نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع‌طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج

پایش عملکرد دستگاه سفیدکن برنج با توسعه یک سامانه کنترل خودکار مبتنی بر بینایی ماشین و منطق فازی

حماد ذرعی‌فروش[۱]، سعید مینایی[۲*]، محمدرضا علیزاده[۳]، احمد بناکار[۴]، بهرام حسین‌زاده سامانی[۵] و مهدی منتظری[۶]

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیزاسیون، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار بخش فنی و مهندسی، موسسه تحقیقات برنج کشور

۴- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۵- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۶- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

ایمیل مکاتبه کننده: minaee@modares.ac.ir

چکیده

به‌طور معمول در کارخانجات فرآوری برنج، عمل پایش کیفیت محصول خروجی از دستگاه سفیدکن هر ۲-۱ ساعت یک بار توسط کاربر به‌صورت دستی انجام می‌شود که کاری زمان‌بر بوده و می‌تواند با خطا همراه باشد. در پژوهش حاضر یک سامانه 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 کیفی محصول 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. از دو شاخص درجه سفیدی و درصد دانه‌های شکسته به عنوان پارامترهای ورودی و از مکانیزم کنترل فشار روی دریچه خروجی دستگاه سفیدکن به عنوان عملگر کنترلی در سامانه کنترل خودکار استفاده گردید. ارزیابی بر خط عملکرد سامانه کنترل خودکار نشان داد که زمان کل اجرای فرآیند نظارت (شامل نمونه‌گیری از محصول، انتقال محصول به واحد بینایی ماشین، کیفیت‌سنجی محصول و ارسال دستور فرمان به عملگر کنترلی) به‌طور میانگین برابر با ۱۴/۷ ثانیه است. دقت سامانه کنترل در تعیین شرایط کاری مناسب برای عملگر کنترلی برابر با ۸۹/۲ درصد به‌دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که سرعت عملکرد سامانه کنترل خودکار در اجرای فرآیند کنترل عملکرد دستگاه سفیدکن نسبت به روش دستی ۳۱/۳ درصد بیشتر بوده است.

واژه‌های کلیدی: بینایی ماشین، منطق فازی، کنترل خودکار، سفیدکن برنج

مقدمه

در قرن بیست و یکم، همراه با پیشرفت دانش و فناوری در زمینه‌ی کنترل کیفیت مواد غذایی، انتظار مصرف‌کنندگان برای در اختیار داشتن محصولات با کیفیت بیشتر، نیاز به نظارت بر فرآیند تولید و بهبود کیفیت مواد غذایی را افزایش داده است. به طور کلی، واژه‌ی کیفیت در محصولات غذایی به تمام ویژگی‌هایی در محصول اشاره دارد که موجبات رضایت‌مندی مشتری را فراهم می‌آورد (Shewfelt and Bruckner, 2000). ویژگی‌های مورد بررسی در زمینه‌ی کنترل کیفیت مواد غذایی به طور معمول شامل مشخصات ابعادی، بافت، رنگ، خواص بویایی و مزه محصولات هستند که در روش سنتی توسط عوامل انسانی ارزیابی می‌شوند. در میان محصولات غلات، برنج با نام علمی *Oryza Sativa* L. یک محصول غذایی استراتژیک به شمار می‌رود که به دلیل نیاز ضروری انسان‌ها به مصرف آن، در بیشتر کشورهای جهان کشت می‌گردد. یکی از جنبه‌های مهم تمایز گیاه برنج نسبت به سایر غلات، اهمیت کیفی- اقتصادی و به عبارت بهتر، بازارپسندی این محصول است. برخلاف سایر محصولات غلات، در مورد برنج، سالم بودن و کامل بودن دانه‌های به‌دست آمده از فرآیند تبدیل از اهمیت زیادی برخوردار است. این شاخص، ارزش اقتصادی محصول برنج را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، به طوری که ارزش اقتصادی دانه‌های سالم به‌دست آمده تقریباً دو برابر دانه‌هایی است که در مراحل مختلف تولید دچار شکستگی شده‌اند (Siebenmorgen et al., 2009). به طور معمول در کارخانجات فرآوری برنج، به دلیل عدم وجود ساز و کارهای مناسب، عمل پایش کیفیت محصول خروجی از دستگاه سفیدکن هر ۲-۱ ساعت یک بار توسط کاربر انسانی انجام می‌شود (Yadav and Jindal, 1998). با توجه به این که بررسی شاخص‌های تعیین کننده کیفیت برنج به روش سنتی در حین عملیات سفید کردن کاری زمان‌بر بوده و می‌تواند با خطا همراه باشد، در چنین شرایطی به‌کارگیری روش‌های نوین همچون ماشین بینایی و هوش مصنوعی، می‌تواند راهکاری سریع و مؤثر برای کنترل کیفیت محصول در فرآیند سفید کردن باشد (Brosnan and Sun, 2004).

در سال‌های گذشته پژوهش‌های متعددی در زمینه‌ی کیفیت‌سنجی محصولات کشاورزی با استفاده از روش‌های بینایی ماشین و شاخه‌های مختلف هوش مصنوعی انجام پذیرفته است. دهرویه (۱۳۸۹) یک سامانه مبتنی بر ماشین بینایی و منطق فازی را برای درجه‌بندی خودکار تخم مرغ توسعه داد. اطلاعات مربوط به شاخص‌های کیفی مختلف تخم مرغ شامل اندازه، ترک روی پوسته، شکستگی، درجه کثیفی و نقاط خونی با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر محاسبه شده و در اختیار یک کنترل کننده‌ی فازی قرار داده می‌شدند. کنترل کننده‌ی فازی که در آن یک سامانه استنتاج مبتنی بر نظر شخص خبره استفاده شده بود، بر اساس اطلاعات حاصل از تصاویر درجه نهایی تخم مرغ را محاسبه می‌نمود و متناسب با درجه‌ی تشخیص داده شده یک کانال درجه‌بندی را توسط یک کنترل کننده‌ی منطقی برنامه‌پذیر به حرکت در می‌آورد. نتایج به دست آمده از تحقیق وی نشان داد سامانه توسعه یافته می‌تواند با دقت ۹۵/۴ درصد تخم مرغ را به طور صحیح درجه‌بندی نماید. همچنین وی گزارش کرد که زمان کلی اجرای فرآیند کنترل از لحظه‌ی اعلام درجه محصول توسط الگوریتم جداسازی تا لحظه‌ی توقف کامل کانال درجه‌بندی به طور متوسط برابر با ۱/۸۷ ثانیه بود. امید (۲۰۱۱) برای توسعه یک سامانه درجه‌بندی پسته از روش صوت‌شناسی و منطق فازی استفاده نمود. در تحقیق وی از درخت تصمیم به منظور تدوین قواعد فازی استفاده گردید. نتایج نشان داد سامانه توسعه یافته با دقت ۹۵/۲۷ درصد توانایی تشخیص صحیح

محصول را دارا می‌باشد (Omid, 2011). منصور و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل مبتنی بر منطق فازی را به منظور کنترل نرخ جریان هوا در خشک‌کن‌های علات ارائه دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با استفاده از کنترل‌کننده توسعه یافته در زمان کوتاهی می‌توان رطوبت محصول را در نزدیکی نقطه‌ی تنظیم مبنا قرار داد (Mansor et al., 2010). در تحقیق دیگری، کنترل عملکرد یک ربات وجین‌کن به صورت موفقیت‌آمیز با بکارگیری یک کنترل‌کننده‌ی فازی انجام پذیرفت (Song, 2014). نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های پردازش تصویر و منطق فازی توانسته است با دقت قابل قبولی در تشخیص شاخص‌های کیفی برنج موفق باشد (Sansomboonsuk and Afzulpurkar, 2006, Shiddiq et al., 2011).

هدف از پژوهش حاضر توسعه یک سامانه هوشمند با استفاده از بینایی ماشین و منطق فازی برای درجه‌بندی کیفیت محصول خروجی از دستگاه سفیدکن برنج و کنترل پارامترهای عملکردی دستگاه با توجه به شاخص‌های کیفی محصول بود.

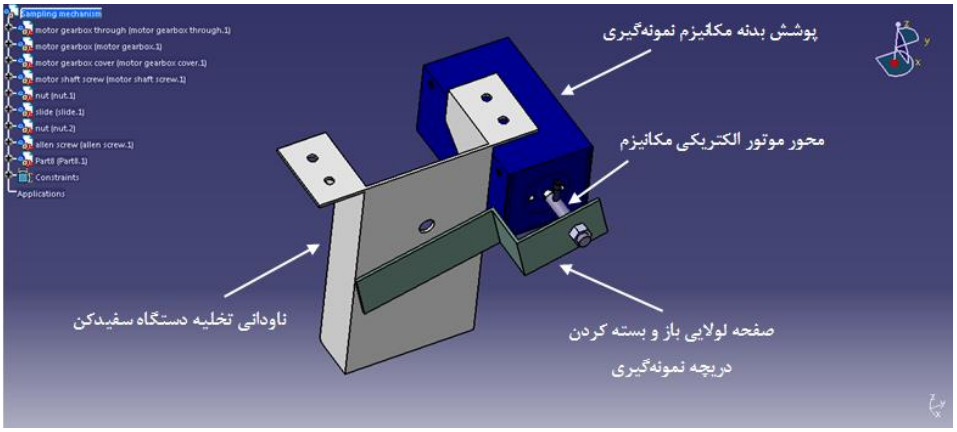
مواد و روش‌ها

با توجه به این که دستگاه‌های سفیدکن تجاری مورد استفاده در کارخانجات فرآوری برنج از ظرفیت بسیار بالایی برخوردار هستند (۷–۵ تن بر ساعت)، اجرای آزمایش‌ها در مقیاس کارخانه‌ای به حجم محصول بسیار زیادی نیاز داشت. گذشته از این، انجام آزمایش‌ها در این سطح به دلیل وارد شدن اثرات مربوط به عوامل متعدد خارجی می‌توانست با خطا مواجه شود. بنابراین، تصمیم به اجرای پژوهش در مقیاس آزمایشگاهی گرفته شد تا دقت و کنترل بیشتری در اجرای آزمایش‌ها حاصل گردد. برای این منظور، یک دستگاه سفیدکن برنج از شرکت خسرو–پرویز شیراز که سازنده‌ی ماشین‌های فرآوری برنج در کشور است، تهیه شد. این سفیدکن از نوع سایشی افقی بوده و ظرفیت عملکردی آن ۳۰۰ کیلوگرم بر ساعت است.

سامانه کنترل خودکار در نظر گرفته شده برای دستگاه سفیدکن برنج به‌طور کلی از دو بخش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری تشکیل شده بود. بخش سخت‌افزاری سامانه کنترل شامل واحد نمونه‌گیری از محصول، واحد تک‌سازی دانه‌ها، واحد تصویربرداری، رایانه پردازشگر، واحد تنظیم فشار روی دریچه خروجی، واحد تنظیم سرعت موتور دستگاه سفیدکن، و واحد داده‌برداری بود. بخش نرم‌افزاری سامانه کنترل شامل الگوریتم پردازش تصویر، سامانه استنتاج فازی و برنامه کنترل دستگاه بود. ارتباط بین بخش نرم‌افزاری و سخت‌افزاری از طریق برنامه کنترل امکان‌پذیر می‌گردید. در این سامانه، ابتدا مقداری از نمونه محصول خروجی از دستگاه سفیدکن از طریق ساز و کار نمونه‌گیری و تسمه نقاله به واحد دریافت تصاویر منتقل می‌شد. در این قسمت به کمک یک دوربین دیجیتال، تصاویر دانه‌های برنج دریافت و ثبت می‌گردید. تصاویر ثبت شده توسط دوربین به یک کارت تصویرگیر انتقال داده می‌شد و پس از رقمی شدن به واحد پردازشگر تصویر در رایانه انتقال می‌یافت. در واحد پردازشگر، با استفاده از الگوریتم‌های مناسب پردازش تصویر که از قبل تهیه و آماده شده بود، اطلاعات مورد نیاز از تصاویر دانه‌های برنج در قالب دو شاخص کیفی (درجه سفیدی دانه‌ها و درصد دانه‌های شکسته) پردازش و ثبت می‌گردید. سپس اطلاعات به‌دست آمده از پردازش تصویر به واحد استنتاج فازی ارسال می‌شد. در واحد کنترل، گستره‌ای برای شاخص‌های کیفی محصول –براساس اطلاعات به‌دست آمده از عملیات پردازش تصویر– تعیین شده

و درجاتی بین حدود بالا و پایین این گستره تعریف می‌شد که با توجه به شرایط محصول خروجی، یکی از درجات به آن اختصاص می‌یافت. این عملیات از نظر نرم‌افزاری توسط سامانه استنتاج فازی طراحی شده انجام می‌گرفت. در چنین حالتی سامانه کنترل قادر بود از طریق اندازه‌گیری شاخص‌های کیفی دانه‌های برنج و مقایسه آنها با مقادیری که از پیش در سامانه استنتاج ذخیره‌سازی شده بود، در صورت نامطلوب بودن نتایج، عملکرد دستگاه سفیدکن را با ارسال سیگنال‌های فرمان به عملگرهای کنترلی (واحد کنترل فشار روی دریچه خروجی و واحد تنظیم سرعت موتور دستگاه سفیدکن) در وضعیت مناسب قرار دهد.

با توجه به این که در پژوهش حاضر اساس طراحی سامانه کنترل شبیه‌سازی رفتار کاربر در پایش عملکرد دستگاه سفیدکن بوده است، بنابراین، ابتدا باید با استفاده از یک ساز و کار مناسب مقداری از محصول خروجی از دستگاه سفیدکن از طریق یک مسیر انشعابی به واحد تحلیل کیفیت محصول انتقال می‌یافت. تصویر مربوط به مکانیزم ساخته شده برای این منظور در شکل ۱ نشان داده شده است. در قسمت داخلی بدنه این مکانیزم، از یک موتور گیربکس الکتریکی کوچک ۱۲ ولت با سرعت دورانی ۵۰ rpm استفاده شده است. بر روی محور این موتور، یک صفحه فلزی قرار گرفته است. مکانیزم نمونه‌گیری از دریچه خروجی در قسمت زیر ناودانی تخلیه دستگاه سفیدکن قرار می‌گیرد. با ارسال سیگنال فرمان از برنامه کنترل و چرخش موتور الکتریکی مکانیزم نمونه‌گیری، صفحه فلزی واقع بر روی محور آن نیز به چرخش در می‌آید و موجب باز شدن دریچه نمونه‌گیری می‌گردد. پس از انتقال مقدار مشخصی از محصول از طریق دریچه نمونه‌گیری به سامانه تک‌سازی، با ارسال مجدد سیگنال فرمان و چرخش موتور در جهت عکس حالت اولیه، صفحه فلزی واقع بر روی محور مکانیزم نمونه‌گیری موجب بسته شدن دریچه می‌گردد و بدین‌ترتیب عمل نمونه‌گیری به اتمام می‌رسد.



شکل ۱: طرح مکانیزم نمونه‌گیری از دریچه خروجی دستگاه سفیدکن در محیط نرم‌افزار CATIA

پس از آن که مقداری از محصول با استفاده از مکانیزم نمونه‌گیری از دریچه خروجی دستگاه سفیدکن دریافت می‌گردید، باید راهکاری در نظر گرفته می‌شد تا دانه‌های برنج به واحد تصویربرداری انتقال یابند. نکته‌ی مهم در فرآیند انتقال دانه‌ها به واحد تصویربرداری این بود که دانه‌های برنج می‌بایست تا حد امکان از تماس با یکدیگر خارج شده و به عبارت دیگر، تک‌سازی شوند تا اجرای عملیات پردازش تصویر بر روی دانه‌ها تسهیل گردد. برای این منظور، از طرح تسمه نقاله دوگانه برای تک‌سازی دانه‌های برنج استفاده شد. در این طرح، ابتدا مقداری از محصول خروجی از دستگاه سفیدکن از طریق یک

ناودانی تخلیه بر روی سطح نقاله اول می‌ریزد و با حرکت این نقاله دانه‌های برنج به روی سطح نقاله دوم که با فاصله عمودی اندکی نسبت به نقاله اول قرار گرفته است منتقل می‌شوند (شکل ۳). عرض و جهت حرکت تسمه نقاله‌ها با هم برابر است، اما سرعت خطی تسمه نقاله دوم دو برابر سرعت تسمه نقاله اول است. متفاوت بودن سرعت خطی نقاله‌ها نسبت به یکدیگر موجب می‌گردد که دانه‌ها در هنگام ریزش از روی سطح نقاله اول به روی سطح نقاله دوم از هم جدا شده و با فاصله از یکدیگر بر روی سطح تسمه نقاله دوم قرار بگیرند. دانه‌ها در قسمت انتهایی تسمه نقاله دوم وارد محفظه تصویربرداری می‌شوند.

برای تصویربرداری از دانه‌های برنج، یک دستگاه دوربین CCD با وضوح افقی ۶۰۰ TV Lines (SAMSUNG, Model SCB 2000, Korea) مجهز به لنز CS با فاصله کانونی ۸ – ۳/۵ میلی‌متر انتخاب گردید. برای برقراری ارتباط بین دوربین و رایانه از یک کارت تصویرگیر (Pinnacle, Model 510-USB, China) بهره‌گیری شد. پس از شناسایی کارت تصویرگیر در رایانه، تنظیمات مربوط به وضوح تصویر ارسالی با استفاده از جعبه ابزار اکتساب تصویر در نرم‌افزار MATLAB R2013a امکان‌پذیر بود. در این پژوهش، با انجام بررسی‌های اولیه بر روی کیفیت تصاویر دریافتی، وضوح ۵۷۶V × ۷۲۰H پیکسل برای کارت تصویرگیر انتخاب گردید. با اعمال تنظیم یاد شده و با توجه به این که لنز دوربین با فاصله ۱۷ سانتی‌متر نسبت به سطح تسمه نقاله دوم درون محفظه تصویربرداری قرار داده شده بود، میدان دیدی به اندازه‌ی ۱۱۰ × ۱۳۰ میلی‌متر به وسیله‌ی دوربین ایجاد گردید. با توجه به شاخص‌های کیفی مورد نظر از کیفیت دانه‌های برنج که عبارت بودند از درجه سفیدی دانه‌ها و درصد دانه‌های شکسته، از روش نورپردازی از بالا برای دستیابی به تصاویر با کیفیت مناسب به منظور تحلیل هر چه بهتر کیفیت محصول استفاده گردید.

با در نظر گرفتن طرح رایج در ماشین‌های سفیدکن برنج است، فشار وارد بر دریچه خروجی با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (فیروزی و همکاران، ۱۳۸۳):

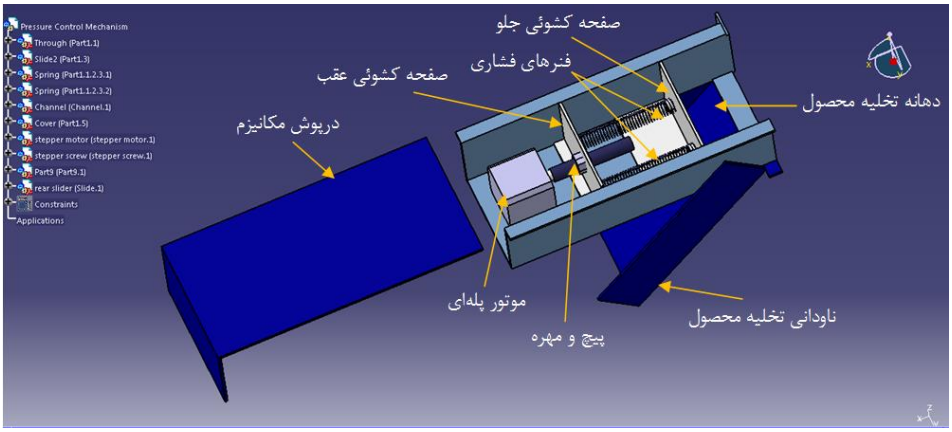
$$P_c = \frac{(\frac{mgL}{2}) + (MgL_x)}{a \times A} \qquad (۱)$$

در این رابطه، P_c فشار وارد بر دریچه خروجی (Pa)، M جرم وزنه (kg)، m جرم پیچ حامل (kg)، g شتاب گرانش زمین (۹/۸ m/s^2)، L طول پیچ حامل وزنه (m)، L_x فاصله طولی وزنه تا دهانه تخلیه (m)، a فاصلع عمودی مرکز ثقل وزنه تا دهانه تخلیه (m) و A مساحت دریچه تخلیه (m^2) هستند. در دستگاه سفیدکن مورد استفاده در این پژوهش، مقادیر جرم وزنه، جرم پیچ حامل، طول پیچ حامل، حداکثر فاصله طولی وزنه تا دهانه تخلیه، فاصله عمودی محل اثر نیرو تا نقطه لولا و مساحت دریچه تخلیه به ترتیب برابر با ۲۱۰ g، ۳۸ g، ۹ cm و ۷/۵ cm، ۳ cm و ۳۶ cm^2 بود. بنابراین، با توجه به روابط موجود مقدار بیشینه‌ی فشار وارد بر دریچه‌ی خروجی برابر با ۱۵۸۶پاسکال بود.

با توجه به این که در سامانه کنترل در نظر گرفته شده برای دستگاه سفیدکن برنج، عمل تنظیم فشار روی دریچه خروجی دستگاه باید به‌صورت خودکار و از طریق برنامه کنترل انجام می‌پذیرفت، طرح سنتی مورد اشاره نمی‌توانست در قالب سامانه کنترل به‌کار گرفته شود. بنابراین نیاز به طراحی یک ساز و کار جدید برای جایگزینی طرح سنتی مورد اشاره بود.

برای این منظور، باید مکانیزمی طراحی می‌شد که قابلیت ایجاد یک نیروی مقاوم فشاری انعطاف‌پذیر بر روی دریچه خروجی به همان نحو که در طرح سنتی دستگاه‌های سفیدکن تجاری مورد استفاده قرار گرفته است را داشته باشد.

مکانیزم کنترل فشار روی دریچه خروجی محصول مطابق شکل ۲ در محیط نرم‌افزار CATIA طراحی گردید. در این مکانیزم، فشار وارد بر دریچه خروجی دستگاه سفیدکن با قرار دادن یک صفحه کشویی تحت فشار در مقابل دهانه تخلیه دستگاه کنترل می‌گردد. میزان فشار وارد بر دریچه از طریق تغییر میزان فشردگی یک جفت فنر با طول ۶۰ میلی‌متر که بین دو صفحه کشویی مکانیزم قرار گرفته‌اند، قابل تنظیم است. در قسمت میانی صفحه‌ی کشویی عقب یک مهره وجود دارد که یک پیچ با طول ۶۰ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر درون آن قرار گرفته است. پیچ در یک انتهای خود بر روی محور یک موتور پله‌ای قرار گرفته است. موقعیت صفحه کشویی عقب به دلیل درگیر بودن با پیچ توسط موتور پله‌ای تثبیت می‌شود در حالی که صفحه کشویی جلو به دلیل اینکه از یک سمت تحت فشار محصول در حال خروج از دهانه تخلیه و از سوی دیگر، تحت فشار فنرهای مکانیزم کنترل فشار قرار دارد، متناسب با برآیند فشارهای وارد بر خود درون بدنه مکانیزم جابه‌جا می‌شود. بدین ترتیب، با چرخش محور موتور پله‌ای، پیچ واقع بر روی آن درون مهره صفحه کشویی عقب مکانیزم حرکت می‌کند. در نتیجه‌ی این حرکت، صفحه کشویی عقب نسبت به صفحه کشویی جلو جابه‌جا می‌شود و بسته به جهت این جابه‌جایی، میزان فشردگی فنرهای مکانیزم تغییر می‌یابد. بنابراین، محصول خروجی دستگاه سفیدکن در هنگام خروج از دهانه تخلیه با یک نیروی فشاری مداوم و شناور، مشابه با آنچه که در طرح سنتی کنترل فشار در دستگاه‌های سفیدکن تجاری وجود دارد، روبه‌رو خواهد شد. ابعاد محفظه‌ی نگهدارنده‌ی این مکانیزم برابر با ۴/۵ × ۸ × ۲۰ سانتی‌متر است.



شکل ۲: طرح مکانیزم کنترل فشار روی دریچه خروجی در محیط نرم‌افزار CATIA

در طرح جدید در نظر گرفته شده برای مکانیزم کنترل فشار، مقدار فشار کل ایجاد شده توسط فنرهای به‌کار رفته در مکانیزم تنظیم فشار باید با فشار محاسبه شده در طرح دستی اولیه‌ی مورد استفاده در دستگاه سفیدکن برابری می‌کرد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا نیروی فشاری قابل تولید توسط فنرهای فشاری با توجه به نحوه‌ی استقرار فنرها در بدنه‌ی مکانیزم با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$P_n = \frac{F_2}{A} = \frac{[(k_1 + k_2)\Delta x]}{A} \qquad (۲)$$

در این رابطه P_n میزان فشار وارد بر دهانه خروجی دستگاه سفیدکن در طرح جدید (Pa)، k_1 و k_2 ضرایب سختی فنرهای اول و دوم (N/m)، Δx میزان جابجایی خطی فنرها (m) و A مساحت دریچه خروجی دستگاه سفیدکن (m^2) است. با توجه به این که از فنرهای مشابه در مکانیزم استفاده شده بود، رابطه‌ی زیر به صورت زیر تغییر یافت:

$$P_n = \frac{F_2}{A} = \frac{2k_1\Delta x}{A} \qquad (۳)$$

در طراحی انجام شده برای مکانیزم کنترل فشار، مقدار باز شدن دریچه عبور محصول برابر با ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شده بود. به عبارت دیگر، مقدار بیشینه‌ی جابه‌جایی خطی فنرها در مکانیزم کنترل فشار برابر با ۳ سانتی‌متر بود. همچنین، از آنجایی که این مکانیزم باید جایگزین طرح اولیه‌ی مورد استفاده در دستگاه سفیدکن می‌گردید، مقدار به‌دست آمده برای P_n باید با مقدار Pc برابر باشد. بنابراین، با در اختیار داشتن مقادیر P_n، A و Δx مقدار ضریب سختی مورد نیاز برای فنرهایی که باید در مکانیزم کنترل فشار مورد استفاده قرار می‌گرفتند، به صورت زیر محاسبه گردید:

$$k_1 = k_2 = \frac{1586 \times 36 \times 10^{-4}}{2 \times 3 \times 10^{-2}} = 95.16 \quad N/m \qquad (۴)$$

پس از محاسبه‌ی ضریب سختی مورد نیاز برای فنرهای مکانیزم کنترل فشار، با تهیه نمونه‌های مختلفی از فنرهای فشاری، مقادیر ضریب سختی آن‌ها با استفاده از ماشین آزمون مواد SANTAM مدل STM-20 ساخت ایران، موجود در آزمایشگاه مکاترونیک گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس اندازه‌گیری گردید تا در نهایت فنرهای با ضریب سختی مناسب برای استفاده در مکانیزم کنترل فشار انتخاب شوند.

برای به‌کار اندازی موتور پله‌ای از طریق برنامه کنترل، از یک راه‌انداز موتور پله‌ای دو فاز مدل S2 ساخت کشور چین بهره گرفته شد. با تنظیماتی که در مدار الکتریکی این وسیله در نظر گرفته شده است، می‌توان موتورهای پله‌ای را با دقت زاویه‌ای ۲۰۰–۲۵۰۰۰ step/rev راه‌اندازی کرد. بدین ترتیب، پس از تعیین شاخص‌های کیفی محصول در واحد پردازش تصویر و ارسال آن به برنامه کنترل، یک سیگنال فرمان از برنامه کنترل به ترمینال‌های ورودی واحد راه‌انداز موتور پله‌ای می‌رسد و راه‌انداز، متناسب با سیگنال دریافت شده از برنامه کنترل، موتور پله‌ای را به میزان مشخصی در یک جهت معین به حرکت در می‌آورد. ارتباط بین واحدهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در سامانه‌ی کنترل به وسیله‌ی واحد داده‌برداری برقرار می‌گردد. واحد داده‌برداری سامانه‌ی کنترل خودکار سفیدکن برنج از یک تابلو مدار الکتریکی و یک کارت داده‌برداری تشکیل شده بود. بر روی تابلو مدار الکتریکی قطعاتی از قبیل رله‌ها، سازوارگرهای ولتاژ و ترمینال‌های مربوط به ارسال سیگنال فرمان به عملگرهایی همچون مکانیزم نمونه‌گیری از دریچه خروجی، مبدل سرعت واحد تک‌سازی، راه‌انداز موتور پله‌ای مکانیزم کنترل فشار و مبدل سرعت موتور دستگاه سفیدکن قرار گرفته بود. کارت داده‌برداری مورد استفاده در این پژوهش (Advantech, USB-4716, Taiwan) از ۸ درگاه ورودی دیجیتال، ۸ درگاه خروجی دیجیتال، ۱۶ درگاه ورودی آنالوگ و ۲ درگاه خروجی آنالوگ تشکیل یافته بود. وضعیت استقرار بخش‌های مختلف سخت‌افزاری سامانه کنترل شامل واحد نمونه‌گیری از محصول، واحد تک‌سازی محصول، واحد تصویربرداری از محصول، واحد داده‌برداری، واحد کنترل فشار روی دریچه خروجی دستگاه و واحد کنترل سرعت روتور سایشی در شکل ۳ نشان داده شده است.

شکل ۳: نحوه استقرار بخش‌های مختلف سخت‌افزاری سامانه کنترل خودکار دستگاه سفیدکن برنج

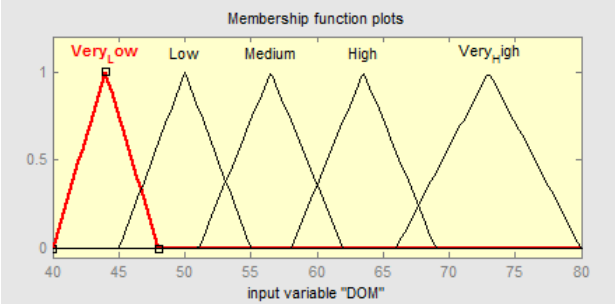
به طور کلی، بخش نرم‌افزاری سامانه کنترل خودکار سفیدکن برنج از سه واحد شامل واحد پردازش تصویر، واحد استنتاج فازی و واحد فرمان تشکیل شده بود. به منظور سنجش شاخص‌های کیفی مورد نظر از دانه‌های برنج برای اجرای این پژوهش (درجه سفیدی دانه‌ها و درصد دانه‌های شکسته) نیاز بود توابع متناسب برای استخراج هر یک از این ویژگی‌ها در پردازش تصویر مشخص شوند. بدین منظور، ابتدا یک سری تصاویر اولیه از دانه‌های برنج تهیه گردید و قابلیت سنجش هر یک شاخص‌های کیفی برنج در آن‌ها با استفاده از توابع آماده موجود در جعبه ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفت. پس از مشخص شدن و ادغام توابع مناسب برای استخراج شاخص‌های کیفی محصول، الگوریتم اصلی پردازش تصویر تدوین گردید. سپس الگوریتم طراحی شده با استفاده از تعداد تصاویر بیشتری که گویای تمام حالت‌های ممکن برای شاخص‌های کیفی محصول بودند به‌صورت برون خط مورد سنجش قرار گرفت.

برای جایگزینی ساختار رفتاری کاربر دستگاه سفیدکن (تصمیم‌گیری در مورد پارامترهای عملکردی دستگاه بر اساس اطلاعات حاصل از کیفیت‌سنجی) روش منطق فازی به کار برده شد. بنابراین، بخش دوم واحد نرم‌افزاری سامانه کنترل خودکار دستگاه سفیدکن برنج یک کنترل کننده فازی بود که در آن اطلاعات ارسالی از واحد پردازش تصویر به عنوان ورودی و گستره‌ی عملکردی پارامترهای کنترلی دستگاه سفیدکن، که در یک سامانه استنتاج فازی تحلیل می‌شوند، به عنوان خروجی کنترل‌کننده در نظر گرفته شدند. برای طراحی سامانه استنتاج فازی در پژوهش حاضر از جعبه ابزار فازی نرم‌افزار MATLAB بهره‌گیری شد. ورودی‌های سامانه استنتاج فازی عبارت بودند از شاخص‌های کیفی محصول برنج شامل درجه سفیدی دانه‌ها و درصد دانه‌های شکسته که به ترتیب با علائم اختصاری DOM و PBK به سامانه استنتاج فازی معرفی شدند. متغیر خروجی در نظر گرفته شده برای سامانه استنتاج فازی میزان فشار روی دریچه خروجی دستگاه سفیدکن بود.

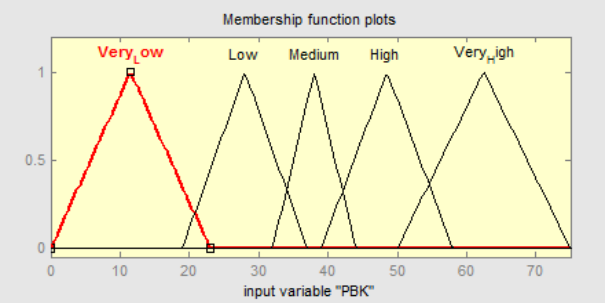
برای طراحی توابع عضویت با مطالعه‌ی تحقیقات گذشته و همچنین با مراجعه به کارخانجات فرآوری برنج و نمونه‌گیری از دانه‌های برنج تولید شده توسط ماشین‌های سفیدکن سایشی برنج موجود، گستره‌ای برای هر یک از متغیرهای ورودی سامانه استنتاج فازی (درجه سفیدی و درصد دانه‌های شکسته) طی فرآیند سفید کردن دانه تعیین گردید. با مراجعه به

کارخانجات فرآوری برنج از اشخاص خبره که تجربه و مهارت زیادی در کار با دستگاه سفیدکن برنج داشتند خواسته شد در مورد کیفیت محصول بر اساس دو متغیر درجه سفیدی و درصد دانه‌های شکسته اظهار نظر نمایند. برای فازی‌سازی متغیرهای کلامی از توابع عضویت مثلثی استفاده شد. این نوع توابع عضویت با توجه به سادگی و سرعت محاسبه جزو پرکاربردترین توابع در سامانه‌های استنتاج فازی هستند (Wang et al., 2011).

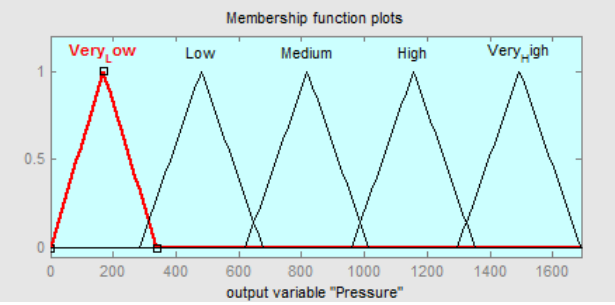
با توجه به این که در تحقیق حاضر از یک مکانیزم کنترل فشار خودکار برای تنظیم فشار روی دریچه خروجی دستگاه سفیدکن استفاده شده بود، دامنه‌ی حرکت صحفه‌ی کشویی عقب در این مکانیزم، که تعیین کننده‌ی میزان فشردگی فنرهای مکانیزم بود، به عنوان معیار برای تعیین گستره‌ی تغییرات متغیر فشار در نظر گرفته شد. بر این اساس، گستره‌ی تغییرات فشار با توجه به ضریب سختی فنر مورد استفاده و جابجایی خطی فنرها بین صفر تا ۱۶۹۰ پاسکال تعریف شد. ساختار در نظر گرفته شده برای واحد استنتاج فازی با در نظر گرفتن نوع و تعداد متغیرهای ورودی و خروجی مورد استفاده در شکل ۴ نشان داده شده است.



الف)



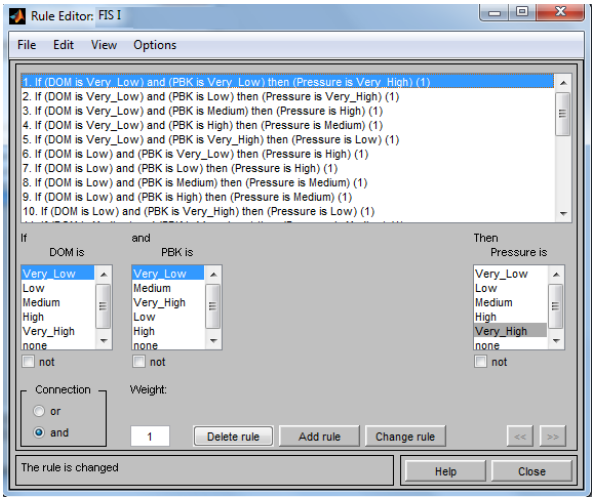
ب)



پ)

شکل ۴: ساختار توابع عضویت در نظر گرفته شده در سامانه استنتاج فازی برای متغیرهای: الف) درجه سفیدی، ب) درصد دانه‌های شکسته، پ) فشار روی دریچه خروجی

از آنجایی که برای هر یک از متغیرهای ورودی به کار رفته در واحد استنتاج فازی سامانه کنترل پنج تابع عضویت در نظر گرفته شده بود، در مجموع ۲۵ قاعده فازی در پایگاه قواعد فازی ایجاد گردید. پایگاه‌های قواعد با نظرسنجی از ۱۰ شخص خبره به دست آمدند. برای این منظور، در فرم‌های پرسشنامه‌ای که برای ارزیابی شاخص‌های کیفی نمونه‌های مختلف برنج در اختیار اشخاص خبره قرار داده شده بود، قسمتی برای اظهار نظر در مورد گستره‌ی مناسب برای عملگر کنترلی دستگاه در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، شخص خبره با ارزیابی شاخص‌های کیفیت محصول ابتدا بخش مربوط به اظهار نظر در مورد این شاخص‌ها را در فرم پرسشنامه تکمیل می‌کرد و سپس بر اساس ارزیابی صورت پذیرفته، در مورد تعیین گستره‌ی مناسب برای پارامتر کنترلی دستگاه در فرم پرسشنامه اظهار نظر می‌نمود. پس از تکمیل فرم‌های پرسشنامه و با میانگین‌گیری از نظرات اشخاص خبره، پایگاه قواعد در پنجره ویرایشگر قواعد جعبه ابزار فازی نرم‌افزار MATLAB طراحی گردید (شکل ۵). در پژوهش حاضر از موتور استنتاج فازی نوع ممدانی برای اجرای فرآیند استنتاج بهره‌گیری شد. بخش تجمیع در موتور استنتاج فازی به کمک روش بیشینه پیاده‌سازی شد. از روش مرکز ناحیه برای غیرفازی‌سازی مجموعه‌های فازی تعریف شده استفاده گردید.



شکل ۵: پنجره ویرایشگر قواعد در جعبه ابزار فازی MATLAB

واحد فرمان که در محیط نرم‌افزار LabVIEW پیاده‌سازی شده، با در نظر گرفتن شرایط لحظه‌ای همه اجزای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری سامانه کنترل خودکار دستگاه سفیدکن برنج آن‌ها را به یکدیگر ارتباط می‌دهد. با آغاز اجرای برنامه، سامانه کنترل از طریق واحد داده‌برداری، واحد تک‌سازی محصول را راه‌اندازی می‌کند. سپس واحد نمونه‌گیری از دریچه خروجی به کار می‌افتد تا مقداری از محصول در حال خروج از دهانه تخلیه دستگاه سفیدکن را از طریق ناودانی تخلیه بر روی سطح تسمه نقاله اول در واحد تک‌سازی محصول قرار دهد. واحد تک‌سازی با ادامه‌ی حرکت خود محصول را به واحد تصویربرداری انتقال می‌دهد. با رسیدن محصول به درون محفظه‌ی تصویربرداری، سامانه کنترل واحد تک‌سازی را برای لحظه‌ای متوقف می‌کند تا عکس‌برداری از دانه‌های برنج در لحظه‌ی توقف تسمه نقاله انجام شود. این امر موجب کاهش قابل ملاحظه نویزهای احتمالی می‌شود که ممکن است در تصویربرداری از دانه‌ها در حالت حرکت تسمه نقاله ایجاد شوند. پس از ثبت نخستین تصویر، واحد تک‌سازی مجدداً از طریق سامانه کنترل به حرکت در می‌آید. بسته به تعداد دفعات تصویربرداری که

در آغاز برنامه توسط کلیدهای تنظیم مشخص شده است، این حلقه تکرار می‌شود. پس از ثبت آخرین تصویر از دانه‌های برنج سامانه تک‌سازی برای یک بازه‌ی زمانی مشخص حرکت می‌کند تا کل محصول نمونه‌گیری شده را به یک مخزن جمع‌آوری در انتهای تسمه نقاله دوم انتقال دهد. در خلال این فرآیند اطلاعات ثبت شده توسط دوربین از طریق کارت تصویرگیر به واحد کنترل انتقال داده می‌شوند. الگوریتم پردازش تصویر، که از طریق منوی MATLAB Scripts در پنجره نمودار روندنمای برنامه کنترل قرار گرفته است، با دریافت و تحلیل تصاویر ثبت شده توسط دوربین اطلاعات مربوط به شاخص‌های کیفی محصول را محاسبه می‌کند. این اطلاعات به عنوان ورودی وارد کنترل کننده‌ی فازی می‌شوند. کنترل کننده‌ی فازی از یک سو با واحد پردازش تصویر و از سوی دیگر با سامانه استنتاج فازی در ارتباط است. در این واحد اطلاعات مربوط به شاخص‌های کیفی محصول از الگوریتم پردازش تصویر دریافت شده و در قالب فازی به سامانه استنتاج فازی معرفی می‌شوند. سامانه استنتاج فازی با دریافت مقادیر فازی مربوط به شاخص‌های کیفی محصول، فرآیند استنتاج را انجام داده و حاصل فرآیند را به صورت یک عدد در اختیار کنترل‌کننده فازی قرار می‌دهد. بسته به نوع عملگرهای کنترلی مورد استفاده در فرآیند کنترل، سیگنال فرمان لازم برای دسترسی به موقعیت جدید از کنترل کننده فازی به عملگر کنترلی دستگاه سفیدکن ارسال می‌گردد. در ادامه به روش‌های مورد استفاده برای آزمون عملکرد سامانه توسعه یافته پرداخته می‌شود.

برای محاسبه‌ی دقت الگوریتم پردازش تصویر در سنجش درجه سفیدی دانه‌های برنج (A_{dm}) از رابطه‌ی زیر استفاده شد:

$$A_{dm}=\left(1-\left(\frac{|D_{wm}-D_{ip}|}{D_{wm}}\right)\right)\times 100 \qquad (۵)$$

در رابطه‌ی مورد اشاره، D_{wm} و D_{ip} درجه سفیدی اندازه‌گیری شده برای دانه‌های برنج به ترتیب با استفاده از سفیدسنج دیجیتال و الگوریتم پردازش تصویر هستند.

برای ارزیابی عملکرد واحد پردازش تصویر در تشخیص درصد دانه‌های شکسته، با در نظر گرفتن این که این شاخص به صورت درصد عددی محاسبه می‌شد، ابتدا نمونه‌های مختلفی از دانه‌های برنج تهیه شد که درون آن‌ها حداقل ۱۰۰ دانه برنج قرار داشت. سپس تعداد دقیق دانه‌های برنج موجود در هر نمونه به روش دستی شمارش گردید. با استفاده از یک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر طول دانه‌های موجود در هر نمونه اندازه‌گیری شد تا با مشخص شدن تعداد دانه‌هایی که با توجه به طول محور اصلی خود دانه شکسته محسوب می‌شدند، درصد عددی دانه‌های شکسته در هر نمونه به دست آید. سپس به منظور بررسی توانایی تشخیص درصد دانه‌های شکسته با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر، همان نمونه‌ها به صورت دستی و بدون تماس با یکدیگر در محفظه‌ی تصویربرداری قرار داده شدند تا از آن‌ها عکس‌برداری به عمل آید. در الگوریتم پردازش تصویر با توجه به توابع به کار رفته، کل دانه‌های موجود در تصویر برچسب‌گذاری شده و با مشخص بودن طول پیکسلی مورد نیاز برای سالم بودن یک دانه، تعداد و درصد عددی دانه‌های شکسته موجود در تصویر محاسبه شدند. برای محاسبه‌ی دقت الگوریتم پردازش تصویر در تشخیص درصد دانه‌های شکسته، نمونه‌های مختلفی که درصد دانه شکسته آن‌ها به روش دستی تعیین شده بود وارد محفظه‌ی تصویربرداری شدند تا از آن‌ها عکس‌برداری به عمل آمده و

شاخص درصد دانه‌های شکسته برای آن‌ها با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر محاسبه گردد. دقت الگوریتم پردازش تصویر در تشخیص درصد دانه‌های شکسته (A_{bk}) با به کارگیری رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$A_{bk}=\left(1-\left(\frac{|P_m-P_{ip}|}{P_m}\right)\right)\times 100 \qquad (۶)$$

در رابطه‌ی بالا، P_m و P_{ip} درصد دانه‌های شکسته اندازه‌گیری شده به ترتیب با استفاده از روش دستی و الگوریتم پردازش تصویر هستند.

سامانه کنترل در شرایطی که دستگاه سفیدکن برنج در وضعیت کاری خود قرار داشت راه‌اندازی شد تا میزان تأثیر آن بر عملکرد دستگاه سفیدکن برنج مورد بررسی قرار بگیرد. پیش از شروع به کار سامانه کنترل یک سری تنظیمات اولیه در برنامه کنترلی لحاظ گردید. این تنظیمات شامل تعیین تعداد دفعات اجرای فرآیند پایش کیفیت محصول، فاصله زمانی بین دو فرآیند پایش کیفیت (بر حسب ثانیه) و تعداد دفعات عکس‌برداری از محصول در هر بار اجرای فرآیند پایش کیفیت محصول بود که در هنگام آزمون عملکرد سامانه کنترل به ترتیب برابر با ۳، ۲۰ و ۳ در نظر گرفته شد. برای ارزیابی عملکرد سامانه کنترل خودکار دستگاه سفیدکن برنج قبل و بعد از هر مرحله از اجرای عملیات کنترل نمونه‌های ۱۰۰ گرمی از محصول خروجی از دستگاه سفیدکن تهیه گردید. نمونه‌های تهیه شده در اختیار کارشناسان خبره قرار داده شدند تا در مورد کیفیت محصول به‌دست آمده در هر مرحله از فرآیند کنترل اظهار نظر شود. همچنین پس از اتمام فرآیند کنترل، تنظیم اعمال شده توسط سامانه کنترل برای اصلاح موقعیت عملگرهای کنترلی دستگاه سفیدکن (مکانیزم کنترل فشار و مبدل سرعت دورانی موتور دستگاه سفیدکن) با نظر کارشناس خبره در مورد تنظیم عملگرهای کنترلی دستگاه با توجه به شرایط کیفی محصول نمونه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفت.

یکی دیگر از معیارهایی که برای ارزیابی عملکرد سامانه کنترل خودکار دستگاه سفیدکن برنج در پژوهش حاضر مد نظر قرار گرفت، سرعت عمل سامانه کنترل در اجرای فرآیند پایش کیفیت محصول و اصلاح عملکرد دستگاه سفیدکن بود. سرعت عمل سامانه کنترل توسعه یافته در این پژوهش با محاسبه‌ی زمان لازم برای اجرای فرآیند کنترل از لحظه‌ی آغاز باز شدن دریچه نمونه‌گیری تا لحظه‌ی اعمال تنظیم موقعیت عملکردی عملگرهای کنترلی دستگاه و سپس مقایسه‌ی زمان به دست آمده با مدت زمانی که کاربر انسانی در شرایط کنترل دستی و سنتی برای نمونه‌گیری از خروجی دستگاه و تنظیم پارامترهای عملکردی آن صرف می‌کند، تعیین گردید. برای این منظور، با مراجعه به کارخانجات فرآوری برنج مدت زمانی که یک کاربر انسانی در نمونه‌گیری از خروجی دستگاه سفیدکن، ارزیابی کلی نمونه‌ها و اعمال تنظیمات بر روی دستگاه صرف می‌کند با استفاده از یک زمان‌سنج دیجیتال اندازه‌گیری شد. سپس برای محاسبه‌ی سرعت عمل سامانه کنترل از روابط زیر استفاده گردید:

$$S_c=100-D_c \qquad (۷)$$

$$D_c=\left(1-\left(\frac{|T_o-T_c|}{T_o}\right)\right)\times 100 \qquad (۸)$$

$$T_0=T_c=T_s+T_m+T_a \qquad (۹)$$

در روابط بالا، S_c سرعت عمل سامانه کنترل نسبت به کاربر انسانی (٪)، D_c اختلاف زمان عملکرد سامانه کنترل نسبت به کاربر انسانی (٪)، T_o زمان لازم برای اجرای یک فرآیند کنترل توسط کاربر انسانی (s)، T_c زمان لازم برای اجرای یک فرآیند کنترل عملکرد توسط سامانه کنترل (s)، T_s زمان مورد نیاز برای نمونه‌گیری از محصول (s)، T_m زمان مورد نیاز برای ارزیابی کیفیت محصول (s) و T_a زمان مورد نیاز برای اعمال تنظیمات در دستگاه سفیدکن (s) هستند.

نتایج و بحث

ارزیابی‌های صورت پذیرفته نشان داد که دقت کلی الگوریتم پردازش تصویر مورد استفاده در واحد بینایی ماشین در محاسبه‌ی درجه سفیدی دانه‌های برنج به طور میانگین برابر با ۹۲/۶ درصد بوده است. زمان لازم برای اجرای الگوریتم تشخیص درجه سفیدی به طور متوسط برابر با ۰/۲۴ ثانیه بود. طحانی (۱۳۹۱) برخی از شاخص‌های کیفی مهم در فرآیند تبدیل برنج را با استفاده از روش پردازش تصویر مورد مطالعه قرار داد. وی گزارش کرد که ارتباط مناسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده برای درجه سفیدشدگی با استفاده از سفیدسنج دیجیتال و مقادیر متوسط سطح خاکستری در روش پردازش تصویر با ضریب تبیین ۰/۹۲ وجود دارد. ارزیابی‌های انجام پذیرفته نشان داد که دقت الگوریتم پردازش تصویر در تشخیص درصد عددی دانه‌های شکسته به طور متوسط برابر با ۹۷/۷ درصد بوده است. زمان مورد نیاز برای اجرای الگوریتم تشخیص درصد دانه‌های شکسته به طور متوسط برابر با ۰/۲۷ ثانیه بود.

نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد سامانه کنترل خودکار دستگاه سفیدکن برنج در حالت برخط با در نظر گرفتن مکانیزم کنترل فشار به عنوان تنها عملگر کنترلی دستگاه سفیدکن در جدول ۱ ارائه شده است. در این حالت از آزمایش‌های مربوط به سامانه کنترل، فشار روی دریچه خروجی دستگاه سفیدکن در کمترین سطح خود قرار داده شد تا قابلیت سامانه کنترل خودکار در اصلاح و تنظیم مناسب موقعیت عملکردی مکانیزم کنترل فشار مورد بررسی قرار گیرد. در این حالت از ارزیابی سامانه کنترل، سرعت روتور سایشی تا پایان فرآیند کنترل در حد استاندارد خود (۱۸۲۵ دور بر دقیقه) ثابت نگاه داشته شد. همان گونه که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، تصمیم‌های اتخاذ شده توسط سامانه کنترل با نظر کارشناس خبره (که معیار اصلی طراحی سامانه کنترل خودکار در پژوهش حاضر بوده است) مطابقت مناسبی داشت. تنها در مرحله‌ی اول اجرای عملیات کنترل عملکرد دستگاه بین سطوح در نظر گرفته شده برای توابع عضویت توسط سامانه کنترل با نظر کارشناس خبره اختلاف وجود داشت که این اختلاف به اندازه‌ی یک سطح ("زیاد" و "خیلی زیاد") در گستره‌ی تابع عضویت مربوط به پارامتر خروجی مورد بررسی بود. با توجه به تنظیم اولیه در نظر گرفته شده برای عملگرهای کنترلی دستگاه سفیدکن، در مرحله‌ی اول از عملیات پایش کیفیت محصول به دلیل این که درجه سفیدی در واحد استنتاج فازی در سطح "کم" تشخیص داده شد، دستور خروجی کنترل کننده فازی افزایش فشار در مکانیزم کنترل فشار در حد بیشینه بود تا محصول را به درجه سفیدی مناسب برساند. در مرحله‌ی دوم از کنترل عملکرد دستگاه سفیدکن، مقادیر شاخص‌های درجه سفیدی و دانه‌های شکسته به ترتیب از ۴۷/۵ به ۵۲/۳ درصد و ۲۴/۸ به ۳۹/۲ درصد افزایش یافت که این امر به دلیل افزایش شدت عمل دستگاه سفیدکن در نتیجه‌ی اجرای مرحله‌ی اول فرآیند کنترل عملکرد دستگاه رخ داده بود. سامانه کنترل با توجه به مقادیر محاسبه شده برای شاخص‌های کیفی محصول در مرحله‌ی دوم از فرآیند کنترل عملکرد دستگاه سفیدکن، مقدار

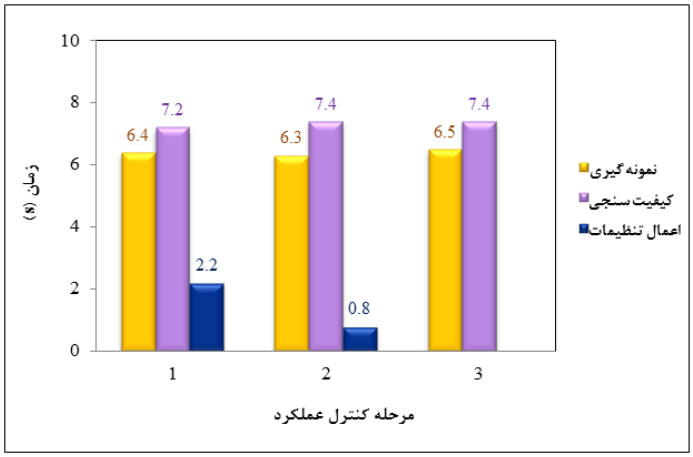
"متوسط" را برای فشار روی دریچه خروجی انتخاب نمود که این تصمیم با تصمیم کارشناس خبره سازگار بود اگرچه در تعیین سطوح شاخص‌های کیفی محصول در این مرحله بین کارشناس خبره و واحد کنترل فازی در یک سطح اختلاف وجود داشت. در مرحله‌ی سوم، سامانه کنترل بر اساس محاسبات واحد پردازش تصویر در مورد شاخص‌های کیفی محصول خروجی از دستگاه سفیدکن، مقدار فشار خروجی "متوسط" را برگزیده است که این تصمیم نیز مطابق با نظر کارشناس خبره بوده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر شاخص‌های کیفی محصول در مرحله‌ی سوم فرآیند کنترل در گستره‌های تقریباً مشابهی نسبت به نتایج مرحله‌ی دوم به دست آمده‌اند که این نتیجه به نوعی بر یکسان بودن کیفیت محصول خروجی در این دو مرحله دلالت دارد. عدم تغییر مقدار برگزیده شده برای فشار وارد بر دریچه خروجی در مراحل دوم و سوم از فرآیند کنترل به این علت است که سامانه کنترل پس از اجرای دو مرحله‌ی نخست عملیات کنترل، گستره‌ی کاری در نظر گرفته شده برای عملکرد دستگاه سفیدکن را مناسب تشخیص داده و بنابراین نیازی به تغییر در شرایط کاری دستگاه نمی‌بیند.

جدول ۱: نتایج ارزیابی برخط سامانه کنترل دستگاه سفیدکن

روش پایش عملکرد	شاخص مورد بررسی	مرحله کنترل		
		۱	۲	۳
سامانه کنترل	درجه سفیدی (٪) - تابع عضویت	۴۷/۵ کم	۵۲/۳ کم	۵۴/۹ متوسط
	دانه شکسته (٪) - تابع عضویت	۲۴/۸ کم	۳۹/۲ متوسط	۳۶/۶ متوسط
	فشار انتخابی (Pa) - تابع عضویت	۱۲۳۰ زیاد	۸۰۱ متوسط	۸۲۹ متوسط
شخص خبره	درجه سفیدی	خیلی کم	متوسط	متوسط
	دانه‌های شکسته	کم	متوسط	متوسط
	سطح فشار مناسب	خیلی زیاد	متوسط	متوسط

نمودار عملکرد زمانی سامانه کنترل خودکار دستگاه سفیدکن برنج در مراحل مختلف اجرای یک فرآیند کنترل در شکل ۶ نشان داده شده است. زمان کل اجرای هر فرآیند کنترل از لحظه‌ی باز شدن دریچه نمونه‌گیری تا تنظیم موقعیت عملکردی مکانیزم کنترل فشار به طور متوسط برابر با ۱۴/۷ ثانیه بود که از این بازه زمانی ۶/۴ ثانیه ابتدایی به نمونه‌گیری و انتقال محصول توسط واحد تک‌سازی به درون محفظه‌ی تصویربرداری، ۷/۳ ثانیه برای سه مرتبه تصویربرداری، پردازش تصاویر ثبت شده و اجرای فرآیند استنتاج فازی، و ۱/۵ ثانیه به تغییر موقعیت عملگر کنترلی اختصاص داشت.

همان‌گونه که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، در مرحله‌ی سوم از فرآیند کنترل زمان مربوط به اعمال تنظیمات برابر با صفر به دست آمده است. از آنجایی که مقدار تنظیم انتخاب شده برای موقعیت عملگر کنترلی دستگاه در مرحله‌ی سوم عملیات کنترل با تنظیم اعمال شده برای این عملگر در مرحله‌ی دوم کنترل عملکرد دستگاه یکسان بوده است، بنابراین زمانی برای تنظیم موقعیت عملگر کنترلی دستگاه سفیدکن در مرحله‌ی سوم کنترل صرف نمی‌گردد.

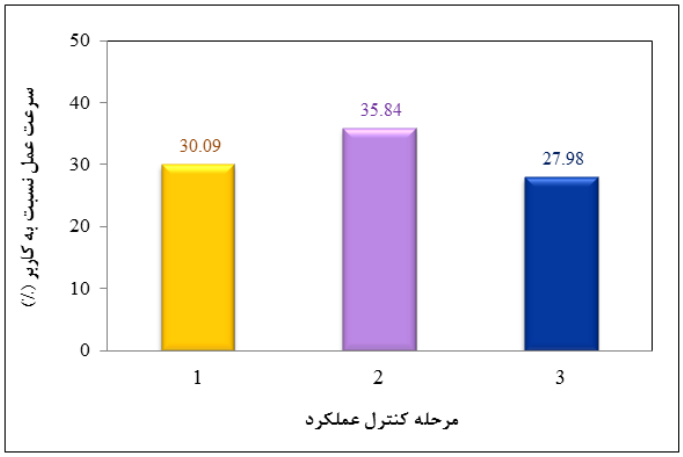


شکل ۶: زمان صرف شده در هر یک از مراحل کنترل عملکرد دستگاه سفیدکن

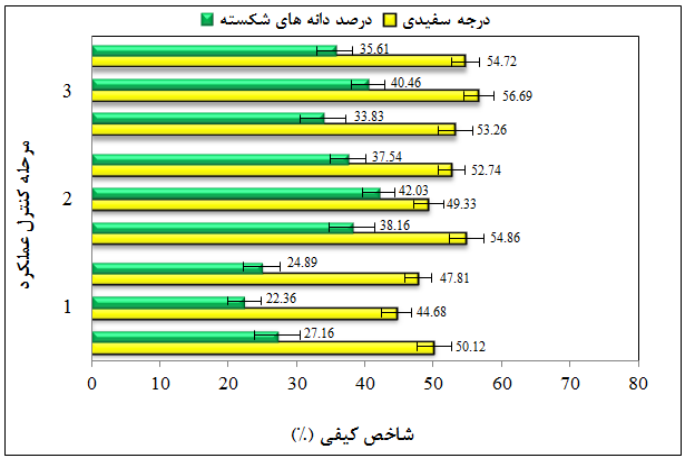
نتایج نشان داد که سرعت عملکرد سامانه کنترل خودکار در اجرای فرآیند کنترل عملکرد دستگاه سفیدکن نسبت به کاربر انسانی به طور متوسط ۳۱/۳ درصد بیشتر بوده است (شکل ۷). در محاسبه‌ی سرعت عمل سامانه کنترل از آنجایی که ممکن بود در برخی از موارد زمانی که سامانه کنترل برای تغییر موقعیت عملگر کنترلی دستگاه صرف می‌کند، به دلیل تصمیم سامانه بر تثبیت موقعیت قبلی عملگر برابر با صفر باشد (مانند مرحله‌ی سوم اجرای فرآیند کنترل در شکل ۶)، مقایسه سرعت عمل سامانه کنترل با کاربر در چنین حالتی می‌بایست در شرایطی که کاربر انسانی فقط دو مرحله‌ی اول فرآیند کنترل را انجام می‌دهد، صورت می‌پذیرفت. برای این منظور مدت زمانی که یک کاربر انسانی فقط برای اجرای دو مرحله‌ی اول فرآیند کنترل عملکرد دستگاه سفیدکن صرف می‌کند (شامل سه بار نمونه‌گیری از محصول خروجی دستگاه سفیدکن و ارزیابی کیفیت نمونه‌ها)، اندازه‌گیری شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که زمان مربوط به اجرای عملیات یاد شده توسط کاربر به طور میانگین برابر با ۱۹/۳ ثانیه است. با توجه به این که کمترین میزان سرعت عمل سامانه کنترل نسبت به کاربر انسانی در مرحله‌ی سوم از اجرای فرآیند کنترل (یعنی جایی که تغییر موقعیت عملگر انجام نمی‌شود) به دست آمده است، می‌توان به این نتیجه رسید که بیشترین وجه تمایز و برتری سامانه کنترل نسبت به کاربر انسانی در اجرای مرحله‌ی پایانی فرآیند کنترل است. به عبارت دیگر، سرعت عملکرد مکانیزم کنترل فشار در تنظیم فشار روی دریچه خروجی دستگاه سفیدکن در مقایسه با کاربر انسانی بیشتر بوده است.

مقادیر به دست آمده از سه بار عکس‌برداری و اجرای الگوریتم پردازش تصویر به منظور تعیین شاخص‌های کیفی محصول در هر مرحله از اجرای فرآیند کنترل در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج حاصل از محاسبات الگوریتم پردازش تصویر نشان داد که مقادیر شاخص‌های کیفی در گستره‌های تقریباً نزدیک نسبت به یکدیگر به دست آمده‌اند. سامانه استنتاج فازی میانگین شاخص‌های کیفی را به عنوان معیار برای تعیین توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی در نظر می‌گیرد. با توجه به نویزهایی که همواره سامانه‌های تشخیص مبتنی بر ماشین بینایی را تهدید می‌کنند، وجود خطا در محاسبات اجتناب ناپذیر بوده و تقریباً هیچ سامانه تشخیصی را نمی‌توان با دقت ۱۰۰ درصد پیاده‌سازی نمود. به خصوص سامانه‌هایی از نوع مورد استفاده در پژوهش حاضر که در بخش تصمیم‌گیری نیز بر اساس ساختار تصمیم‌گیری غیر قطعی انسان کار می‌کنند.

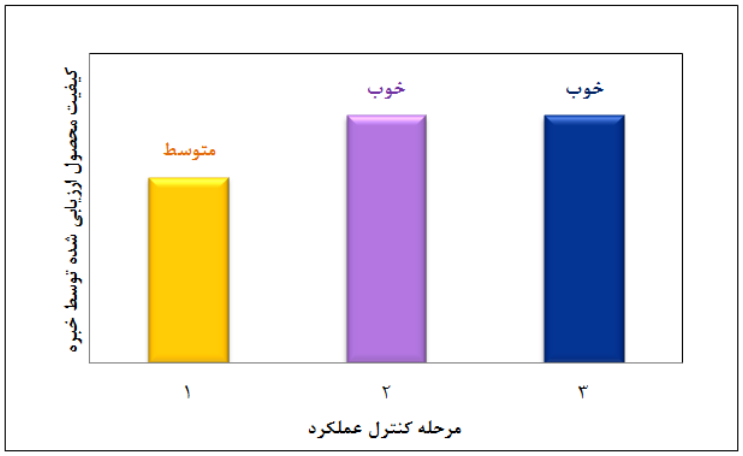
علاوه بر این، از آنجایی که محصول خروجی از دستگاه سفیدکن توده‌ای از دانه‌های برنج است که کیفیت آن تحت تأثیر عوامل مختلفی تغییر می‌کند، عدم یکنواختی کامل در کیفیت محصول خروجی طبیعی به نظر می‌رسد.



شکل ۷: سرعت عمل سامانه کنترل خودکار نسبت به کاربر انسانی در هر مرحله از کنترل عملکرد دستگاه سفیدکن



شکل ۸: مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های کیفی محصول در مراحل مختلف کنترل عملکرد دستگاه سفیدکن



شکل ۹: کیفیت محصول درجه‌بندی شده توسط شخص خبره در مراحل مختلف کنترل عملکرد دستگاه سفیدکن

پس از اتمام فرآیند کنترل، محصولی که در هر مرحله از اجرای عملیات کنترل از خروجی دستگاه سفیدکن نمونه‌گیری شده بود، در اختیار کارشناس خبره قرار گرفت تا کیفیت آن بین سطوح "خیلی بد" تا "خیلی خوب" درجه‌بندی شود. بر اساس نظرسنجی که از اشخاص خبره صورت گرفت، مشخص گردید که کیفیت محصول خروجی در مرحله‌های دوم و سوم کنترل عملکرد دستگاه نسبت به مرحله‌ی اول بهتر بوده است (شکل ۹).

از دیگر نتایج به دست آمده در این مرحله از پژوهش این بود که کیفیت کلی محصول از نظر کارشناس خبره در مقایسه با محصول خروجی از دستگاه‌های تجاری مورد استفاده در کارخانجات فرآوری برنج کمتر بود. علت این امر را می‌توان ناشی از دو عامل دانست. نخست این که دستگاه سفیدکن مورد استفاده در پژوهش حاضر یک دستگاه سفیدکن در مقیاس کاری نیمه تجاری بود. بنابراین احتمال این وجود داشت که تنظیم پارامترهای عملکردی دستگاه ساخته شده و کیفیت عملکردی آن تا حدودی متفاوت با آنچه که در دستگاه‌های نوع تجاری مشاهده می‌شود، باشد. دوم آن که در خطوط تجاری فرآوری و تبدیل برنج به طور متداول از دو دستگاه سفیدکن به صورت سری برای سبوس‌گیری دانه‌های برنج استفاده می‌گردد. دلیل استفاده از چنین آرایشی برای اجرای فرآیند سفیدکردن دانه این است که لایه‌ی سبوس پیرامون دانه در دو مرحله و به صورت تدریجی و با کمترین میزان وارد آمدن تنش‌های مکانیکی از سطح دانه‌های برنج جداسازی شود. به علاوه، شدت یافتن عمل سایش درون محفظه‌ی سفیدکنی به واسطه‌ی اجرای فرآیند سفید کردن در یک مرحله‌ی پر فشار در دستگاه سفیدکن می‌تواند موجب بالا رفتن بیش از حد حرارت و ایجاد تنش‌های حرارتی در داخل محفظه‌ی سفیدکنی گردد که این امر دانه‌ها را در مراحل بعدی به میزان بیشتری مستعد ترک‌خوردگی و شکستگی می‌نماید. در پژوهش حاضر بنا بر دلایل مختلفی از جمله محدودیت در تأمین هزینه‌های ساخت دستگاه و حجم محصول مورد نیاز برای اجرای آزمایش‌ها از یک دستگاه سفیدکن در مقیاس نیمه تجاری استفاده گردید. بنابراین، عملکرد دستگاه سفیدکن مورد استفاده در این تحقیق با مقایسه‌ی کیفیت کاری آن تحت شرایط مختلف نسبت به عملکرد شرایط کاری مناسب خود دستگاه سنجیده شد. بدین معنی که کیفیت محصول خروجی در شرایط تنظیم استاندارد اعلام شده از سوی شرکت سازنده برای دستگاه سفیدکن به عنوان معیار برای صحه‌گذاری بر عملکرد دستگاه سفیدکن در سایر شرایط کاری در نظر گرفته شد.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از پژوهش نشان داد که دقت کلی الگوریتم پردازش تصویر در محاسبه‌ی درجه سفیدی دانه‌های برنج به طور میانگین برابر با ۹۲/۶ درصد بود. دقت الگوریتم پردازش تصویر در تشخیص درصد عددی دانه‌های شکسته به طور متوسط برابر با ۹۷/۷ درصد به‌دست آمد. مقادیر به دست آمده از سه بار عکس‌برداری و اجرای الگوریتم پردازش تصویر به منظور تعیین شاخص‌های کیفی محصول شامل درجه سفیدی دانه‌ها و درصد دانه‌های شکسته در سه مرحله از اجرای فرآیند کنترل به ترتیب با انحراف معیار ۲/۳۵ و ۳/۰۱ به دست آمدند.زمان کل اجرای هر مرحله از فرآیند کنترل عملکرد از لحظه‌ی باز شدن دریچه نمونه‌گیری تا تعیین موقعیت عملکردی جدید برای عملگر کنترلی به طور متوسط برابر با ۱۴/۷ ثانیه به دست آمد. از این بازه زمانی ۶/۴ ثانیه ابتدایی به باز شدن دریچه نمونه‌گیری و انتقال محصول به درون محفظه‌ی تصویربرداری، ۷/۳ ثانیه به سه مرتبه تصویربرداری، پردازش تصاویر ثبت شده و اجرای فرآیند استنتاج فازی، و ۱/۵ ثانیه به

تغییر موقعیت عملگر کنترلی دستگاه اختصاص داشت. بیشترین زمان ثبت شده برای اعمال تنظیمات در موقعیت عملگر کنترلی دستگاه سفیدکن برنج برابر با ۲/۷ ثانیه بود. این زمان برای تغییر موقعیت مکانیزم کنترل فشار از گستره‌ی کاری "خیلی کم" به سطح فشار "خیلی زیاد" صرف شد. برای دستیابی به این تنظیم، موتور پله‌ای مورد استفاده در مکانیزم کنترل فشار می‌بایست بیشترین میزان جابه‌جایی خطی را در صفحه کشویی متحرک مکانیزم ایجاد می‌نمود که این امر مستلزم صرف زمان بیشتری نسبت به سایر وضعیت‌های کنترلی مکانیزم بود. با این وجود سرعت عمل سامانه کنترل خودکار در اعمال تنظیمات لازم در عملگر کنترلی در این حالت به اندازه‌ی ۲۹ درصد نسبت به کاربر انسانی بیشتر به‌دست آمد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از دانشگاه تربیت مدرس و موسسه تحقیقات برنج کشور برای تامین تجهیزات آزمایشگاهی و نیز شرکت خسرو-پرویز شیراز برای ساخت دستگاه سفیدکن برنج مورد نیاز این تحقیق اعلام می‌دارند.

منابع و مآخذ

۱. دهرویه م. ۱۳۸۹. طراحی و پیاده سازی سیستم هوشمند مبتنی بر منطق فازی برای درجه‌بندی تخم مرغ. رساله دکتری، دانشگاه تهران.

۲. طحانی ب. ۱۳۹۱. تعیین پارامترهای کیفی طی عملیات تبدیل شلتوک برنج با استفاده از روش پردازش تصویر. رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اقلید.

۳. فیروزی، س.، مینایی، س.، پیمان، م. ح.، فتوحی، ح. ۱۳۸۳. بررسی اثر آهنگ تغذیه مواد و فشار دهانه تخلیه سفیدکن بر مقدار شکست برنج سفید به‌دست آمده از سفیدکن مالشی دمشی. فصلنامه علوم و صنایع غذایی ایران، ج ۱، ص ۴۴-۳۱.

4. Brosnan, T. and Sun, D. 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. Journal of Food Engineering, 61: 3-16.
5. Locht, P., Thomsen, K. and Mikkelsen, P. 1997. Full color image analysis as a tool for quality control and process development in the food industry. ASAE Annual International Meeting. Toronto, Ontario, Canada.
6. Mansor, H., Noor, M., Bahari, S., Ahmad, R., Kamil, R., Taip, F. S. and Lutfy, O. F. 2010. Intelligent control of grain drying process using fuzzy logic controller. Journal of Food, Agriculture & Environment, 8: 145-149.
7. Omid, M. 2011. Design of an expert system for sorting pistachio nuts through decision tree and fuzzy logic classifier. Expert Systems with Applications, 38: 4339-4347.
8. Sansomboonsuk, S. and Afzulpurkar, N. 2006. The Appropriate Algorithms of Image analysis for Rice Kernel Quality Evalution. 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. Bangkok, Thailand.
9. Shewfelt, R. L. and Bruckner, B. 2000. Fruit and vegetable quality: an integrated view, CRC Press.
10. Shiddiq, D. M., Nazaruddin, Y. Y., Muchtadi, F. I. and Raharja, S. 2011. Estimation of rice milling degree using image processing and adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS). 2nd International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA). pp. 98-103. IEEE, Bandung, Indonesia.
11. Siebenmorgen, T., Saleh, M. and Bautista, R. 2009. Milled rice fissure formation kinetics. Transactions of the ASAE, 52: 893-900.
12. Yadav, B. and Jindal, V. 1998. Monitoring milled rice characteristics by image analysis. Proceedings of the International Agricultural Engineering Conference. pp. 963–971. Bangkok, Thailand.

Performance Monitoring of Rice Whitening Machine by Development of an Automatic Control System Based on Machine Vision and Fuzzy Logic

Abstract

Generally, in rice mills, the quality of product discharging from rice whitening machines is manually controlled every 1–2 hours by human operator which is a time-consuming process and can be accompanied with errors. In this research an intelligent system was developed based on machine vision and fuzzy logic for quality grading of rice grains discharging from a whitening machine in order to control the machine performance parameters according to the quality indices of the product. The developed system was composed of discharging grains sampling unit, grains singulation and transmission unit, image capturing and processing unit, and fuzzy control unit. Two quality indices, namely degree of milling and percentage of broken kernels was considered as the system input variables, whilst the pressure control mechanism on the discharge section of the whitening machine was used as control operating device. The on-line performance evaluation of the control system showed that the total time required for the whitener performance monitoring (sampling, sample delivering to the machine vision unit, product quality assessment and set the adjustments in the position of the operating devices) was equal to 14.7 s. The accuracy of the developed system in determination of appropriate working condition for the whitening machine was equal to 89.2%. The results also revealed that the speed of the automatic system in performance control of the whitening machine in 31.3% higher than that of the traditional method.

Keywords: Rice whitener, Machine vision, Fuzzy logic, Automatic control