

## بهینه سازی فرآیند خشک کردن شلتوک در یک خشک کن بستر ارتعاشی مادون قرمز با بهره گیری از یک کنترلر PID

داریوش زارع<sup>۱\*</sup>، مجتبی نصرتی<sup>۱</sup>، سید مهدی نصیری<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز dzare@shirazu.ac.ir

### چکیده

در این پژوهش یک روش ترکیبی مادون قرمز برای کاهش رطوبت محصول شلتوک در یک خشک کن بستر ارتعاشی مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش ها در سه سطح دمای هوای ورودی (۳۰، ۴۰ و ۵۰°C) و سه سطح شدت تابش مادون قرمز (۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ وات بر متر مربع) انجام پذیرفت و مدت زمان خشک شدن، افزایش درصد دانه های ترک دار، مصرف انرژی ویژه بررسی شد. با توجه به نتایج بدست آمده شرایط بهینه برای خشک کردن ترکیبی مادون قرمز دمای هوای ورودی ۴۰°C و شدت تابش مادون قرمز ۱۰۰۰ W m<sup>-2</sup> تعیین شد. در ادامه برای بهبود کارکرد خشک کن یک سامانه کنترلی PID طراحی و نتایج آن با شرایط بهینه خشک کردن شلتوک مقایسه شد. در این سامانه کنترلی از مدل تک دانه برای پیش بینی رطوبت شلتوک در مدت زمان آزمایش بهره گرفته شد. نتایج نشان داد کنترلر طراحی شده ضمن کاهش ۶۵ درصدی مصرف انرژی، حداکثر گرادیان رطوبت را بین ۲ تا ۱۵ درصد کاهش می دهد.

کلمات کلیدی:

کنترل، خشک کردن، مدل تک دانه، شلتوک

\*نویسنده مسئول

## مقدمه

برنج یکی از محصولات استراتژیک در جهان محسوب می‌شود که طبق آمار، در سال ۲۰۲۰ در حدود ۴۹۲/۸ میلیون تن تولید شده است. شلتوک به عنوان یکی از محصولات غذایی اصلی در ایران نیز، بیش از ۶۰۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی در ۱۵ استان را به خود اختصاص داده است [۴]. شلتوک را معمولاً در رطوبت بین ۱۸ تا ۲۴ درصد بر اساس وزن تر برداشت می‌کنند و برای ذخیره آن نیاز است که رطوبت آن به ۱۲ تا ۱۴ درصد بر اساس وزن تر کاهش یابد [۸]. شلتوک به صورت رایج توسط هوای گرم خشک می‌شود که یک فرایند آهسته است، چرا که به منظور جلوگیری از کاهش کیفیت به هنگام آسیاب کردن مجبور به استفاده از هوای با دمای نسبتاً پایین می‌باشیم [۱۱، ۱۹]. در این خشک‌کن‌ها فرایند خشک شدن از طریق همرفتی صورت می‌پذیرد. ابتدا هوای گرم دمای لایه بیرونی دانه برنج را بالا برده و باعث تبخیر رطوبت سطح دانه و انتقال آن به هوای خشک‌کن می‌شود. به محض خروج رطوبت از سطح دانه گرادیان رطوبت و دما درون دانه بوجود آمده به طوری که این گرادیان باعث بوجود آمدن تنش درون دانه شده و احتمال ایجاد ترک در دانه را پس از خشک شدن افزایش می‌دهد [۲]. این در حالی است که امواج مادون قرمز با نفوذ به لایه‌های درونی دانه برنج گرمای یکنواختی را در دانه بوجود آورده و باعث افزایش سرعت خشک شدن دانه می‌شود [۱۲].

زارع و همکاران (۲۰۱۴) به تحقیق روش ترکیبی مادون قرمز-هوای گرم برای خشک کردن لایه نازک شلتوک پرداختند. آن‌ها در این تحقیق شدت تابش امواج مادون قرمز، دما و سرعت هوای خشک‌کن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در روش ترکیبی، زمانی که از امواج مادون قرمز در تمام سطوح دمایی استفاده می‌شود، مدت زمان خشک شدن کاهش می‌یابد چرا که امواج مادون قرمز در محدوده طول موج‌های قابل جذب توسط آب هستند و با جذب این امواج توسط رطوبت موجود در شلتوک‌ها و ارتعاش مولکول‌های آب، گرما در درون دانه شلتوک تولید می‌شود و مشکلات مربوط به هدایت گرمایی و خشک شدن لایه سطحی تا حدودی کاهش می‌یابد. آن‌ها گزارش کردند که با در نظر گرفتن پارامترهای کیفیت و انرژی، بهترین تیمار با توان  $2000 \text{ W m}^{-2}$  و دمای ۳۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای  $0.15 \text{ m s}^{-1}$  می‌باشد [۱۶].

مهمترین هدف در طی فرایند خشک کردن تنظیم شرایط خشک شدن محصول به منظور دستیابی به کارایی مطلوب خشک‌کن است [۳، ۱۴]. افزایش محصول خشک شده با کیفیت مطلوب و کاهش مصرف انرژی از هدف‌هایی است که محققان به دنبال آن می‌باشند. بیشترین هزینه خشک‌کن‌ها طراحی و تولید آن‌ها نیست بلکه فعالیت‌های روزانه آن‌ها است، جایی که کنترل قادر است ضمن کاهش مصرف انرژی، کیفیت محصولات را نیز افزایش دهد [۱۵، ۱۷]. به همین منظور در این پژوهش از یک کنترل PID برای کنترل شرایط خشک کردن شلتوک با هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش کیفیت محصول بهره گرفته شده است.

کنترل خشک‌کن‌ها در سال‌های دور بطور گسترده به صورت دستی انجام شده است. کنترل خودکار خشک‌کن‌های صنعتی در سال‌های اخیر پس از زمانی که کنترلر PID در سال ۱۹۴۲ توسط زیگلر و نیکولز بیان شد، توسعه یافته است [۱۸].

روش‌های کنترلی به صورت گسترده در اواسط دهه ۷۰ در صنایع شیمیایی استفاده گردیده اما این درحالی است که به کارگیری کنترل در خشک‌کن‌ها نسبتاً کم است به طوری که بیشتر تحقیقات صورت گرفته همچنان متمرکز بر درک مکانیزم خشک شدن و کیفیت محصول است و به کنترل خودکار خشک‌کن‌ها کمتر توجه می‌شود. با وجود اینکه خشک کردن، جزء فن‌آوری‌های قدیمی است، اما ضرورت کاربرد کنترل در خشک کردن در

سال ۱۹۷۹ به صورت تئوری بیان گردید و بطور متوسط نرخ سالانه مقالات ارائه شده از سال ۱۹۹۸ در زمینه کنترل به مقدار ۳/۷ درصد است. اولین مقاله ای که از ابزار کنترلی به منظور خشک کردن استفاده شد، توسط من در سال ۱۹۸۳ بر روی شکر ارائه گردیده است [۲].

در خصوص بیان مزایای استفاده از کنترلر ها بر روی خشک کن ها تحقیقات گسترده ای صورت پذیرفته است. رنیک و نیلیست (۱۹۹۱) با بهینه سازی یک خشک کن دانه ای، هزینه های خشک شدن را به طور معناداری در حدود ۳۶ درصد کاهش داده اند. این مهم توسط کنترلر با تنظیم جریان هوا و توان گرمایی، به ترتیب حدود ۳۰ درصد و ۸۵ درصد کمتر از حالت نرمال انجام شده است [۱۳].

مک فارلن و بروس (۱۹۹۳) اعلام کردند که با استفاده از یک کنترلر بهینه بر خط بر روی یک خشک کن دانه ای توانسته اند به مقدار ۱۸ درصد زمان خشک شدن، ۶/۴ درصد مصرف سوخت فسیلی و ۱/۳ درصد کل هزینه ها را کاهش دهند [۱].

بعلاوه ایگواز و همکاران (۲۰۰۲) برای یک خشک کن دوار از کنترلر PI به منظور کنترل رطوبت نسبی استفاده نموده اند. آن ها اعلام کردند که استفاده از این کنترلر باعث افزایش ۱/۴ درصدی توان عملیاتی خشک کن شده، که این موضوع افزایش درآمد ۱۰۵ هزار دلاری در سال را به ارمغان آورده است. بنابراین واضح است که استفاده از ابزار کنترل باعث کاهش مصرف انرژی، کاهش ضایعات محصول خشک شده و افزایش راندمان تولید می گردد [۵].

برای تنظیم و طراحی یک کنترلر خودکار معمولاً به یک مدل ریاضی از خشک کن نیازمندیم. برای کنترل سامانه های پیچیده خشک کن ها، مدل های ریاضی زیادی توسعه یافته اند. در دسترس بودن کامپیوتر ها در دو دهه اخیر، محاسبه، حل و شبیه سازی مدل های پیچیده را ممکن ساخته است. نصرتی و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل تک متغیره لایه نازک متأثر از شرایط خشک شدن به منظور پیش بینی اثر تابش مادون قرمز در روش ترکیبی خشک کردن شلتوک ارائه کردند [۹]. همچنین نصرتی و همکاران (۲۰۱۹) از قانون پخش فیک برای شبیه سازی حرکت رطوبت درون دانه شلتوک بهره بردند. آنها با ارائه یک تکنیک نوین ضریب پخش رطوبت دانه شلتوک را به صورت یک معادله Polynomial-Arrhenius برای شبیه سازی اثر تابش مادون قرمز در روش ترکیبی خشک کردن شلتوک بدست آوردند [۱۰].

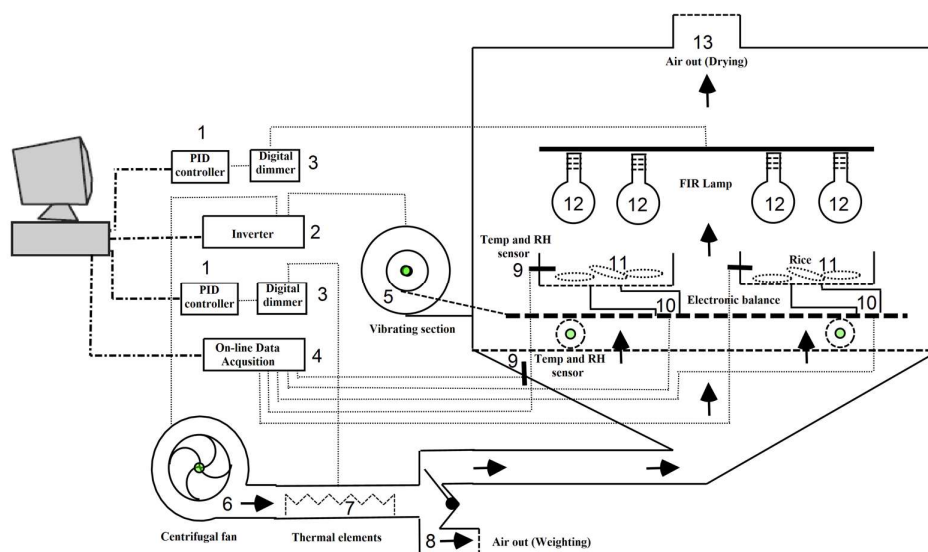
در این تحقیق به منظور ایجاد شرایط بهینه برای خشک کردن شلتوک با هدف افزایش کیفیت محصول خشک شده یک کنترلر PID طراحی و از یک مدل تک دانه به منظور پیش بینی تغییرات رطوبت درون دانه بهره گرفته شد. کنترلر PID با توجه به تغییرات رطوبت و گرادیان رطوبت درون دانه شرایط خشک شدن را به گونه ای تغییر می دهد تا ضمن کاهش مصرف انرژی میزان دانه های شکسته شده را به حداقل ممکن کاهش دهد.

## مواد و روش ها

### ساختمان خشک کن ترکیبی مادون قرمز

یک خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز بستر ارتعاشی به منظور انجام آزمایش در شرایط مختلف بر روی نمونه های شلتوک، در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. طر حواره این خشک کن در شکل ۱ نشان داده شده است. هوای ورودی این خشک کن توسط یک فن گریز از مرکز با قابلیت تنظیم سرعت با استفاده از یک اینورتر (N50-007SF, Korea)، تامین گردید. بر اساس گزارش های ارائه شده سرعت هوای ورودی  $0.15 \text{ m.s}^{-1}$  با استفاده

از یک سرعت سنج باد با سنسور گرمایی با دقت  $\pm 0.3 \text{ m.s}^{-1}$  تنظیم شد [۶]. بخش گرمایشی خشک کن از دو المنت حرارتی با توان اسمی ۱kW و سه المنت حرارتی ۰/۵ kW تشکیل شد که توان آنها با استفاده از یک کنترل PID بمنظور تنظیم دمای هوای ورودی در سطوح مختلف، کنترل شد. دما و رطوبت نسبی هوای ورودی با استفاده از سنسور DHT22 با دامنه عملکرد صفر تا ۱۰۰ درصد برای رطوبت نسبی و ۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس برای دما اندازه گیری گردید. سنسور ها با استفاده از دستگاه Testo 625 کالیبره شدند. طراحی خشک کن بگونه ای بود که لامپ های مادون قرمز در بالای بستر خشک کن قرار گیرند. به منظور تأمین شدت تابش یکنواخت بر روی دانه های شلتوک، در بالای هر سبد سه لامپ مادون قرمز با توان ۲۷۵ W نصب شد. فاصله لامپ ها تا سطح دانه های شلتوک در طول انجام آزمایش در حدود ۲۰ cm تنظیم گردید. برای تأمین شدت تابش در سطوح مختلف، توان لامپ ها با استفاده از یک دیمر دیجیتالی کنترل گردید بطوریکه یک تابش سنج سیلیکونی (Casella 187010b-02, UK) شدت تابش را اندازه گیری می نمود. بمنظور تأمین حرکت ارتعاشی خشک کن، بستر دانه ها بر روی چهار بلبرینگ قرار گرفت و یک موتور الکتریکی حرکت رفت و برگشتی بستر را تأمین نمود. فرکانس ارتعاشی دانه با استفاده از یک اینورتور که سرعت موتور الکتریکی را کنترل می کند، بر روی ۱۰ Hz تنظیم گردید [۱۶]. سبد دانه های شلتوک با ابعاد ۶×۳۰×۳۰ توسط یک لود سل با ظرفیت ۳ kg (Celltec, PA2) بر روی بستر دانه ثابت نگه داشته شد بطوریکه در طول آزمایش وزن دانه در فاصله زمانی معین قابل اندازه گیری باشد. بمنظور جلوگیری از اثر ارتعاش و جریان هوا به هنگام وزن کردن دانه ها، حرکت ارتعاشی متوقف و جریان ورودی هوا توسط دریچه ای به بیرون از خشک کن هدایت گردید.

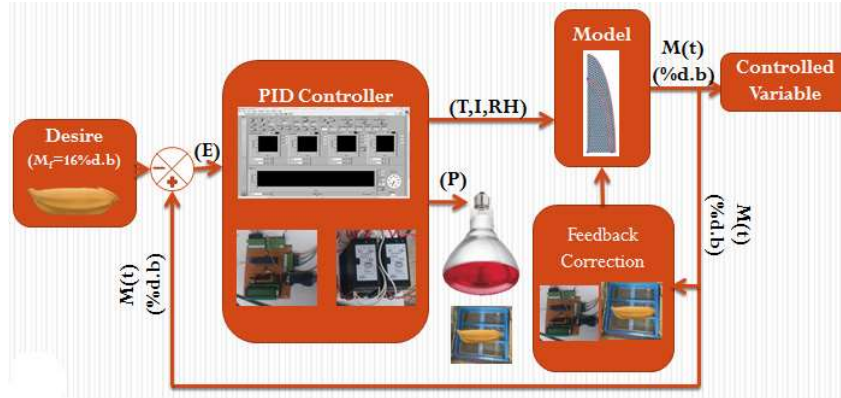


شکل ۱. طرحواره خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز بستر ارتعاشی: ۱-کنترلر PID ۲-اینورتور ۳-دیمر دیجیتالی ۴-ثبت کننده داده برخط ۵-واحد ارتعاش ۶-دمنده ۷-گرم کن ۸-خروجی هوا (در زمان وزن کردن محصول) ۹- حسگر دما و رطوبت نسبی ۱۰- لودسل ۱۱-شلتوک ۱۲-لامپ مادون قرمز ۱۳-خروجی هوا (در زمان خشک کردن محصول)

#### سامانه کنترلی

شکل ۲ قسمت های مختلف سامانه کنترلی خشک کن ترکیبی مادون قرمز را نشان می دهد. موضوع اصلی در استفاده از سامانه کنترلی برای خشک کردن ترکیبی مادون قرمز، کاهش مصرف انرژی و کاهش ضایعات است. در

خشک کن ترکیبی مادون قرمز دو عامل اصلی تأثیر گذار بر مقدار مصرف انرژی و کیفیت دانه شلتوک دمای هوای ورودی و شدت تابش مادون قرمز است چراکه این دو عامل علاوه بر مدت زمان خشک شدن، بر تغییرات گرادیان رطوبت درون دانه شلتوک نیز اثر گذارند. بنابراین مسئله اصلی در سامانه کنترلی خشک کن ترکیبی مادون قرمز پیدا کردن مقدار دمای هوای ورودی و شدت تابش مادون قرمز در طول آزمایش است بطوری که مقدار رطوبت و گرادیان رطوبت دانه در مقدار مطلوب خود تگه داشته شوند.



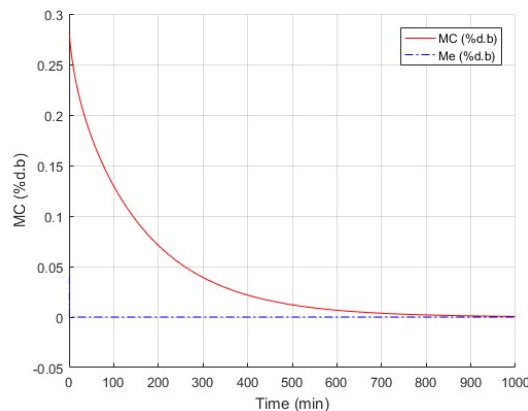
شکل ۲. فلوچارت سیستم کنترلی خشک کن ترکیبی مادون قرمز

در این تحقیق برای اندازه گیری مقدار رطوبت و گرادیان رطوبت دانه شلتوک در طول آزمایش از مدل تک دانه شلتوک استفاده شده است. مدل ارائه شده در این تحقیق قادر است با توجه به دمای هوای ورودی، شدت تابش مادون قرمز و رطوبت نسبی هوا تغییرات رطوبت درون دانه را پیش بینی کند. رابطه ۱ تابع تبدیل مدل تک دانه شلتوک را نشان می دهد.

$$[K_3] \dot{\bar{M}}(t) + [K] \bar{M}(t) = \bar{P}(t) \quad (1)$$

$$\Rightarrow TF = \frac{M(S)}{P(S)} = \frac{1}{[K_3]S + [K]}$$

در رطوبت تعادلی صفر (%d.b) پاسخ زمانی مدل تک دانه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. پاسخ زمانی مدل تک دانه شلتوک

برای تغییر دمای هوای ورودی و شدت تابش مادون قرمز از دیمر دیجیتالی (ERVA1-240PA) استفاده شده است. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده، ورودی دیمر های دیجیتالی ولتاژ DC بین ۰ تا ۱۰ ولت و خروجی

آن ولتاژ AC بین ۰ تا ۲۲۰ ولت می باشد به طوری که با تغییر ولتاژ ورودی بین ۰ تا ۱۰ ولت، خروجی آن بین ۰ تا ۲۲۰ ولت تغییر می کند. در ادامه تغییر ولتاژ ورودی لامپ های مادون قرمز و گرم کن ها تغییر شدت تابش و دمای هوای ورودی را بدنبال خواهد داشت.



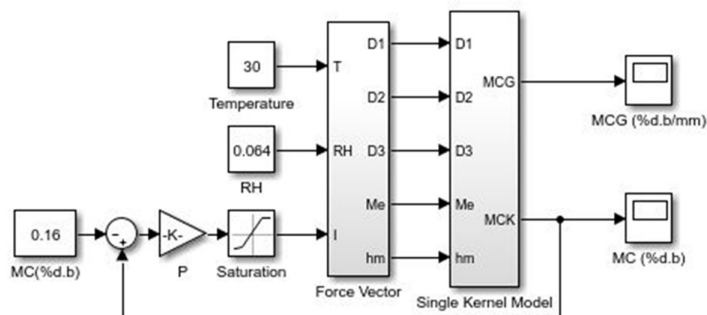
شکل ۴. دیمر دیجیتالی

برای تامین ولتاژ ورودی دیمرها از یک منبع تغذیه دیجیتالی استفاده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده، این منبع تغذیه شامل یک میکروکنترلر ATmega32 است که با استفاده از PWM ولتاژ بین ۰ تا ۵ ولت ایجاد می کند. از یک Omp-amp با ضریب ۲ برای افزایش ولتاژ تا ۱۰ ولت مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۵). برای ارتباط بین میکروکنترلر و کامپیوتر رومیزی نیز از کابل RS232 بهره گرفته شده است.



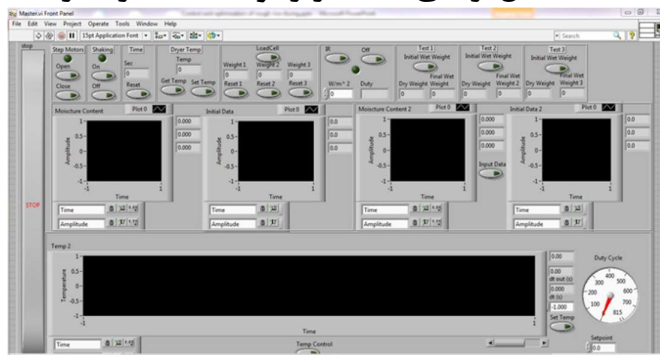
شکل ۵. برد میکرو AVR

برای تعیین ضرایب کنترلر PID نیز ابتدا مدل ارائه شده، در بخش Simulink MATLAB شبیه سازی شد. شکل ۶ دیاگرام مدل تک دانه در بخش شبیه ساز متلب را نشان می دهد. در ادامه با استفاده از کتابخانه PID Tuning ضرایب کنترلر PID تعیین گردید.



شکل ۶. دیاگرام کنترل تناسبی

در نهایت همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است از نرم افزار (2014) LabVIEW برای پردازش اطلاعات و اجرای سیستم کنترلی بر روی خشک کن ترکیبی مادون قرمز مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۷. نرم افزار (2014) LabVIEW جهت پردازش و اجرای سیستم کنترلی طراحی شده برای خشک کن ترکیبی مادون قرمز

### تحلیل نتایج

بررسی اثر کنترلر PID بر کاهش مصرف انرژی و کیفیت محصول

دمای دانه شلتوک در زمان تابش مادون قرمز در تمام سطوح دمای هوای ورودی، بیشتر از ۴۰ درجه سلسیوس است به طوری که کاهش دمای دانه از ۴۰ درجه سلسیوس به هر دلیل باعث تغییر حالت دانه شلتوک شده و نتیجه آن ایجاد ترک درون دانه است. از طرفی مقدار مصرف انرژی ناشی از افزایش دمای هوای ورودی نسبت به FIR قابل ملاحظه بوده و همچنین دمای بالای ۴۰ درجه سلسیوس بر شدت تابش اثر گذار است. بنابراین در طراحی سامانه کنترلی مقدار دمای هوای ورودی بر روی ۴۰ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته شد و اجازه داده شد کنترلر PID مقدار مطلوب FIR را بین ۰ تا  $2000 \text{ Wm}^{-2}$  بر اساس مقدار رطوبت دانه شلتوک تغییر دهد.

بررسی پاسخ زمانی مدل ارائه شده نشان می دهد، سیستم ما یک سیستم پایدار (Stable) با دقت مناسب و بدون خطای حالت ماندگار (Steady State Error) است. بنابراین هدف از به کارگیری کنترلر PID تعیین مشخصه اصلی حالت گذرای با هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش کیفیت محصول می باشد.

بنابراین ساده ترین کنترلر یعنی کنترلر تناسبی انتخاب شد. تابع تبدیل حلقه بسته و حلقه باز برای سیستم کنترل

تناسبی برابر است با:

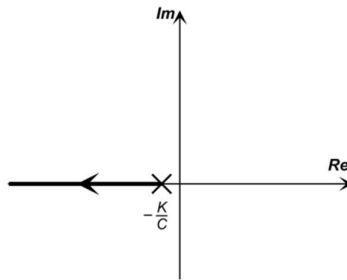
$$\text{Closed Loop TF} = \frac{k_p}{[C]S + [K]} \quad (2)$$

$$1 + \frac{k_p}{[C]S + [K]}$$

$$\text{Open Loop TF} = \frac{k_p}{[C]S + [K]} \quad (3)$$

از آنجا که محل قرار گیری قطب های سمت چپ یک سیستم حلقه بسته رفتار حالت گذرا را تعیین می کند از روش ترسیمی مکان هندسی ریشه برای تعیین ضرایب تناسبی (Proportional) استفاده شد. با توجه به شرایط زاویه (رابطه ۴) مکان هندسی ریشه ها در شکل ۸ نشان داده شده است.

$$\text{Angle Condition} = -\theta = \pm(2n + 1) \times 180 \quad (4)$$



شکل ۸. نمودار مکان هندسی ریشه ها

پاسخ زمانی این کنترلر به ازای ورودی پله نیز برابر است با:

$$\text{if } R(s) = \frac{1}{S} \Rightarrow C(S) = \frac{1}{S} \frac{K_p}{[C]S + [K]} = \frac{1}{S} \frac{K_p}{S + \frac{[K] + K_p}{[C]}} = \frac{K_p}{S} - \frac{K_p}{S + \frac{[K] + K_p}{[C]}} \quad (5)$$

$$C(t) = \frac{K_p}{[K] + K_p} - \frac{K_p}{[K] + K_p} e^{-\left(\frac{[K] + K_p}{[C]}\right)t} = \frac{K_p}{[K] + K_p} \left(1 - e^{-\left(\frac{[K] + K_p}{[C]}\right)t}\right) \quad (6)$$

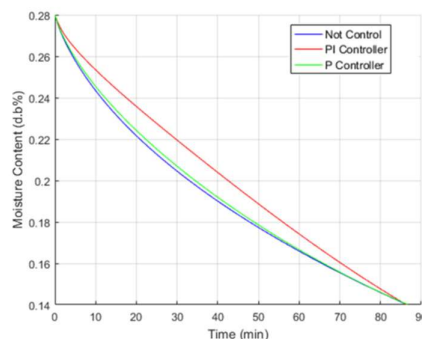
در نهایت با استفاده از شرایط دامنه و تعیین مشخصه های اصلی حالت گذرا مقدار ضریب تناسبی انتخاب شد (رابطه ۷).

$$\text{Magnitude Condition} = \left(\frac{k_p}{[C]}\right) \frac{1}{l_p} = 1 \quad (7)$$

برای بررسی اثر کنترلر PID بر مقدار مصرف انرژی ویژه و کیفیت محصول، آزمایش با دمای ورودی  $40^\circ\text{C}$  و شدت تابش مادون قرمز  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  که یکی از شرایط بهینه برای خشک کردن شلتوک می باشد انتخاب شد. نتایج نشان داد مدت زمان لازم برای کاهش رطوبت دانه شلتوک به مقدار مطلوب ۱۴ (%d.b) در شرایط بدون استفاده از کنترلر در دمای  $40^\circ\text{C}$  و شدت تابش مادون قرمز  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ ، ۸۶ دقیقه است. برای مقایسه تغییرات مقدار رطوبت، حداکثر گرادیان رطوبت، FIR و میزان مصرف انرژی ویژه [۸] تحت شرایط کنترل نشده و کنترل شده بوسیله کنترلر PID ضرایب کنترلر به گونه ای انتخاب شد تا در مدت زمان ۸۶ دقیقه مقدار رطوبت به مقدار مطلوب ۱۴ (%d.b) کاهش یابد (جدول ۱). البته همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده مقدار ضرایب PID نیز با توجه به



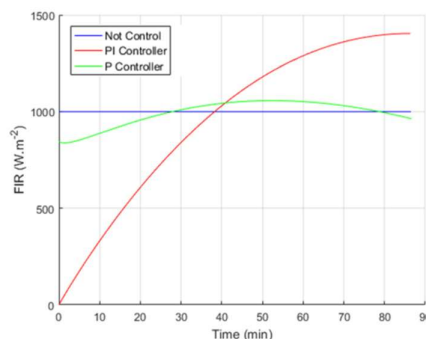
نوع رفتار گذرا، شرایط پایداری و وجود خطای حالت ماندگار مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ تغییرات رطوبت دانه شلتوک در شرایط کنترل شده و بدون کنترل را نشان می‌دهد.



شکل ۹. تغییرات رطوبت دانه تحت شرایط کنترلی و بدون کنترل

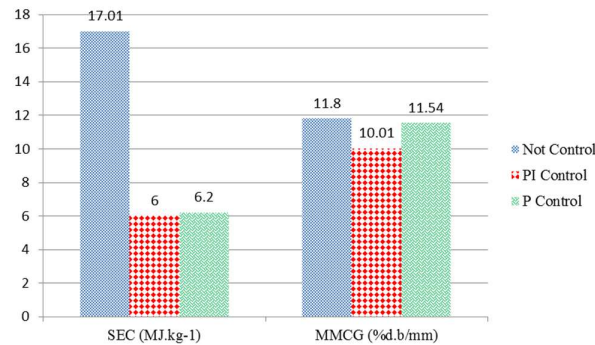
#### مصرف انرژی

شکل ۱۰ تغییرات مقدار FIR را برای کاهش رطوبت دانه شلتوک به مقدار ۱۴ (%d.b) تحت شرایط کنترل شده و بدون کنترل در مدت زمان ۸۶ دقیقه نشان می‌دهد. در شرایط بدون کنترل مقدار FIR در طول آزمایش ثابت و برابر  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  بود در حالی که در شرایط کنترل شده مقدار رطوبت بین  $0$  تا  $2000 \text{ Wm}^{-2}$  متغیر است. همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شد در شرایط بدون کنترل نرخ خشک کردن در شروع آزمایش بالا و به تدریج روند کاهشی را دنبال کرد به طوری که در انتهای آزمایش نرخ خشک کردن شلتوک به حداقل مقدار خود رسید، این در حالی است که در شرایط کنترل شده به روش Aggressive نرخ خشک کردن شلتوک از ابتدا تا انتهای آزمایش تقریباً دارای مقدار ثابتی بود چرا که در این روش کنترلی مقدار FIR در شروع خشک کردن که نرخ خشک کردن مقدار بالایی است، دارای شدت تابش صفر ( $\text{Wm}^{-2}$ ) و در انتهای خشک کردن که نرخ خشک کردن کاهش می‌یابد، به مقدار حداکثر خود برابر  $1400 \text{ Wm}^{-2}$  رسیده است. اما در شرایط کنترلی به روش Robust این موضوع متفاوت بود. نرخ خشک کردن در این روش نسبت به شرایط بدون کنترل تقریباً برابر و نمودار خشک کردن شلتوک همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده بر روی یکدیگر منطبق بود اما همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است مقدار FIR در ابتدای آزمایش از مقدار  $844 \text{ Wm}^{-2}$  شروع شد در دقیقه ۲۸ از مقدار  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  عبور کرد و در دقیقه ۵۲ به مقدار حداکثر خود برابر  $1056 \text{ Wm}^{-2}$  رسید و در ادامه مقدار FIR یک روند کاهشی را دنبال کرد تا در نهایت در دقیقه ۸۶ به مقدار  $944 \text{ Wm}^{-2}$  رسید.



شکل ۱۰. تغییرات FIR تحت شرایط کنترلی و بدون کنترل

شکل ۱۱ مقدار مصرف انرژی ویژه تحت شرایط کنترل شده و بدون کنترل را نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات FIR در شرایط کنترلی همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده مصرف انرژی ویژه به مقدار  $11 \text{ MJ.kg}^{-1}$  نسبت به شرایط بدون کنترل کاهش یافت. دلیل این کاهش مصرف انرژی، تغییرات FIR متناسب با تغییرات رطوبت دانه شلتوک در طول آزمایش بود به طوری که کنترلر PID توانست مقدار انرژی را به مقدار  $6.4\%$  کاهش دهد.

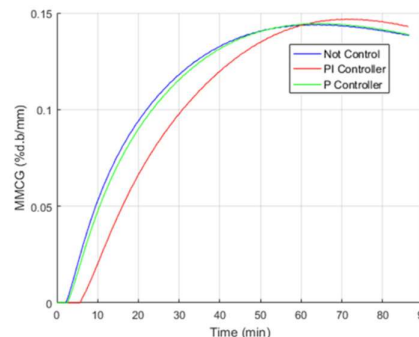


شکل ۱۱. مقایسه مصرف انرژی ویژه (SEC) و حداکثر گرادیان رطوبت (MMCG) بعد یک دوره ۳۰ دقیقه‌ای از خشک کردن

#### کیفیت محصول

بررسی میزان مصرف انرژی، مدت زمان خشک شدن و کیفیت دانه خشک شده نشان داد یکی از شرایط بهینه برای کاهش درصد دانه های ترک دار انتخاب دمای  $40^{\circ}\text{C}$  و شدت تابش  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  است به طوری که تحت این شرایط حداکثر گرادیان در ۳۰ دقیقه از زمان خشک شدن دانه شلتوک اتفاق افتاده و مقدار آن  $11/8 (\%d.b/mm)$  بوده است. تغییرات گرادیان رطوبت تحت شرایط کنترل شده در شکل ۱۲ و جدول ۱ نشان داده شده است. نشان داد در شرایط کنترل شده بعد از ۳۰ دقیقه از خشک شدن مقدار گرادیان رطوبت نسبت به شرایط بدون کنترل بین ۲ تا ۱۵ درصد کاهش یافت.

همچنین بررسی های انجام شده نشان داد کنترلر PID قادر است مقدار حداکثر گرادیان رطوبت (MMCG) را در طول آزمایش بدون استراحت دهی در مقدار مطلوب نگه دارد اگرچه این روش باعث افزایش چهار برابری مدت زمان لازم برای کاهش رطوبت شلتوک شد و ما را از هدف خود یعنی افزایش نرخ خشک شدن دور کرد. بنابراین با توجه به بررسی های انجام شده می توان گفت خشک کردن دانه شلتوک با استفاده از کنترلر PID به همراه استراحت دهی در مدت زمان کافی نه تنها مصرف انرژی را کاهش می دهد بلکه باعث افزایش کیفیت محصول و کاهش درصد دانه های ترک دار نیز می گردد.



شکل ۱۲. تغییرات MMCG تحت شرایط کنترلی و بدون کنترل

جدول ۱. نتایج شبیه سازی تغییرات رطوبت درون دانه و مقدار مصرف انرژی ویژه با استفاده از کنترلر

تغییرات رطوبت بعد از ۳۰ دقیقه خشک کردن	مصرف انرژی ویژه مربوط به FIR (MJ kg <sup>-1</sup> )	مدت زمان لازم برای کاهش رطوبت تا ۱۴(%d.b) (دقیقه)	ضرایب کنترل			خشک کردن در دمای ۴۰°C و شدت تابش ۱۰۰۰W m <sup>-2</sup>
			P	I	D	
MC (%d.b)	MMCG (%d.b/mm)					بدون کنترلر
۲۰/۶۱	۱۱/۸	۱۷/۰۱	۸۶	-	-	-
۲۱/۸۲	۱۰/۰۱	۶	۸۶/۳	۶/۸۹	۳۸/۴۶	۰
۲۰/۶۹	۱۱/۵۴	۶/۲۰	۸۶/۶۳	۶۰۳۵/۰۳	۰	۰

### نتیجه گیری

خشک کردن دانه شلتوک یکی از عملیات وسیع و کاربردی حفاظت از دانه شلتوک در جهان است. مرحله خشک کردن شلتوک یکی از مراحل پر اهمیت در بین فرایندهای برداشت، خشک کردن، ذخیره سازی و انتقال به حساب می آید به طوری که خشک کردن نادرست آن یکی از دلایل اصلی ضایعات به حساب می آید. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد استفاده از فناوری های نوین مانند مادون قرمز و به کارگیری کنترلر های خودکار این امکان را فراهم می کنند تا ضمن کاهش هزینه های تولید، محصول با کیفیت بالایی را به بازار عرضه نمود.

مراجع:

1. Bruce, D. M.; McFarlane, N. J. B., Control of Mixed-flow Grain Dryers: An Improved Feedback-plus-Feedforward Algorithm. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **1993**. 56(3): p. 225-238.
2. Cnossen, A. G.; Siebenmorgen, T. J.; Yang, W.; Bautistad, R. C. An Application of Glass Transition Temperature to Explain Rice Kernel Fissure Occurrence During the Drying Process. *Drying Technol.*, **2001**. 19, 1661-1682. DOI: 10.1081/DRT-100107265.
3. Dufour, P., Control Engineering in Drying Technology: Review and Trends. *Drying Technology*, **2006**. 24: p. 889-904.
4. FAO. World Food Situation. FAO Cereal Supply and Demand Brief. <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/> (accessed February 06, 2020).
5. Iguaz, A.; Budman, H.; Douglas, P. L., Modeling and Control of an Alfaalfa Rotary Dryer. *Drying Technology*, **2002**. 20(9): p. 1869-1887.
6. Jelveh, B., Design, Fabricated and Evaluation of an Infrared-assited Vibratory Bed Grain Dryer, A Case study: Paddy Drying, in Faculty of agriculture. **2014**, Shiraz University.
7. Mnn, W., Digital Control of a Rotary Dryer in the Sugar Industry. *Automatica*, **1983**. 19(2): p. 131-148.
8. Nosrati, M., Control and Optimization of Rough Rice Drying in a Laboratory Scale Infrared-assisted Vibratory Bed Dryer, in Biosystem Engineering. **2018**, Shiraz University: Shiraz, Iran.
9. Nosrati, M.; Zare, D.; Nassiri, M.; Jafari, A.; Eghtesad, M., Modeling and Optimization of Rough Rice Drying under Hot Air-infrared Radiation in a Laboratory Scale Vibratory Bed Dryer. *IJBSE*, **2018**. 49(3): p. 423-435.

10. Nosrati, M.; Zare, D.; Singh, C. B.; Strohshine, R. L. New approach in determination of moisture diffusivity for rough rice components in combined far-infrared drying by finite element method. *Drying Technol.*, **2019**. 1-12. DOI: 10.1080/07373937.2019.1658203.
11. Prakash, B., *Mathematical Modeling of Moisture Movement within a Rice Kernel during Convective and Infrared Drying*. **2005**, University of California, Davis.
12. Ragab, K.; Zhongli, P.; Adel, S.; James, F. T. *Drying characteristics and quality of rough rice under infrared radiation heating*; American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007.
13. Ryniecki, A.; Nellist, M. E., Optimization of control systems for near-ambient grain drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **1991**. 48: p. 1-17.
14. Srikiatden, J.; Roberts, J. S., *Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanisms, Models, and Measurements*. *International Journal of Food Properties*, **2007**. 10(4): p. 739-777.
15. Wu, J.; Zhang, H.; Li, F. A Study on Drying Models and Internal Stresses of the Rice Kernel During Infrared Drying. *Drying Technol.*, **2016**. 35, 680-688. DOI: 10.1080/07373937.2016.1201834.
16. Zare, D.; Naderi, H.; Ranjbaran, M. Energy and Quality Attributes of Combined Hot Air-infrared Drying of Paddy. *Drying Technol.*, **2014**. 33, 570-582. DOI: 10.1080/07373937.2014.962143.
17. Zhou, X.; Liu, L.; Fu, P.; Lyu, F.; Zhang, J.; Gu, S.; Ding, Y. Effects of Infrared Radiation Drying and Heat Pump Drying Combined with Tempering on the Quality of Long-grain Paddy Rice. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **2018**. 53, 2448-2456. DOI: 10.1111/ijfs.13834.
18. Ziegler, J. G.; Nichols, N. B., Optimum Settings for Automatic Controllers. *American Society of Mechanical Engineers*, **1942**. 64(11): p. 759-771.
19. Zomorodian, A.; Moradi, M., Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for cuminumcyminum. *Journal of Agricultural Science and Technology*, **2010**. 12(4): p. 401-408.

## Optimization of Rough Rice Drying in a Laboratory Scale Infrared-assisted Vibratory Bed Dryer using PID controller

Daiush Zare<sup>1\*</sup>, Mojtaba Nosrati<sup>1</sup>, Seyed Mehdi Nassiri<sup>1</sup>

1. Biosystems Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran.

### Abstract

The combined Far-infrared Radiation (FIR) method was studied to dry rough rice (*Oryza Sativa* cv. Champa) in a laboratory scale vibratory bed dryer. Experimental factors included FIR intensity (without radiation as a control, 1000 and 2000 W m<sup>-2</sup>) and inlet air temperature (30, 40 and 50 °C). Drying rate, percentage of cracked kernel (PCK) and specific energy consumption (SEC) were measured and evaluated. Based on the results of experiments, the optimum drying condition was introduced as FIR intensity of 1000 W m<sup>-2</sup> and inlet air temperature of 40 °C. In addition, to improve the performance of the dryer a PID control system was designed. The controller was used the single kernel model to measure the moisture content of rough rice during drying. Results showed that the control system caused 65% decrease in SEC, and the MMCG values were diminished correspondingly by 2 to 15%.

**Key words:** control, drying, single kernel model, rough rice, vibratory bed, far-infrared radiation

\*Corresponding author  
E-mail: dzare@shirazu.ac.ir