۲ درصد و سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه با ۴۹/۳۲ درصد و کمترین مقدار شاخص پوست کنی در رطوبت ۱۰-۸ درصد و سرعت دورانی ۱۴۵۰ دور بر دقیقه با ۳۳/۹۶ درصد است که از نظر آماری نیز اختلاف معنی داری 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 ۱۰-۱۲ درصد و سرعت دورانی ۱۴۵۰ دور بر دقیقه با ۲۷/۳۱ درصد است که از نظر آماری نیز دارای اختلاف معنی دار 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. به نظر می‌رسد دلیل این موضوع افزایش بازوی گشتاور در صورت اعمال یک نیروی مساوی روی هر دو نوع دانه برنج باشد. در پژوهش گودمن و رائو (Goodman & Rao, 1985) نیز گزارش

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 به کار برده شود.

برای جلوگیری از ایجاد مشکل در محاسبات به دلیل 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 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 رابطه ۲، درصد شکستگی برنج (F) محاسبه شد.

$$F = (K / (K + Z)) \times 100 \quad (2)$$

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 به کارگیری جعبه 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 به دست آمد. تصاویر مراحل مختلف اجرای الگوریتم در شکل ۹ ارائه شده است. برای محاسبه دقت اعداد به دست آمده، با شمارش تعداد دانه‌های شلتوک و برنج از روی تصویر، مشخص شد که تعداد دانه‌های برنج سالم و دانه‌های شکسته به ترتیب برابر با ۷۹ و ۱۶ است. بنابراین میزان شکستگی برنج برابر

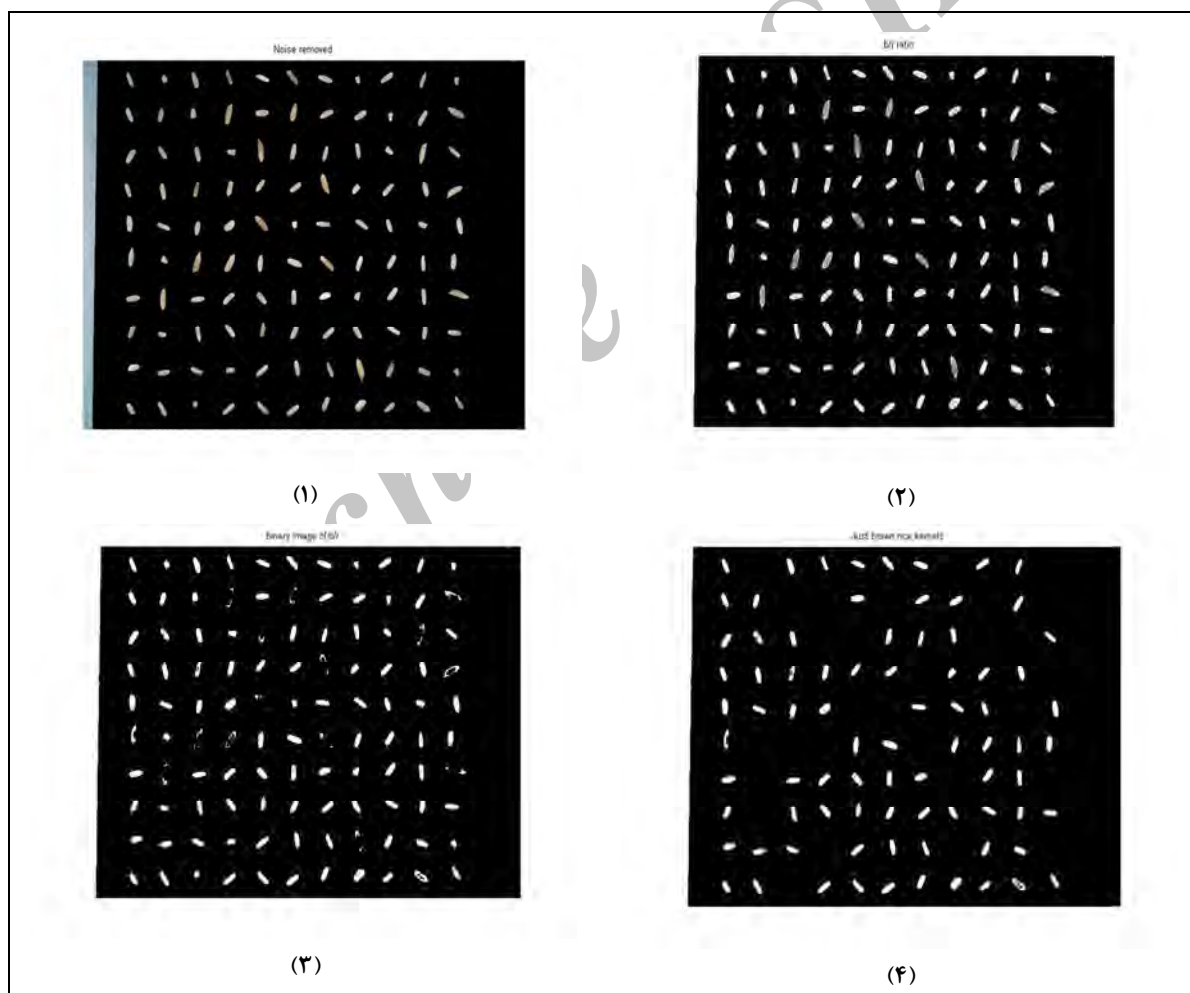
جمع‌بندی نتایج فوق نشان می‌دهد که برای شلتوک دانه متوسط در رطوبت ۱۲-۱۰ درصد، فاصله ۰/۲۵ میلی‌متر غلتک‌ها و سرعت ۱۴۵۰ دور بر دقیقه با شاخص پوست‌کنی ۸۲/۶۵ درصد و شکستگی برنج ۳/۸۸ درصد و در رطوبت ۱۰-۸ درصد، فاصله ۰/۲۵ میلی‌متر غلتک‌ها و سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه با شاخص پوست‌کنی ۸۱/۱۳ درصد و شکستگی برنج ۶/۰۸ درصد، مناسب‌ترین تیمار است. برای شلتوک دانه بلند در رطوبت ۱۲-۱۰ درصد، فاصله ۰/۶۵ میلی‌متر غلتک‌ها و سرعت ۱۴۵۰ دور بر دقیقه با شاخص پوست‌کنی ۵۱/۴۰ درصد و شکستگی برنج ۲۷/۴۶ درصد و در رطوبت ۱۰-۸ درصد، فاصله ۰/۲۵ میلی‌متر غلتک‌ها و سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه با شاخص پوست‌کنی ۴۶/۵۹ درصد و شکستگی برنج ۳۱/۵۱ درصد، مناسب‌ترین تیمار است. همچنین مشخص شد که بدون به‌کارگیری این سامانه و با انتخاب نامناسب سرعت دورانی موتور و فاصله غلتک‌ها، 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 به ترتیب برابر با ۱۹/۱۴ و ۳۵/۰۳ درصد است.

نتایج ارزیابی الگوریتم پردازش تصویر و دستگاه تک‌دانه ساز

الگوریتم پردازش تصویر برای محاسبه 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 دانه سالم از دانه 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 یاداو و جیندال (Yadav & Jindal, 2001) نیز گزارش شده

برای ارزیابی دستگاه تک‌دانه‌ساز، مقداری شلتوک، برنج سالم و شکسته روی جعبه نگهدارنده دانه‌ها ریخته و عملکرد دستگاه در ۳ سطح مکش با شمارش تعداد کل دانه‌های چسبیده به جعبه، دانه‌های جدا شده و دانه‌های به هم چسبیده محاسبه شد و درصد آنها به دست آمد (جدول ۵). 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.

با ۱۶/۸۴ درصد است که به مقدار به دست آمده از الگوریتم بسیار نزدیک است. یعنی دقت عدد به دست آمده از الگوریتم برابر با ۹۱/۸۱ درصد است. در پژوهش ساکایی و همکاران (Sakai *et al.*, 1996) دقت جداسازی ارقام برنج با پردازش تصویر ۹۵/۴ درصد و در پژوهش وان و همکاران (Wan *et al.*, 2002) ۹۵ درصد گزارش شده است. آنچه در پژوهش حاضر به دست آمده (۹۱/۸۱ درصد) با نتایج تحقیق پژوهشگران یاد شده بسیار نزدیک است.



شکل ۹- تصاویر دانه‌های شلتوک و برنج در مراحل مختلف اجرای الگوریتم
۱- حذف نویز ۲- محاسبه نسبت B/R ۳- تصویر باینری B/R ۴- تصویر دانه‌های برنج سبوس‌دار باقیمانده.

جدول ۵- نتایج ارزیابی دستگاه تک‌دانه ساز در سه سطح مکش

| مقدار مکش (میلی متر جیوه) | تعداد کل دانه‌های چسبیده به جعبه | تعداد دانه‌های جدا شده | تعداد دانه‌های به هم چسبیده | درصد دانه‌های به هم 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

۱۵۰۰ دور بر دقیقه با شاخص پوست‌کنی ۴۶/۵۹ درصد و

شکستگی برنج ۳۱/۵۱ درصد، مناسب‌ترین تیمار است.

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که بدون به کارگیری این سامانه و با انتخاب ۱۵۰۰ دور بر دقیقه برای سرعت دورانی موتور و ۰/۶۵ میلی‌متر برای فاصله 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 به ترتیب برابر با ۱۹/۱۴ و ۳۵/۰۳ درصد است.

می‌توان گفت که در دستگاه‌های پوست‌کن نباید از ابتدا یک تنظیم ثابت اجرا شود بلکه برای هر نوع شلتوک با هر رطوبتی، باید دستگاه تنظیم شود، به‌ویژه سرعت دورانی موتور که معمولاً در کارگاه‌ها هیچ تغییری در آن داده نمی‌شود و با همان تنظیم اولیه کل عملیات پوست‌کنی ادامه می‌یابد.

نتایج ارزیابی الگوریتم پردازش تصویر برای محاسبه 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 به دست آمده از الگوریتم برابر با ۹۱/۸۱ درصد است.

نتایج ارزیابی دستگاه تک‌دانه‌ساز برای به دست آوردن حداقل مقدار مکش جهت نگه‌داشتن

به منظور کاهش ضایعات برنج در دستگاه پوست‌کن، سامانه کنترل خودکار به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شد که پس از انتخاب نوع شلتوک، بر حسب رطوبت آن، بتواند فاصله 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 به کارگیری سامانه 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.

برای شلتوک دانه متوسط در رطوبت ۱۰-۱۲ درصد، فاصله 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 ۸-۱۰ درصد، فاصله 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.

برای شلتوک دانه بلند در رطوبت ۱۰-۱۲ درصد، فاصله 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 ۸-۱۰ درصد، فاصله غلتک‌ها برابر ۰/۲۵ میلی‌متر و سرعت موتور

دانه‌های شلتوک و برنج روی جعبه نگهدارنده جیوه با میزان جداسازی ۸۱/۳ درصد مناسب‌ترین مقدار دانه، نشان می‌دهد که مقدار مکش ۴۵- تا ۵۰- میلی‌متر است.

مراجع

- Afzalnia, S., Shaker, M. and Zare, E. 2004. Comparison of different rice milling methods. *Canadian Biosys. Eng.* 46(3): 63-66.
- Alizadeh, M. R. and Payman, M. H. 2004. Comparison of rice losses in two common methods of paddy to rice milling in Gilan province. *J. Agric. Sci. Technol.* 18(1). (in Persian)
- Anon. 1981. Development and evaluation of processing equipment. *Tech. Bulletin No. CIAE/PHTS/81/24.* CIAE, Nabi Bagh, Berasia Road, Bhopal.
- Firouzi, S., Alizadeh, M. R. and Minaei, S. 2010. Effect of rollers differential speed and paddy moisture content on performance of rubber roll husker. *World Academ. Sci. Eng. Technol.* 47, 687-690.
- Goodman, D. E. and Rao, R. M. 1985. Effect of grain type and milled rice kernel hardness on the head rice yield. *J. Food Sci.* 50, 840-842.
- Payman, M. H., Tavakoli, T. and Minaei, S. 1999. Determination of proper space between the rollers in rubber roller husker for milling of three traditional rice varieties in Gilan. *J. Agric. Sci.* 5(20): 37-48. (in Persian)
- Saburi Helestani, S. and Rufigari Haghghat, S. H. 2013. Effect of husker machine type and paddy husking percentage on production rice quality. *Proceedings of the 21st National Congress of Food Science and Technology.* Shiraz University. Shiraz. Iran. (in Persian)
- Sakai, N., Yonekawa, S. and Matsuzaki, A. 1996. Two-dimensional image analysis of the shape of rice and its application to separating varieties. *J. Food Eng.* 27, 397-407.
- Shaker, M. and Alizadeh, M. R. 2003. Effect of paddy moisture content on rice breakage and milling yield. *Proceedings of the 1st National Symposium on Losses of Agricultural Products.* Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. (in Persian)
- Sun, C., Liu, T., Ji, C., Jiang, M., Tian, T., Guo, D., Wang, L., Chen, Y. and Liang, X. 2014. Evaluation and analysis the chalkiness of connected rice kernels based on image processing technology and support vector machine. *J. Cereal Sci.* 60(2): 426-432.
- Wan, Y. N., Lin, C. M. and Chiou, J. F. 2002. Rice quality classification using an automatic grain quality inspection system. *Trans. ASAE.* 45(2): 379-387.
- Yadav, B. K. and Jindal, V. 2001. Monitoring milling quality of rice by image analysis. *Comput. Electron. Agric.* 33, 19-33.
- Yao, Q., Xian, D. X., Liu, Q. J., Yang, B. J., Diao, G. Q. and Tang, J. 2014. Automated counting of rice panthoppers in paddy fields based on image processing. *J. Integr. Agric.* 13(8): 1736-1745.
- Zarei Forush, H., Minaei, S., Alizadeh, M. R., Banakar, A., Hoseinzadeh Samani, B. and Montazeri, M. 2015. Performance monitoring of rice milling machine with the development of an automatic control system based on machine vision and fuzzy logic. *Proceedings of the 9th National Conference on Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran.* Tehran University. Tehran. Iran. (in Persian)

Use of Machine Vision to Improve Performance of and Reduce Loss from a Paddy Husker

M. Shaker, S. Minaei* , M. H. Khoshtaghaza, A. Banakar and A. Jafari

* Corresponding Author: Associate Professor, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: minae@modares.ac.ir

Received: 5 July 2015, Accepted: 29 November 2015

The current study developed and tested machine vision and automatic control systems to improve performance and reduce rice loss during paddy husking. This system was optimally adjusted for paddy type, moisture content of paddy, roller spacing and rotational speed of the motor. The percentage of breakage of rice kernels was determined using a machine vision system and a singulation device. If rice breakage was greater than a set point, the husker device was adjusted as necessary. The variables of paddy moisture content, roller spacing, and motor rotational speed were used to determine the working conditions of the husker for two paddy varieties. The dependent variables were husking index and rice kernel breakage percentage. An image processing algorithm was coded and evaluated in MATLAB software to determine the percentage of rice kernel breakage. The results showed that selection of proper treatment for the medium-sized kernel paddy, the average husking index was 82.65% and the average rice breakage was 3.88%. For the long kernel paddy, the average husking index and rice breakage were 51.4% and 27.46%, respectively. Without use of the system and with improper selection of motor rotational speed and roller spacing in the medium-sized kernel paddy produced a husking index of 61.58% and rice breakage of 7.51%. For the long kernel paddy, the husking index was 19.14% and rice breakage was 35.03%. Results from the algorithm showed that its accuracy was 91.81%. Evaluation of the singulation device showed that a suction of -45 to -50 mmHg yielded an appropriate 81.3% separation efficiency. The best combination of the machine parameter levels were programmed into the system, which operated to make the proper adjustments automatically. This resulted in the most appropriate working conditions for husking in accordance with paddy variety, paddy moisture content, roller spacing, and motor rotational speed.

Keywords: Automatic Control, Husker, Machine Vision, Paddy