



Prediction of output moisture content of dill from hot-air conveyor belt dryer using machine vision

Hawin Alipanahi¹ | Nasser Behroozi-Khazaei² | Kaveh Molazadeh³ | Hosain Darvishi⁴

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: havinalipanahi@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: n.behroozi@uok.ac.ir
3. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: k.mollazade@uok.ac.ir
4. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: H.darvishi@uok.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 7, 2023

Revised: Dec. 11, 2023

Accepted: Dec. 23, 2022

Published online: Summer 2023

Keywords:

*Artificial neural network,
Moisture content,
Machine vision,
Shrinkage,
drying,
Image processing.*

ABSTRACT

Predicting the output moisture content of product from the conveyor belt hot air dryer for controlling the drying process is one of important parameters. Therefore, in this research, a conveyor belt dryer with a hot air flow equipped with a machine vision system was developed. Dryer also consists of air temperature and conveyor belt speed controlling section, lighting and imaging system. The control sections for air temperature and conveyor belt speed include SSR relays and a programmed algorithm in MATLAB software environment. The machine vision section comprises three cameras placed at the beginning, middle, and end of the conveyor belt. In this study, experiments were conducted at two temperature levels of 50 and 60 °C and three levels of conveyor belt speed for each treatment. Then, using the developed image processing algorithm in MATLAB, the changes in shrinkage were extracted and analyzed. Finally, the out moisture content of the product from dryer was modeled using the ANN. The results of this study indicated that the out moisture content and shrinkage of the dried product are dependent on temperature of dryer and speed of the conveyor belt. Specifically, with an increase in temperature and a decrease in conveyor belt speed, the degree of shrinkage increases. Finally, results revealed that the ANN with 4-12-1 structure had best prediction performance with 1.06e-6, 1.24e-6, 9.46e-7 of RMSE and 0.9999, 0.9999, 0.9999 of R, respectively for training, validation and testing data.

Cite this article: Alipanahi, A., Behroozi-Khazaei, N., Molazadeh, K., & Darvishi, D. (2023). Prediction of output moisture content of dill from hot-air conveyor belt dryer using machine vision, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 54 (2), 49-66. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.367648.665529>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.367648.665529>





پیش‌بینی محتوای رطوبت خروجی محصول شوید از خشک‌کن تسمه نقاله‌ای با جریان هوای گرم به کمک بینایی ماشین

هاوین علی‌پناهی^۱ | ناصر بهروزی خزاعی^۲ | کاوه ملازاده^۳ | حسین درویشی^۴

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: havinalipanaahi@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: n.behroozi@uok.ac.ir

۳. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: k.mollazade@uok.ac.ir

۴. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: H.darvishi@uok.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مدل‌سازی میزان رطوبت خروجی از خشک‌کن‌های تسمه نقاله‌ای یک از مهمترین پارامترها برای کنترل فرایند خشک کردن در این نوع خشک‌کن‌ها می‌باشد. بدین منظور، در این پژوهش یک خشک‌کن تسمه نقاله‌ای جریان هوای گرم مجهز به سامانه بینایی ماشین به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی محتوای رطوبتی محصول خروجی از خشک‌کن توسعه داده شد. خشک‌کن مورد نظر دارای بخش‌های کنترل دمای هوا، سرعت تسمه نقاله، سامانه تصویربرداری و نورپردازی می‌باشد. بخش کنترل دمای هوا و سرعت تسمه نقاله شامل رله‌های SSR و الگوریتم برنامه‌نویسی شده در محیط نرم‌افزار MATLAB می‌باشد. بخش بینایی ماشین شامل سه دوربین که در ابتدا، وسط و انتهای تسمه نقاله قرار گرفته است، می‌باشد. در این پژوهش، آزمایش‌ها در دو سطح دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و سه سطح سرعت حرکت تسمه نقاله برای هر تیمار انجام شدند. سپس به کمک الگوریتم پردازش تصویر توسعه داده شده در محیط MATLAB، تغییرات چروکیدگی استخراج و مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، محتوای رطوبت نهایی محصول به کمک یک مدل شبکه عصبی مصنوعی مدل‌سازی شد. نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از آن بود که محتوای رطوبت نهایی و میزان چروکیدگی محصول خشک شده وابسته به دمای خشک‌کن و سرعت حرکت تسمه نقاله می‌باشد. بدین صورت که، با افزایش دما و کاهش سرعت حرکت تسمه نقاله، میزان چروکیدگی افزایش می‌یافت. شبکه با ساختار ۱-۱۲-۴ بهترین مدل با RMSE، 1.06×10^{-6} ، 6.24×10^{-7} و 9.46×10^{-7} و R ، 0.9999 ، 0.9999 و 0.9999 به ترتیب برای داده‌های آموزش، ارزیابی و تست بدست آمد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۹/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲

تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

محتوای رطوبتی،

بینایی ماشین،

چروکیدگی،

شبکه عصبی مصنوعی،

خشک کردن،

پردازش تصویر

استناد: علی‌پناهی، هاوین؛ بهروزی خزاعی، ناصر؛ ملازاده، کاوه و درویشی، حسین. (۱۴۰۲). پیش‌بینی محتوای رطوبت خروجی محصول شوید از خشک‌کن تسمه نقاله‌ای با جریان هوای گرم به کمک بینایی ماشین، مجله مهندسی بیوسیستم ایران، ۵۴ (۱)، ۴۹-۶۶.



<https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.367648.665529>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.367648.665529>

مقدمه

بسیاری از محصولات کشاورزی که به عنوان گیاه دارویی استفاده می‌شوند، قابلیت نگهداری و مصرف به صورت تازه، در تمامی فصل‌های سال را ندارند. لذا می‌توان از خشک شده آن‌ها استفاده کرد که فعالیت‌های آنزیمی در این محصولات به حداقل مقدار خود برسد و قابلیت نگهداری برای تمامی فصل‌ها را داشته باشند.

یکی از گیاهانی که ساقه و برگ آن به صورت تازه و خشک شده به منظور خواص دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شوید یا شبت می‌باشد. گیاه شوید یا شبت با نام علمی *Anethum graveolens L.* گیاهی یک ساله، معطر و علفی از خانواده چتریان می‌باشد که منشأ آن نواحی شرقی مدیترانه است. نام انگلیسی آن *dill* از ریشه *lull* به معنی تسکین دهنده و آرام بخش برگرفته شده است (Callan et al., 2007). مهم‌ترین مواد موثره این گیاه دی کارون و لیمونن می‌باشند (Canter et al., 2005). با توجه به اینکه رطوبت بالا سبب رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌شود و شوید یک گیاه با محتوای رطوبتی بالا (حدود ۷۸ تا ۸۲ درصد بر پایه تر) می‌باشد لذا جهت جلوگیری از واکنش‌های بیوشیمیایی، این محصول جهت ارائه به بازار معمولاً خشک می‌گردد. استفاده از فرآیند سنتی خشک کردن محصولات کشاورزی، به‌ویژه گیاهان دارویی، دارای برخی معایب می‌باشد، از جمله در معرض گرد و غبار و حشرات قرار گرفتن که موجب کاهش کیفیت و افزایش ضایعات محصول می‌شود. بنابراین امروزه از خشک‌کن‌های صنعتی موجود استفاده می‌شود. خشک کردن نه تنها به حفظ محصول در برابر فساد سریع کمک می‌کند و سبب افزایش زمان ماندگاری محصول می‌شود، بلکه موجب کاهش حجم و وزن محصول می‌گردد که این مسئله به نوبه خود سبب سهولت در بسته‌بندی، حمل و نقل و انبارداری می‌شود (هدایت و همکاران، ۱۳۹۴، Adak et al., 2012; 2017; Wannapakhe et al., 2012; 2017).

خشک کردن به معنی کاهش رطوبت محصول تا سطحی از رطوبت است که بتوان محصول را برای مدت زمان معینی در انبار بدون فساد نگهداری کرد، این امر یک فرآیند ترکیبی شامل گرم شدن محصول (انتقال حرارت) و تبخیر رطوبت از سطح محصول (انتقال جرم) می‌باشد (هدایت و همکاران، ۱۳۹۴; Wankhade et al., 2013). رایج‌ترین روش خشک کردن محصولات کشاورزی در صنعت، خشک کردن به وسیله‌ی هوای داغ می‌باشد. خشک‌کن‌های تونلی جریان هوای گرم به دلیل سادگی کار، دسترسی آسان و هزینه پایین بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. اگرچه این خشک‌کن جزء متداول‌ترین خشک‌کن‌ها در صنعت کشاورزی می‌باشد اما سامانه‌ها یا حسگرهایی که جهت تعیین یا اندازه‌گیری صحیح میزان رطوبت نهایی لازم جهت انبارداری محصول خشک‌شده صنعتی استفاده می‌شوند، یا صحت پایین دارند یا به دلیل معایب دیگرشان عمومیت ندارند. برخی از این سامانه‌ها یا حسگرها عبارت‌اند از: حسگرهای مقاومتی، حسگرهای خازنی، سامانه طیف‌سنجی NIR، سامانه مجهز به حسگرهای رطوبت نسبی و دمای هوای ورودی و خروجی از خشک‌کن. در دو روش اول دبی جرمی محصول و ضخامت نمونه‌ها باید ثابت باشد و روش سوم نیز هزینه‌بر است (Mizukami et al., 2006; Rywotycki, 2003). لذا باید به دنبال روش‌هایی جهت تعیین میزان رطوبت خروجی بود که هزینه‌ی آن کم و قابلیت اجرا شدن را دارا باشند. در صورت اندازه‌گیری محتوای رطوبتی با صحت مناسب می‌توان با کنترل سرعت تسمه نقاله به یک سطح مطلوب از رطوبت خروجی از خشک‌کن رسید.

با پیشرفت در فناوری‌های رایانه‌ای، کنترل و سنجش فرآیند خشک کردن را می‌توان با نظارت بر خواص کیفی محصول (مانند محتوای رطوبتی، رنگ، شکل، طعم و مزه، بو)، کنترل شرایط خشک‌کن (مانند فشار، سرعت، دما، رطوبت در فرآیند خشک کردن) و ارائه اطلاعات عملیاتی در مورد عملکرد سیستم خشک‌کن به طور مناسب مدیریت و کنترل کرد. یکی از فناوری‌های کاربردی استفاده شده در خشک‌کن‌ها، بینایی ماشین است که یک روش غیرتماسی و غیرمخرب می‌باشد. از این فناوری برای اندازه‌گیری تغییرات چروکیدگی، رنگ، بافت و کنترل فرآیند خشک کردن استفاده شده است (Su et al., 2015). از طرف دیگر شبکه عصبی مصنوعی یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی فرآیندها می‌باشد. از دلایل محبوبیت بالای شبکه عصبی نسبت به سایر روش‌های متداول مدل‌سازی عبارت‌اند از: سهولت کار کردن با آن، توانایی زیاد شبکه عصبی در پیش‌بینی، امکان کاهش یا افزایش متغیرهای ورودی و خروجی، قابلیت استفاده برای پیش‌بینی بیش از دو متغیر در خروجی (Chen et al., 2020). با انتخاب بهترین مدلی که سینتیک خشک کردن را توصیف می‌کند می‌توان روند تغییرات خشک شدن محصول را طی فرآیند بررسی و خشک‌کن‌های صنعتی بهتری را متناسب با نوع محصول ارائه داد (Erbay & Icier, 2010).

پیشینه پژوهش

Doymaz et al., (2006) در سرعت ثابت ۱/۱ متر بر ثانیه و در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس در یک خشک‌کن جریان هوای گرم،

گیاه شوید و جعفری را با ضخامت $1/5 \pm 0/1$ سانتی متر خشک کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر رنگ بهینه در دمای 60°C درجه سلسیوس حاصل می‌شود. چهار مدل خشک کردن لایه نازک لئویس، هندرسون و پاییس، میدیلی و همکاران و پیچ را بر داده‌ها اعمال کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل میدیلی و کوک به خوبی می‌تواند نمودار خشک شدن شوید و جعفری را توصیف کند. در کنار مدل‌های ریاضی و تجربی، شبکه عصبی با توجه محبوبیت و توانایی آن در مدل‌سازی فرایندهای خشک کردن در ده‌های اخیر بطور گسترده در مدل‌سازی فرایندهای خشک کردن استفاده شده است (Chen et al., 2020; Rezaei et al., 2019; Omari et al., 2018). (Li & Chen (2020). کمک شبکه عصبی مصنوعی جهت مدل‌سازی فرآیند خشک کردن و کنترل میزان رطوبت خروجی در یک خشک‌کن تسمه نقاله‌ای از یک شبکه دینامیکی استفاده کردند. آن‌ها پارامترهای محتوای رطوبتی دانه‌های خروجی در هر لحظه، دمای دانه‌های ورودی، رطوبت و دمای هوای گرم و سرعت تخلیه را در لحظه t و همچنین محتوای رطوبتی در لحظه $t+1$ را به عنوان ورودی شبکه در نظر گرفتند و نهایتاً مقدار محتوای رطوبتی دانه‌های خشک شده را پیش‌بینی کردند. سپس جهت تایید قابلیت استفاده از این روش کنترلی از شبیه‌سازی MATLAB استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که شبکه عصبی جهت کنترل محتوای رطوبتی دانه‌ها دارای دقت مناسبی می‌باشد.

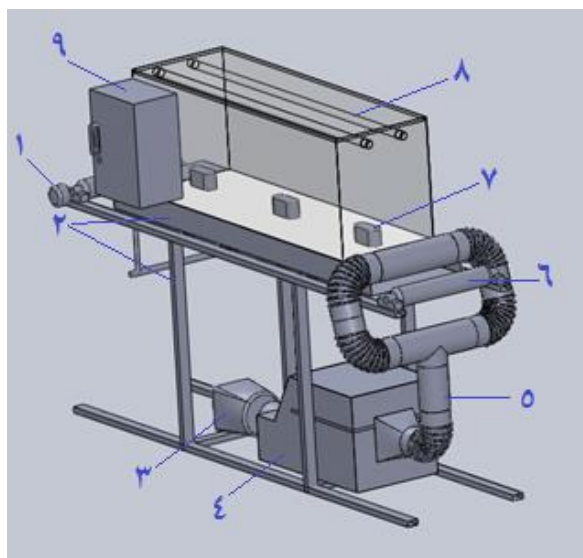
بینایی ماشین یک روش غیرمخرب، قوی و مقرون به صرفه از بابت هزینه می‌باشد که بطور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری رنگ، چروکیدگی و ویژگی بافتی تصویر در طول دهه اخیر برای پایش فرایندهای خشک کردن استفاده شده است (سزواری و همکاران، ۱۴۰۰؛ کسلی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Martynenko, 2016; Rezaei et al., 2019; Li et al., 2021; Zhu et al. (2023). از قابلیت بینایی ماشین برای پایش برخط فرایند خشک کردن در یک خشک‌کن میکروویو و پیش‌بینی محتوای رطوبتی استفاده کردند. (Chakravartula et al. (2023). از قابلیت بینایی ماشین برای پایش فرایند خشک کردن هویج در خشک‌کن جریان هوایی برای توسعه یک رابطه خطی بین محتوای رطوبتی و میزان چروکیدگی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بینایی ماشین قابلیت پیش‌بینی برخط محتوای رطوبتی در طی فرایند خشک کردن را فراهم می‌کند. نتایج پژوهش (Yadollahinia et al. (2009). نیز نشان داد که میزان چروکیدگی تا نسبت رطوبتی بالاتر از $0/1$ بشدت وابسته به محتوای رطوبتی محصول و مستقل از دمای خشک کردن می‌باشد. پژوهش (Rezaei et al. (2019). بیان کننده آن بود که به اندازه‌گیری چروکیدگی به کمک بینایی ماشین و توسعه مدل‌های ریاضی و شبکه عصبی مصنوعی بین چروکیدگی و محتوای رطوبتی محصول، امکان کنترل خشک‌کن میکروویو بر اساس محتوای رطوبتی محصول امکانپذیر است. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل شبکه عصبی با خطای $0/094$ نسبت به مدل خطی با خطای $0/123$ توانایی بالایی برای مدل‌سازی محتوای رطوبت محصول با چروکیدگی را دارد.

Suprpto & Riyanto (2020) فرایند خشک کردن انگور را در یک خشک‌کن تسمه نقاله‌ای مجهز به سیستم بینایی ماشین، در دو سطح دمایی 60°C و 70°C درجه سلسیوس مورد بررسی قرار دادند. از سیستم بینایی ماشین برای تصویربرداری از انگورها در حین خشک استفاده شد و از شبکه عصبی برای مدل‌سازی استفاده کردند. پارامترهایی که به عنوان ورودی شبکه عصبی در نظر گرفته شدند عبارت بودند از: مساحت سطح انگور، دما هوای گرم، سرعت حرکت تسمه و موقعیت موتور. نتایج نشان داد که می‌توان از بینایی ماشین برای اندازه‌گیری محتوای رطوبتی انگور و کنترل خشک‌کن استفاده کرد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری برخط جرم محصول خروجی برای تعیین مستقیم محتوای رطوبت در خشک‌کن‌های تسمه نقاله‌ای برای کنترل فرایند خشک کردن در این نوع خشک‌کن‌ها در مقیاس واقعی قابل پیاده‌سازی نیست (Zanoelo et al., 2008)، لذا کاربرد فناوری‌های نوین برای حل این مسئله چالش‌برانگیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به پیشینه پژوهش، بینایی ماشین از فناوری‌های نوین، ساده و غیرمخرب با قابلیت بالاست که می‌تواند در تعیین غیرمستقیم محتوای رطوبت محصول در طی فرایند خشک کردن بسیار موثر باشد. لذا در این پژوهش هدف توسعه سیستم بینایی ماشین برای خشک‌کن تسمه نقاله‌ای می‌باشد تا قابلیت این فناوری برای تعیین محتوای رطوبت خروجی از این نوع خشک‌کن به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش

ساختمان خشک‌کن

جهت انجام آزمایش‌ها یک خشک‌کن جریان هوای گرم تسمه نقاله‌ای مجهز به سیستم بینایی ماشین در آزمایشگاه فرآوری محصولات کشاورزی دانشگاه کردستان توسعه داده شد که اجزای آن در شکل ۱ قابل مشاهده است که عبارتند از: شاسی و محفظه خشک‌کن، بستر قرارگیری محصول (تسمه نقاله)، سامانه تأمین جریان هوا، سامانه تصویربرداری، سامانه‌های کنترلی و محفظه قرارگیری بورد کنترلی.



شکل ۱. طرح‌واره خشک‌کن تسمه نقاله‌ای: (۱) موتور گیربکس‌دار، (۲) شاسی و محفظه خشک‌کن، (۳) دمنده، (۴) محفظه قرارگیری هیترها، (۵) مسیر هدایت جریان هوا، (۶) غلتک، (۷) دوربین، (۸) لامپ، (۹) محفظه قرارگیری برد کنترلی

از یک شاسی جهت نگهداری و سوار کردن سایر اجزای خشک‌کن استفاده شد. محفظه اصلی خشک‌کن با ابعاد $9 \times 37/5 \times 145$ بر روی قسمت بالایی شاسی سوار شد. در قسمت پایین شاسی نیز بخش‌های تأمین‌کننده جریان هوا و گرما قرار گرفتند. جهت خشک شدن محصول از یک تسمه توری (جنس تفلون) به منظور قرارگیری محصول روی آن استفاده شد. این نوع تسمه نسبت به تسمه‌های فولادی دارای وزن کم‌تر و به لحاظ اقتصادی ارزان‌تر می‌باشند. علاوه بر این موارد، این نوع تسمه توانایی تحمل دماهای بالا (تا 350 درجه سلسیوس) را نیز دارد. جهت حرکت تسمه نیز از یک موتور محرک گیربکس‌دار کوچک (zheng-60ktyz-220VAC-50/60HZ-14W) با دور 5 rpm استفاده شد.

سامانه تأمین جریان هوا

جهت تأمین جریان هوای گرم از یک موتور تک فاز 3000 دور با توان $0/5$ اسب بخار (ساخت شرکت موتوژن) به عنوان دمنده، از 4 عدد المان الکتریکی U شکل با توان $1000W$ (با پره‌های تخت و مستطیلی شکل) به عنوان منبع حرارتی و از کانال‌هایی از جنس ورقه‌های گالوانیزه به قطر 10 سانتی‌متر به عنوان مسیر هدایت جریان هوا استفاده گردید. همچنین در این خشک‌کن از دو عدد رله حالت جامد (SSR, Fotek 50AA-Taiwan) با ولتاژ ورودی $32-3$ ولت DC و ولتاژ خروجی $380-24$ ولت AC و جریان 50 آمپر (به همراه هیتر سینک‌ها) جهت کنترل گرم‌کن‌ها و سرعت حرکت تسمه استفاده شد. برای قرائت دمای هوا از یک حسگر دمای NTC-Hanyoung/Korea استفاده شد و دمای قرائت شده توسط حسگر در هر لحظه و به صورت برخط به کمک برنامه‌ای که در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده با دمای مطلوب مقایسه می‌شد و با توجه به اختلاف دمای هوای گرم و دمای مطلوب با دستور روشن/خاموش کردن هیترها، دمای هوای گرم کنترل می‌شد. به منظور دریافت داده‌ها یک برد کنترلی آردوینو مدل MEGA 2560 مورد استفاده قرار گرفت.

سامانه تصویربرداری

سامانه بینایی ماشین شامل سه عدد وبکم (Logitech C920, FULL HD-1920*1080 pixels-30fps-Switzerland) در ورودی، خروجی و قسمت مرکزی خشک‌کن با فاصله 30 سانتی‌متر از یکدیگر نصب شدند. تصاویر گرفته شده توسط این وبکم‌ها از طریق کابل USB به رایانه منتقل و به کمک نرم‌افزار MATLAB 2018b دریافت می‌شدند. برای نصب دوربین‌ها، یک صفحه پلکسی دوجی در محفظه خشک‌کن و به فاصله 8 سانتی‌متری از سطح تسمه نصب گردید. محل قرار گرفتن لنز دوربین‌ها بر روی صفحه سوراخ‌کاری شد. استفاده از صفحه پلکسی روشن به منظور به حداقل رساندن سایه بر روی تصویر و حذف نویزهای اضافی بود. در این سامانه برای نورپردازی از دو عدد لامپ مهتابی تیوبی LED ($220V$)، توان $18W$ ، پایه G13، طول $1/20m$ ، ساخت شرکت پارس شهاب) استفاده شد. لامپ‌ها در ارتفاع $36/5$ سانتی‌متری از دوربین‌ها و به فاصله $2/5$ سانتی‌متری از یکدیگر نصب شدند تا نور منتشر شده دارای یکنواختی خوبی باشد. از یک کلید نیز برای روشن و خاموش کردن لامپ‌ها استفاده شد.

برنامه کنترلی خشک کن

جهت کنترل دما، سرعت حرکت تسمه نقاله و گرفتن تصاویر، از کدنویسی در محیط نرم افزار MATLAB 2018b استفاده شد. قبل از انجام هر آزمایش، متغیرهای ورودی از جمله حرکت خطی تسمه، دمای هوای گرم خشک کن و مسیر ذخیره سازی تصاویر گرفته شده تعیین می گردید. جهت کم کردن سرعت حرکت خطی تسمه از یک رله حالت جامد استفاده شد. این رله به برد آردوینو متصل بود و کنترل آن از طریق برنامه نوشته شده در نرم افزار MATLAB, 2018b انجام می شد. جهت محاسبه سرعت تسمه ابتدا بر اساس پیش آزمایش زمان لازم برای رسیدن به سطوح رطوبتی مختلف در هر دما هوای گرم مشخص می شد. حال با داشتن زمان و طول موثر تسمه نقاله بر اساس رابطه زیر سرعت تسمه نقاله برای هر دمای هوای گرم برای رسیدن به سطوح رطوبتی مختلف خروجی محاسبه می شد.

$$V = \frac{x}{t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه، V سرعت حرکت تسمه (cm/min)، x میزان مسافت طی شده (cm) که معادل طول موثر تسمه (۱۴۵ سانتی متر) است و t زمان (min) می باشد.

تهیه محصول و تعیین محتوای رطوبتی

محصول شوید به صورت روزانه و به اندازه نیاز از یک مزرعه در اطراف شهر سنندج خریداری می شد و در یخچال، در دمای 4 ± 1 درجه سلسیوس نگهداری می شد. پس از جداسازی ساقه های محصول، شب قبل از انجام آزمایش شوید را شسته و در یخچال (دمای ۴ درجه سلسیوس) نگهداری می شد. جهت رسیدن به دمای تعادلی، محصول به مدت دو ساعت قبل از انجام آزمایش ها از یخچال خارج می گردید. جهت تعیین محتوای رطوبت اولیه شوید از استاندارد AOAC (1980) استفاده شد.

از آنجایی که آزمایش ها در سرعت های مختلفی از حرکت خطی تسمه نقاله انجام می شد، رطوبت نهایی نمونه ها پس از پایان هر آزمایش متفاوت بود. پس از خارج شدن نمونه ها از خشک کن در قسمت پایانی تسمه، در هر آزمایش به صورت تصادفی ۵ نمونه به وزن ۳ گرم از محصول خشک شده داخل ظرف های مخصوص آن قرار گرفت و طبق استاندارد AOAC (1980) میزان رطوبت نهایی محصول خارج شده از سامانه خشک کن محاسبه گردید.

تیمار خشک کردن در خشک کن

آزمایش ها در دو سطح دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و در سه سطح سرعت که در جدول ۱ مشخص شده اند، انجام شدند. در هر آزمایش مقدار ورود محصول به خشک کن طوری تنظیم می شد که کل سطح طول موثر تسمه نقاله را بپوشاند و ضخامت لایه محصول ورودی به صورت لایه نازک بود. انتخاب سه سطح سرعت برای حالت های کم خشک کنی، خشک شدن مطلوب و بیش خشک کنی به روش سعی و خطا بود.

جدول ۱. سطوح سرعت و دمایی انجام آزمایش ها

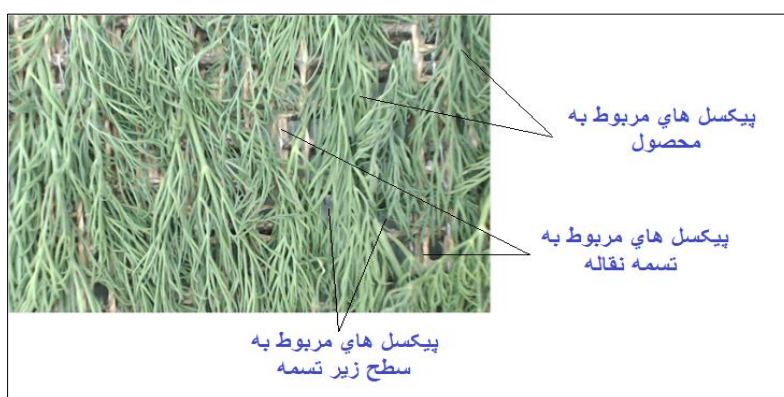
سرعت (سانتی متر بر دقیقه)			دما
(بیش خشک کنی)	(خشک شدن مطلوب)	(کم خشک کنی)	(درجه سلسیوس)
۰/۳۵	۰/۶	۱/۷	۵۰
۰/۶	۰/۹	۱/۷	۶۰

طراحی الگوریتم پردازش تصویر و استخراج ویژگی

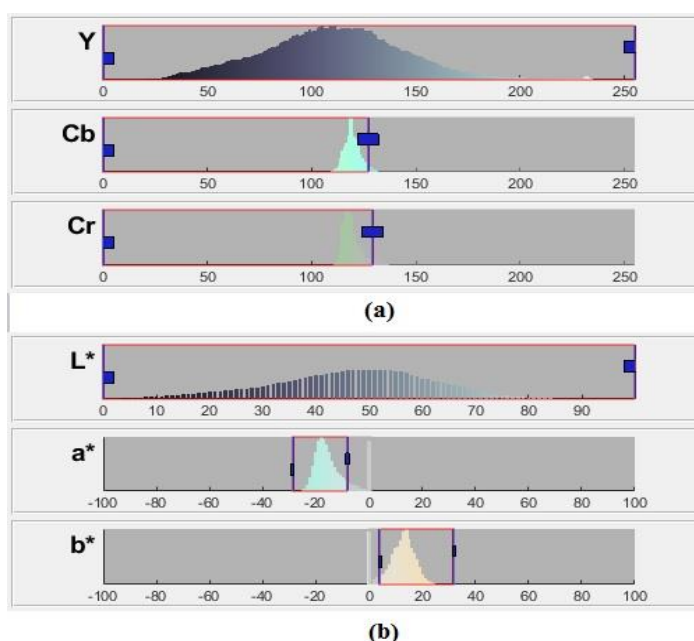
برای استخراج ویژگی ها از تصویر یک الگوریتم پردازش تصویر توسعه داده شد. اولین قدم برای توسعه الگوریتم مورد نظر، بخش بندی تصویر برای حذف پس زمینه از تصاویر که شامل پیکسل مربوط به تسمه و سطح زیر تسمه است، می باشد (شکل ۲).

جهت انتخاب بهترین فضای رنگی برای حذف پس زمینه از نمودار هیستوگرام کانال های فضاهای رنگی $YCbCr$ و $L^*a^*b^*$ (شکل ۳) استفاده شد. در این پژوهش فضای رنگی $YCbCr$ بهترین فضایی بود که به کمک آن می شد بخش هایی از پیکسل های مربوط به تسمه و سطح زیر تسمه را حذف کرد. بدین منظور پس از فراخوانی تصاویر RGB گرفته شده (شکل ۴-ا)، به کمک نرم افزار MATLAB، این تصاویر به تصاویری در فضای رنگی $YCbCr$ تبدیل شدند (شکل ۴-ب). سپس برای کانال C_b و C_r (شکل ۴-د و ۴-د) به کمک نمودار هیستوگرام آن ها (شکل ۳-ا)، به ترتیب مقدار آستانه ۱۲۷-۰ و ۱۲۸-۰ تعیین گردید. با تعیین این آستانه ها، پیکسل هایی که مقدار آن ها

بیشتر از حد بالای آستانه‌ها (۱۲۷ و ۱۲۸) و کمتر از حد پایین آن‌ها (۰) باشد، مقدار آن‌ها صفر شد (سیاه) و مابقی پیکسل‌های بین ۱۲۷-۰ و ۱۲۸-۰ مقدار یک به خود گرفتند (سفید) (شکل ۴-۱). تصویر اصلی به کمک این تصویر باینری (ماسک اول) بدست آمده، ماسک‌گذاری شد. در تصویر بدست آمده بخش زیادی از پیکسل‌های مربوط به تسمه و زیر تسمه که مقدار صفر داشتند، حذف گردیدند (شکل ۴-۲). حال جهت حذف برخی پیکسل‌های باقی‌مانده مربوط به تسمه و سطح زیر تسمه، تصویر بدست آمده از مرحله قبل به فضای رنگی $L^*a^*b^*$ انتقال داده شد (شکل ۴-۳). برای کانال a^* (شکل ۴-۴) نیز به کمک نمودار هیستوگرام آن (شکل ۳-۳)، مقدار آستانه $28/553$ تا $5/249$ - و برای کانال b^* (شکل ۴-۵) نیز مقدار آستانه $31/972$ تا $3/675$ در نظر گرفته شد. در این مرحله نیز مانند مرحله قبلی مقادیری که بیشتر از حد بالای بازه و کمتر از حد پایین بازه باشند تبدیل به صفر و مقادیری که در بازه مشخص شده قرار دارند به یک تبدیل شدند (ماسک دوم) (شکل ۴-۶). تصویر بدست آمده از مرحله فیلترگذاری اولیه، به کمک این فیلتر جدید ماسک‌گذاری شد (شکل ۴-۷). در این مرحله پیکسل‌های مربوط به سطح زیر تسمه حذف شدند اما تصویر نهایی همچنان شامل برخی نویزهای کوچک بود. بنابراین یک فیلتر رفع نویز بر آن اعمال گردید. برای اعمال این فیلتر استفاده از کد دستوری `bwareaopen` استفاده شد. جهت استفاده از این فیلتر لازم از مکمل تصویر استفاده شد (شکل ۴-۸). برای اعمال فیلتر حذف نویز `bwareaopen` بر روی تصویر مکمل از حد آستانه ۲۰ استفاده شد. ناحیه‌های که تعداد پیکسل‌های آن کمتر از ۲۰ بود حذف شدند (شکل ۴-۹). سپس مجدداً مکمل تصویر استخراج گردید (شکل ۴-۱۰). در نهایت تصویر RGB اولیه به کمک ماسک نهایی بدست آمده از مرحله قبل، ماسک‌گذاری گردید و تمامی پیکسل‌های مربوط به تسمه و سطح زیر تسمه حذف گردیدند. تصویر نهایی فقط شامل پیکسل‌های مربوط به نمونه‌ها (محصول) بود (شکل ۴-۱۱).



شکل ۲. تصویر گرفته شده به کمک دوربین (شامل نمونه و پس زمینه)



شکل ۳. هیستوگرام کانال‌های تصویر گرفته شده: (a) فضای رنگی Y, C_b, C_r ، (b) فضای رنگی $L^*a^*b^*$

این روند برای تمامی تصاویر گرفته شده به کمک سه دوربین انجام شد. اکنون با مشخص بودن تمامی پیکسل‌های مربوط به نمونه که از پس‌زمینه جدا شده است، برای محاسبه چروکیدگی سطحی محصول عبوری از زیر هر دوربین می‌توان از رابطه (۲) استفاده کرد.

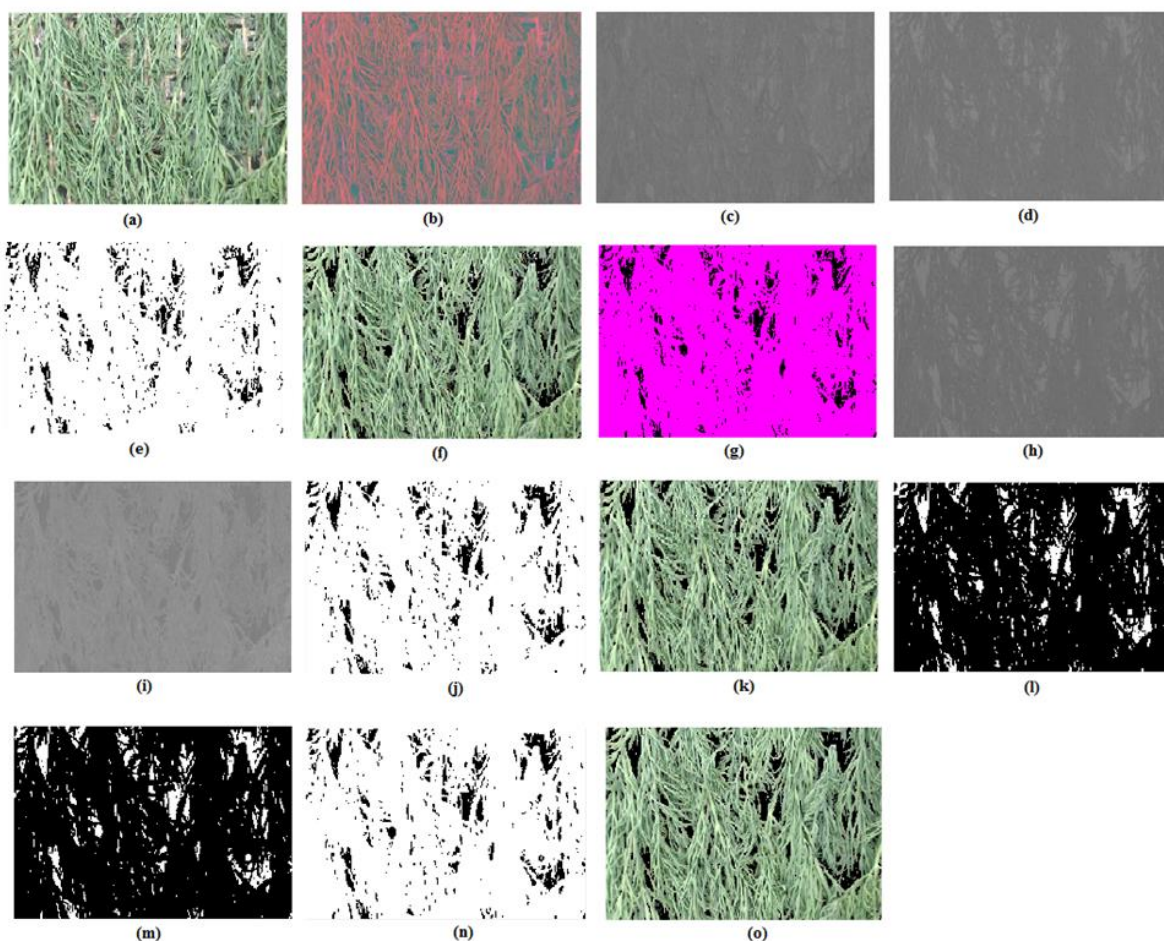
$$\text{Area shrinkage} = \frac{A_t}{A_0} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این رابطه A_t تعداد پیکسل‌های تصاویر گرفته شده توسط دوربین‌های دوم و سوم و A_0 تعداد پیکسل‌های تصویر گرفته شده توسط دوربین اول می‌باشد. همچنین علاوه بر چروکیدگی، اختلاف چروکیدگی بین دوربین‌ها هم به عنوان ویژگی از تصاویر به کمک روابط زیر استخراج گردید:

$$\Delta A_{12} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\Delta A_{23} = \frac{A_2 - A_3}{A_1} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\Delta A_{13} = \frac{A_1 - A_3}{A_1} \quad \text{رابطه (۵)}$$



شکل ۴. مراحل جداسازی پیکسل‌های نمونه از پس‌زمینه (a: تصویر RGB گرفته شده، b: فضای رنگی YCbCr، c: کانال Cb، d: کانال Cr، e) ماسک اول، f) تصویر ماسک‌گذاری شده به کمک ماسک اول، g) فضای رنگی L*a*b*، h) کانال a*، i) کانال b*، j) ماسک دوم، k) تصویر ماسک‌گذاری شده به کمک ماسک دوم، l) ماسک سوم، m) حذف پیکسل‌هایی با مقداری کمتر از ۲۰ (ماسک سوم)، n) اعمال مجدد ماسک کامل تصویر (ماسک سوم)، o) تصویر نهایی ماسک‌گذاری شده به کمک ماسک سوم

مدل‌سازی محتوای رطوبتی نمونه‌ها به کمک شبکه عصبی مصنوعی

برای مدل‌سازی محتوای رطوبتی خروجی از خشک‌کن از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. در این پژوهش، از روش سعی و خطا جهت یافتن بهترین ساختار شبکه به کمک نرم‌افزار MATLAB، 2018b استفاده شد (Omari et al., 2018). هر شبکه عصبی نیازمند آموزش، ارزیابی و آزمون می‌باشد که در این پژوهش ۷۰ درصد از داده‌ها جهت آموزش، ۱۵ درصد جهت ارزیابی و ۱۵ درصد دیگر نیز به آزمون شبکه اختصاص داده شد. تمامی این داده‌ها به صورت کاملاً تصادفی انتخاب شدند. در لایه‌های پنهان و لایه خروجی به ترتیب از تابع

آستانه Tansig و تابع purelin استفاده شد و جهت آموزش شبکه، از الگوریتم آموزشی لونیبرگ-مارکوارت استفاده شد. برای مدل سازی به کمک شبکه عصبی در این پژوهش، ΔA_{12} ، ΔA_{23} ، ΔA_{13} و محتوای رطوبت اولیه (MC_0) به عنوان ورودی و محتوای رطوبت خروجی از خشک کن (MC_f) به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شد (شکل ۵).



شکل ۵. مدل ارائه شده به کمک شبکه عصبی مصنوعی

در نهایت به منظور ارزیابی عملکرد شبکه عصبی از ضریب همبستگی (R) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر بدست آمده از آزمایش ها استفاده می شود. مدل با کمترین مقدار RMSE (نزدیک به صفر) و بیشترین مقدار R (نزدیک به یک) دارای عملکرد بهتری خواهد بود. این مقادیر به کمک روابط (۶) و (۷) محاسبه می شوند.

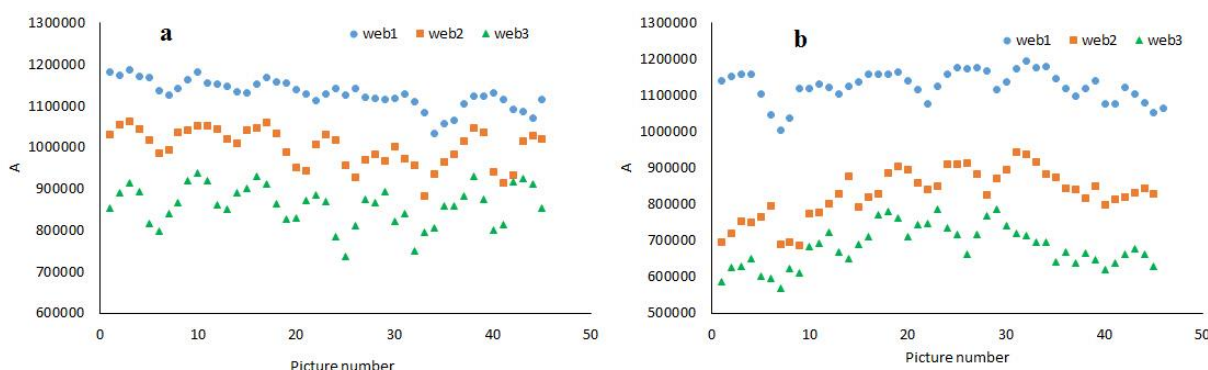
$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{pre.i}) \sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{exp.i})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{pre.i})^2][\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{exp.i})^2]}} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{exp})^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه ۷}$$

که در این روابط، $MR_{exp.i}$ مشخص کننده مقادیر نسبت رطوبت i ام بدست آمده از طریق آزمایشات، $MR_{pre.i}$ نشان دهنده مقدار نسبت رطوبت i ام پیش بینی شده به کمک مدل و N تعداد مشاهدات می باشد.

نتایج و بحث

شکل ۶ مقادیر پیکسل های مربوط به نمونه شوید (A) را در هر دوربین برای دمای ۶۰ درجه سلسیوس و به ترتیب برای بیشترین سرعت حرکت تسمه (۱/۷ سانتی متر بر دقیقه) و کمترین سرعت حرکت تسمه (۰/۶ سانتی متر بر دقیقه) در این تیمار را نشان می دهند.



شکل ۶. مجموع مقادیر پیکسل های مربوط به نمونه شوید در هر تصویر در دمای ۶۰ درجه سلسیوس: (a) بیشترین سرعت حرکت تسمه نقاله، (b) کمترین سرعت حرکت تسمه نقاله

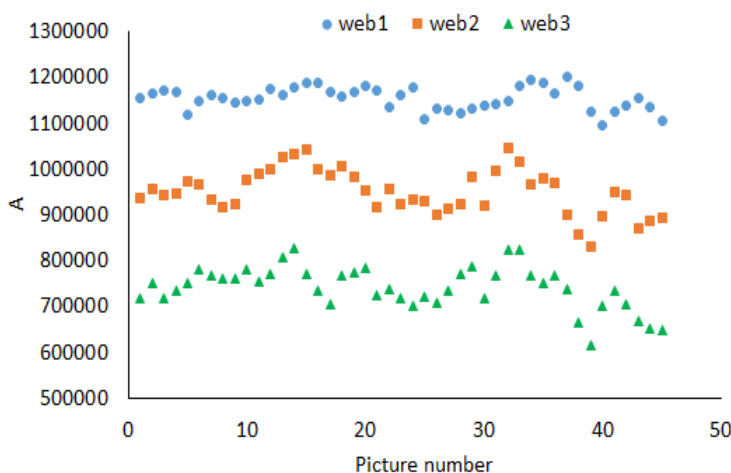
همان طور که مشاهده می شود، مجموع مقادیر پیکسل های مربوط به نمونه اولیه که وارد محفظه خشک کن گردیده و توسط دوربین اول عکس برداری شده است، تقریباً مقداری ثابت و حدود ۱,۱۵۰,۰۰۰ می باشد. همان طور که در نمودارها مشخص است، زمانی که تسمه با

سرعت بالا در حال حرکت است (شکل ۶-ا)، اختلاف بین دوربین یک و دو نسبت به زمانی که تسمه با حداقل سرعت در حال حرکت است (شکل ۶-ب)، کمتر می‌باشد. مقادیر اختلاف بین دوربین یک و دو به ترتیب برای بیشترین و کمترین سرعت حرکت تسمه، حدوداً ۱۵۰,۰۰۰ و ۳۰۰,۰۰۰ می‌باشد. یعنی هرچه سرعت تسمه بیشتر باشد، محصول مدت زمان کمتری برای از دست دادن رطوبت دارد، لذا تعداد پیکسل‌های مربوط به محصول خیلی کاهش نمی‌یابد. در شکل (۶-ا) اختلاف بین دوربین دو و سه، تقریباً با اختلاف بین دوربین یک و دو برابر است. ادامه این روند کاهش بدان معناست که محصول همچنان رطوبت اضافی برای از دست دادن داشته است.

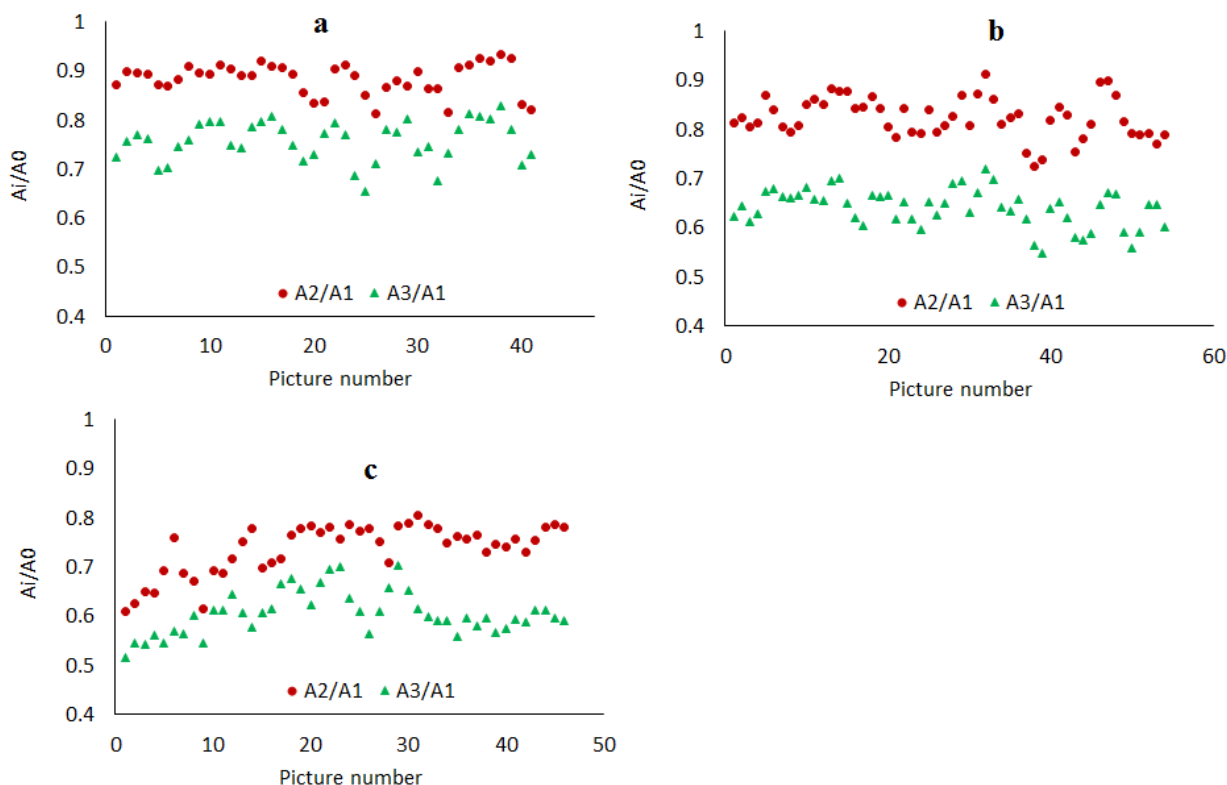
در شکل (۶-ب)، بیشترین اختلاف بین دوربین یک و دو می‌باشد (با مقدار تقریبی ۴۵۰,۰۰۰). این اختلاف به این معنی است که در این فاصله نمونه‌ها بیشترین محتوای رطوبتی خود را از دست داده‌اند و بیشترین میزان چروکیدگی سطحی را دارند. اما همانطور که مشخص است، اختلاف بین دوربین دو و سه نسبتاً ناچیز می‌باشد (با مقدار تقریبی ۱۰۰,۰۰۰). یعنی نمونه‌ها در این فاصله رطوبت بسیار کمی را از دست داده‌اند. به عبارتی دیگر، رطوبتی برای از دست دادن باقی نمانده است.

میانگین محتوای رطوبت نهایی نمونه‌های خارج شده از این آزمایش‌ها برای بیشترین و کمترین سرعت حرکت به ترتیب، ۴۰٪ پایه تر (۰/۶۶ بر پایه خشک) و ۳/۳۳٪ بر پایه تر (۰/۳۴۵ بر پایه خشک) محاسبه گردید. بنابراین کاملاً مشخص گردید که نمونه‌های خشک شده در دمای ۶۰ درجه سلسیوس با کمترین سرعت حرکت تسمه نقاله، دچار بیش خشک‌کنی و نمونه‌های خشک شده با بیشترین سرعت حرکت تسمه نقاله در همین دما دچار کم‌خشک‌کنی گردیده‌اند. لذا در شکل (۶-ا) چون محصول رطوبت کمتری از دست داده است، کمتر دچار چروکیدگی سطحی شده است که بیانگر کم‌خشک‌کنی محصول شویید می‌باشد. در چنین وضعیتی نمونه‌ها هنوز خشک نگردیده و دارای محتوای رطوبتی بالایی می‌باشند. بنابراین چنین محصولی را نمی‌توان خشک شده تلقی کرد و قابلیت نگهداری و انبارداری را ندارد و خیلی سریع دچار فساد خواهد شد. در شکل (۶-ب)، که محصول بیشترین مقدار چروکیدگی را دارد، می‌توان گفت که این نمونه دچار بیش‌خشک‌کنی گردیده‌اند. محصولی که در آن بیش خشک‌کنی اتفاق بیفتد، معمولاً کیفیت آن به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به این دو نمودار که دما در آن‌ها ثابت ولی سرعت حرکت تسمه متفاوت می‌باشد، می‌توان دریافت که سرعت حرکت تسمه بر میزان خشک شدن نمونه‌ها تاثیر دارد. هرچه سرعت حرکت تسمه کندتر باشد، نمونه‌ها رطوبت بیشتری از دست خواهند داد.

شکل (۷) مجموع مقادیر پیکسل‌های مربوط به نمونه شویید (A) را در هر سه دوربین در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت ۰/۹ سانتی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود اختلاف بین دوربین یک و دو با اختلاف بین دوربین دو و سه تقریباً یکسان است که نشان می‌دهد، در طول تمام فرآیند خشک شدن، نمونه‌های شویید رطوبت از دست داده‌اند. میانگین محتوای رطوبت نهایی نمونه‌های خارج شده از خشک‌کن در این آزمایش ۱۱/۱۱٪ بر پایه تر (۰/۱۲۸ بر پایه خشک) محاسبه گردید. از آنجایی که مقدار استاندارد محتوای رطوبتی برای محصولات کشاورزی خشک شده ۸-۱۲٪ بر پایه تر می‌باشد (Midilli et al., 2002)، لذا می‌توان برای این سری از آزمایش‌ها که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس انجام شدند، این میزان محتوای رطوبتی را به عنوان حالت بهینه خشک شدن شویید در نظر گرفت.



شکل ۷. مجموع مقادیر پیکسل‌های مربوط به نمونه شویید در هر تصویر در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت حرکت تسمه ۰/۹ سانتی‌متر بر دقیقه



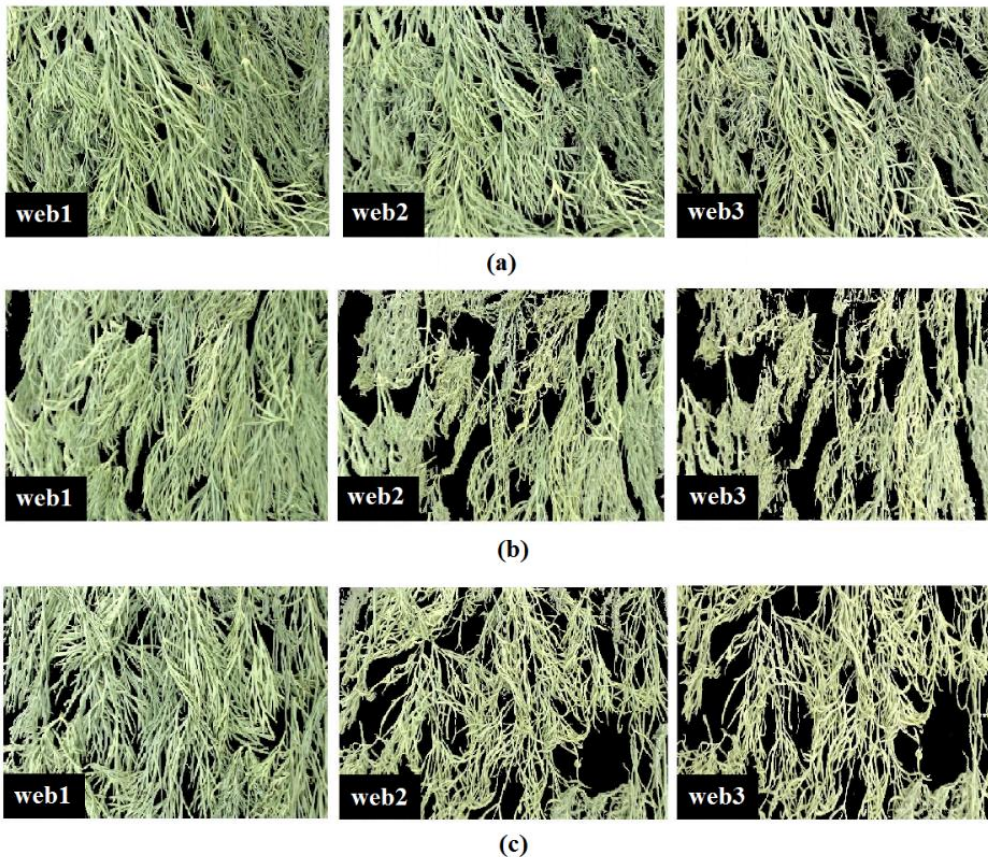
شکل ۸. چروکیدگی سطحی محصول زیر دوربین دوم و سوم در دمای ۶۰ درجه سلسیوس: (a) سرعت حرکت تسمه ۱/۷ سانتی متر بر دقیقه، (b) سرعت حرکت تسمه ۰/۹ سانتی متر بر دقیقه، (c) سرعت حرکت تسمه ۰/۶ سانتی متر بر دقیقه

شکل‌های (a-۸)، (b-۸) و (c-۸) میزان چروکیدگی سطحی بین دوربین اول و دوم و دوربین دوم و سوم را به ترتیب برای حالت کم خشک‌کنی، خشک شدن مطلوب و بیش خشک‌کنی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهند (A_i/A_1). با توجه به شکل‌های فوق، می‌توان مقدار چروکیدگی سطحی بین دوربین‌ها را مشاهده کرد. همانطور که در شکل (a-۸) مشخص است، زمانیکه محصول دچار کم خشک‌کنی گردیده است، مقدار چروکیدگی سطحی بین دوربین یک و دو حداقل مقدار است (حدود ۰/۹). در همین شکل میزان چروکیدگی سطحی بین دوربین دو و سه نیز تقریباً ۰/۷ است. اما در شکل (c-۸) که محصول دچار بیش خشک‌کنی شده است، مقدار چروکیدگی بین دوربین اول و دوم نسبت به حالت قبل بیشتر و حدود ۰/۷ می‌باشد ولی چروکیدگی بین دوربین دوم و سوم کمتر اتفاق افتاده است و میزان چروکیدگی افت کمتری داشته است (چروکیدگی نهایی حدود ۰/۶ است). چروکیدگی نهایی در این حالت، بیشترین مقدار را دارد. در شکل (b-۸) که مربوط به حالت خشک شدن مطلوب می‌باشد، می‌توان متوجه شد که میزان چروکیدگی بین دوربین اول و دوم با دوربین دوم و سوم تقریباً برابر می‌باشد. بنابراین نمونه‌ها به صورت یکنواخت‌تری در حین فرآیند خشک شدن رطوبت از دست داده و چروکیده شده‌اند. با توجه به شکل (۸)، می‌توان دریافت که مدت زمان قرارگیری محصول در برابر جریان هوای گرم بر میزان چروکیدگی محصول تاثیر بسزایی دارد. به گونه‌ای که هرچه این مدت زمان بیشتر شود محصول چروکیده‌تر می‌شود. اما این چروکیده شدن تا حدی که محصول رطوبت برای از دست دادن داشته باشد، اتفاق می‌افتد.

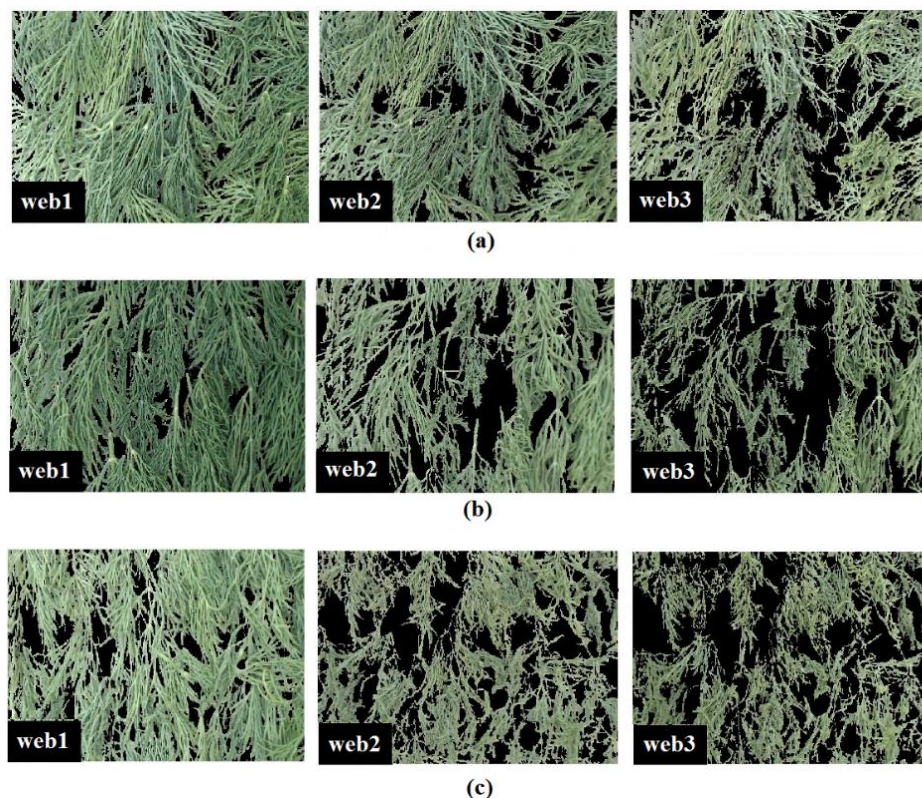
شکل (a-۹)، (b-۹) و (c-۹) تصاویر گرفته شده توسط دوربین اول، دوم و سوم را به ترتیب برای کم خشک‌کنی (سرعت حرکت تسمه ۱/۷ سانتی متر بر دقیقه)، خشک شدن مطلوب (سرعت حرکت تسمه ۰/۶ سانتی متر بر دقیقه) و بیش خشک‌کنی (سرعت حرکت تسمه ۰/۳۵ سانتی متر بر دقیقه) در دمای ۵۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. چروکیده شدن نمونه‌ها از روی عکس‌ها کاملاً مشخص می‌باشد. تصاویر گرفته شده به کمک دوربین اول تقریباً در همه تیمارهای آزمایشی شرایط یکسانی دارند، زیرا نمونه‌های اولیه که وارد خشک‌کن شده‌اند، نمونه‌های یکسانی بودند. در تصاویر گرفته شده توسط دوربین دوم و سوم تغییراتی در شکل ظاهری نمونه‌ها ایجاد شده است. این تغییرات به دلیل از دست رفتن رطوبت، در قالب چروکیده شدن نمونه‌ها قابل مشاهده می‌باشد. در شکل (a-۹)، چروکیده شدن در دوربین دوم و سوم قابل مشاهده است ولی همانطور که مشخص است، نمونه‌ها تغییرات بسیار زیادی ندارند و چروکیدگی جزئی می‌باشد،

زیرا نمونه‌ها مدت زمان کمتری در برابر جریان هوای گرم قرار گرفته و سریع از محفظه خشک‌کن خارج گردیده‌اند. در شکل (۹-b)، تعداد پیکسل‌های مربوط به نمونه در دوربین دوم و سوم باز کاهش یافته است. اما در مقایسه با شکل (۹-a)، مقدار چروکیدگی در دوربین دو و سه بیشتر می‌باشد. اختلاف بین تصویر دوربین اول با دوم قابل رویت است. این اختلاف باز بین دوربین دوم و سوم نیز قابل مشاهده است، لذا در تمام فرآیند خشک شدن، نمونه‌ها رطوبت از دست داده‌اند. در شکل (۹-c)، تعداد پیکسل‌های مربوط به نمونه در تصویر دوربین دوم بسیار کمتر از تصویر گرفته شده توسط دوربین اول می‌باشد که به معنای چروکیدگی بسیار زیاد نمونه‌ها می‌باشد. هرچه چروکیدگی بیشتر باشد، محصول رطوبت بیشتری از دست داده است. در همین شکل اگر به تصویر گرفته شده توسط دوربین سوم دقت شود، می‌توان دریافت که میزان اختلاف بین تصویر گرفته شده با دوربین دوم و سوم بسیار ناچیز می‌باشد. بنابراین، این موضوع به خوبی قابل درک است که، در دوربین سوم چروکیدگی زیادی رخ نداده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که، محصول رطوبت زیادی برای ازدست دادن نداشته است و تمام رطوبت خود را قبلاً (در دوربین دوم) از دست داده است. چنانچه رطوبتی در محصول باقی نماند، محصول دیگر چروکیده نخواهد شد. بنابراین با توجه به شکل‌ها، می‌توان بر این مهم تاکید کرد که، مدت زمان قرارگیری در برابر جریان هوای گرم با مقدار چروکیدگی رابطه مستقیم دارد. یعنی، هرچه محصول زمان بیشتری در برابر جریان هوای گرم قرار گیرد، بیشتر چروکیده می‌شود.

شکل‌های (۱۰-a)، (۱۰-b) و (۱۰-c) نیز تصاویر گرفته شده توسط دوربین‌های اول، دوم و سوم را به ترتیب برای کم خشک‌کنی (سرعت حرکت تسمه ۱/۷ سانتی‌متر بر دقیقه)، خشک شدن مطلوب (سرعت حرکت تسمه ۰/۹ سانتی‌متر بر دقیقه) و بیش خشک‌کنی (سرعت حرکت تسمه ۰/۵۹۶ سانتی‌متر بر دقیقه) در دمای ۶۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهند. در دمای ۶۰ درجه سلسیوس نیز، نتایج مشابهی با دمای ۵۰ درجه سلسیوس قابل مشاهده است. در شکل (۱۰-a)، پیکسل‌های مربوط به نمونه در دوربین دوم و سوم کاهش یافته است. اما این روند کاهشی شدید نمی‌باشد و چروکیدگی کمی اتفاق افتاده است. در شکل (۱۰-b)، چروکیدگی در هر دو دوربین دوم و سوم محسوس‌تر می‌باشد. در شکل (۱۰-c) نیز چروکیدگی در دوربین دوم بسیار زیاد می‌باشد. اما در همین شکل در دوربین سوم تغییرات زیادی نسبت به دوربین دوم رخ نداده است.



شکل ۹. تغییرات چروکیدگی طی فرآیند خشک کردن در دمای ۵۰ درجه سلسیوس: (a) کم خشک‌کنی، (b) خشک شدن مطلوب، (c) بیش خشک‌کنی



شکل ۱۰. تغییرات چروکیدگی طی فرآیند خشک کردن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس: (a) کم خشک کنی، (b) خشک شدن مطلوب، (c) بیش خشک کنی

با مقایسه تصاویر شکل‌های (۹) و (۱۰) می‌توان متوجه شد که، شدت تغییرات ظاهری و چروکیدگی در تصاویر گرفته شده در دمای ۶۰ درجه سلسیوس بیشتر از تغییرات در تصاویر گرفته شده در دمای ۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که، افزایش دما بر میزان شدت چروکیدگی تاثیر دارد. هرچه دما بیشتر باشد، نمونه‌ها سریع‌تر رطوبت از دست داده و سریع‌تر چروکیده می‌شوند. این نتیجه بدست آمده با نتایج سایر پژوهش‌های انجام شده همخوانی دارد (Esturk & Soysal., 2010; Seyedabadi *et al.*, 2019). طبق نتایج حاصل در این پژوهش‌ها، دمای هوا تاثیر معنی‌داری بر خشک کردن دارد و چروکیدگی تابعی از دما و مدت زمان قرارگیری در برابر جریان هوای گرم می‌باشد.

تمام روندهای فوق، برای تمامی آزمایش‌های انجام شده در دو دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس انجام شد. نتایج حاصل از محاسبه میانگین محتوای رطوبت نمونه‌های ورودی به خشک کن ($MC_{0,i}$) و نمونه‌های خروجی از خشک کن در هر دما ($MC_{f,i}$) برای سه سطح سرعت، در جدول ۲ مشخص گردیده است. با توجه به جدول، مطلوب‌ترین سرعت برای خشک کردن نمونه‌های شوید به کمک خشک کن تسمه نقاله‌ای برای دو دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب، ۰/۶ و ۰/۹ سانتی‌متر بر دقیقه محاسبه شد. در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سرعت ۱/۷ متر بر دقیقه، نمونه‌ها دچار کم خشک کنی شدند. یعنی محصول خروجی از خشک کن حاوی میزان زیادی رطوبت بود. برای همین دما و سرعت ۰/۳۵ سانتی‌متر بر دقیقه، نمونه دچار بیش خشک کنی گردید.

جدول ۲. میانگین محتوای رطوبت نمونه‌های ورودی به خشک کن ($MC_{0,i}$) و نمونه‌های خروجی از خشک کن در هر تیمار آزمایش ($MC_{f,i}$)

میانگین محتوای رطوبت ثانویه (MC_f)		میانگین محتوای رطوبت اولیه (MC_0)		سرعت (cm/min)	دما (°C)
بر پایه تر (%)	بر پایه خشک (%)	بر پایه تر (%)	بر پایه خشک (%)		
۱/۲۵۶	۵۵/۶۷	۷/۱۱	۸۷/۶۶	۱/۷	۵۰
۰/۱۴۵	۱۲/۳۳	۶/۷۷	۸۷/۱۳	۰/۶	
۰/۰۴۵	۴/۳۳	۷/۹۸	۸۸/۸۶	۰/۳۵	
۰/۰۶۶	۴۰	۶/۲۵	۸۶/۲	۱/۷	۶۰
۰/۱۲۸	۱۱/۱۱	۵/۴۴	۸۴/۴۴	۰/۹	
۰/۰۳۴	۳/۳۳	۸/۰۹	۸۹	۰/۶	

جدول ۳ نتایج آموزش مدل، جهت پیش‌بینی محتوای رطوبتی را نشان می‌دهد. ورودی‌های این شبکه عبارت بودند از: چروکیدگی سطحی بین دوربین اول و دوم، چروکیدگی سطحی بین دوربین دوم و سوم، چروکیدگی سطحی بین دوربین اول و سوم و محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها. با بررسی نتایج حاصل از این مدل‌سازی، شبکه با ساختار ۱-۱۲-۴ بهترین مدل با RMSE، $1.0657e-06$ ، $1.2494e-06$ و $9.4657e-07$ ، R ، 0.99999 ، 0.99999 و 0.99998 به ترتیب برای آموزش، ارزیابی و تست بدست آمد. با توجه به نتایج بدست آمده برای مدل‌سازی، مشخص گردید که استفاده از شبکه عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی و مدل‌سازی محتوای رطوبتی شوید مناسب و دارای دقت بالایی می‌باشد. نتیجه بدست آمده از این پژوهش با نتایج حاصل از سایر پژوهش‌هایی که انجام شده است (Chasiotis et al., 2021; Kaveh et al., 2018; Li & Chen., 2020; Motevali et al., 2013)، همخوانی دارد. بر اساس نتایج حاصل می‌توان ادعا کرد که شبکه‌های عصبی یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی خشک کردن برگ‌های شوید و پیش‌بینی محتوای رطوبتی آن در شرایط مختلف است که دارای دقت بالا و هزینه و زمان کم است. بنابراین می‌توان از آن برای کنترل یا بهینه‌سازی خشک‌کن‌ها استفاده نمود.

جدول ۴. نتایج ساختارهای آموزش داده شده برای مدل اول

ساختار مختلف	RMSE		R	
	آموزش	ارزیابی	آموزش	ارزیابی
۴-۲-۱	۰/۱۰۰۲	۰/۱۲۸۱	۰/۹۷۳۸	۰/۹۵۷۲
۴-۴-۱	۰/۰۷۴۶	۰/۰۸۲۰	۰/۹۸۸۱	۰/۹۸۷۹
۴-۶-۱	۰/۰۶۳۴	۰/۱۰۵۷	۰/۹۹۱۶	۰/۹۷۱۴
۴-۸-۱	۰/۰۲۰۷	۰/۰۲۲۸	۰/۹۹۸۹	۰/۹۹۸۶
۴-۱۰-۱	۱/۰۱e-۰۵	۳/۶۷e-۰۵	۲/۰۱e-۰۵	۰/۹۹۹۹
۴-۱۲-۱	۱/۰۶e-۰۶	۱/۲۴e-۰۶	۹/۴۶e-۰۷	۰/۹۹۹۹
۴-۱۴-۱	۱/۳۲e-۰۵	۷/۰۸e-۰۵	۲/۱۰e-۰۵	۰/۹۹۹۹
۴-۱۶-۱	۳/۱۸e-۰۵	۱/۴۷e-۰۵	۷/۹۰e-۰۵	۰/۹۹۹۹

نتیجه‌گیری

نتایج کلی برداشت شده از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

سرعت حرکت تسمه بر میزان محتوای رطوبت نهایی تاثیرگذار است بطوریکه با دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سرعت‌های ۰/۳۵ و ۱/۷ متر بر ثانیه، محتوای رطوبت خروجی بر پایه خشک بترتیب به ۰/۰۴۵ و ۱/۲۵۶ رسید. لذا هرچه سرعت تسمه زیاد باشد، مدت زمان قرارگیری محصول در مقابل جریان هوای گرم کمتر می‌شود و محصول نهایی کمتر دچار چروکیدگی می‌گردد.

در دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب، میزان محتوای رطوبت نهایی محصول شوید جهت خشک شدن مطلوب در سرعت‌های ۰/۶ و ۰/۹ سانتی‌متر بر دقیقه، به ترتیب، ۰/۱۴۵ و ۰/۱۲۸ بر پایه خشک بدست آمد.

هرچه مقدار رطوبت از دست داده بیشتر باشد، میزان چروکیدگی سطحی محصول افزایش خواهد یافت. بنابراین در دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب، بیشترین مقدار چروکیدگی سطحی در سرعت‌های ۰/۳۵ و ۰/۶ سانتی‌متر بر دقیقه محاسبه شد.

با سرعت تسمه نقاله ۰/۶ متر بر ثانیه، محتوای رطوبت محصول خروجی از خشک‌کن بر پایه خشک با دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۱۴۵ و ۰/۰۳۵ رسید که نشان دهنده آن است که هرچه دمای هوای گرم بیشتر باشد، رطوبت سریعتر از محصول خارج می‌شود.

مدل شبکه عصبی با ساختار ۱-۱۲-۴، که ورودی‌های آن شامل چروکیدگی بین دوربین اول و دوم، دوربین دوم و سوم و دوربین اول و سوم و محتوای رطوبت اولیه قادر بود بهترین پیش‌بینی را با RMSE، $1.0657e-06$ ، $1.2494e-06$ و $9.4657e-07$ ، R ، 0.99999 ، 0.99999 و 0.99998 به ترتیب برای آموزش، ارزیابی و تست ارائه دهد.

منابع

سبزواری، معصومه؛ بهروزی خزائی، ناصر و درویشی، حسین. (۱۴۰۰). توسعه خشک‌کن مایکروویو- جریان هوای گرم با سامانه کنترل چگالی توان

برای مدل سازی سینتیک خشک شدن برگه موز. مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۵۲(۴)، ۵۸۴-۵۶۷.
 هدایت، میلاد؛ مرتضی پور، حمید؛ مقصودی، حسین و شمسی، محسن. (۱۳۹۴). بررسی عملکرد خشک کن خورشیدی مجهز به سامانه بازیافت حرارتی برای خشک کردن نعناع. مهندسی بیوسیستم/ایران، دوره ۴۶(۴)، ۳۸۸-۳۷۹.
 کسعلی، صدیقه؛ مینایی، سعید و عیاری، مهدی. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر فرآیند خشک کردن بر ویژگیهای رنگی گلبرگ زعفران با استفاده از ماشین بینایی. زراعت و فناوری زعفران، ۷، (۱)، ۹۱-۸۱.

References

- Adak, N., Heybeli, N., & Ertekin, C. (2017). Infrared drying of strawberry. *Food Chemistry*, 219, 109-116.
- Callan, N. W., Johnson, D. L., Westcott, M. P., & Welty, L. E. (2007). Herb and oil composition of dill (*Anethum graveolens L.*): Effects of crop maturity and plant density. *Industrial Crops Products*, 25(3), 282-287.
- Chen, J., Zhang, M., Xu, B., Sun, J., & Mujumdar, A. S. (2020). Artificial intelligence assisted technologies for controlling the drying of fruits and vegetables using physical fields: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 251-260. Doi:10.1016/j.tifs.2020.08.015
- Canter, P. H., Thomas, H., & Ernst, E. (2005). Bringing medicinal plants into cultivation: opportunities and challenges for biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 23(4), 180-185.
- Chasiotis, V., Tzempelikos, D., Mitrakos, D., & Filios, A. (2021). Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer for *Lavandula x allardii* leaves during non-isothermal convective drying. *Food Engineering*, 311, 110708.
- Chakravartula, S.S., Bandiera, A., Nardella, M., Bedini, G., Ibba, P., Massantini, R., & Moschetti, R. (2023). Computer vision-based smart monitoring and control system for food drying: A study on carrot slices. *Computers and Electronics in Agriculture*, 206, 107654.
- Doymaz, I., Tugrul, N., & Pala, M. (2006). Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Food Engineering*, 77(3), 559-565.
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464.
- Esturk, O., & Soysal, Y. (2010). Drying properties and quality parameters of dill dried with intermittent and continuous microwave-convection air treatments. *Journal of Agricultural Sciences*, 16, 26-36.
- Hedayat, M., Morteza pour, H., Maghsoudi, H., Shamsi, M. (2016). Performance investigation of a heat recovery assisted solar dryer for mint drying. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 46(4), 379-388, (In Persian).
- Kaveh, M., Amiri Chayjan, R., & Khezri, B. (2018). Modeling drying properties of pistachio nuts, squash and cantaloupe seeds under fixed and fluidized bed using data-driven models and artificial neural networks. *Journal of Food Engineering*, doi: 10.1515/ijfe-2017-0248.
- Kasali, S., Minaei, S., & ayyari, M. (2019). Effect of the drying process on saffron petals color features using machine vision. *Saffron Agronomy & Technolog*, 7(1), 81-91, (In Persian).
- Li, H. & Chen, S. (2020). A neural network based model predictive control scheme for grain dryers. *Drying technology*, 38(8), 1079-1091.
- Li, X., Liu, Y., Gao, Z., Xie, Y., & Wang, H. (2021). Computer vision online measurement of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) surface wrinkling and shrinkage during hot air drying with humidity control. *Journal of Food Engineering*, 292, 110253. doi:10.1016/j.jfoodeng.2020.110253
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z.A. (2002). New model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503.
- Mizukami, Y., Sawai, Y., & Yamaguchi, Y. (2006). Moisture content measurement of tea leaves by electrical impedance and capacitance. *Biosystems Engineering*, 93(3), 293-299.
- Motevali, A., Younji, S., Amiri Chayjan, R., Aghilinategh, N., & Banakar, A. (2013). Drying kinetics of dill leaves in a convective dryer. *International Agrophysics*, 27, 39-47.
- Martynenko, A. (2016). Improvement of kiwifruit drying using computer vision system (CVS) and ALM clustering method. *Drying Technology*, 35, 709-723. doi:10.1080/07373937.2016.1208665.
- Omari, A., Behroozi, N., & Farooq, S. (2018). Drying kinetic and artificial neural network modeling of mushroom drying process in microwave-hot air dryer. *Food Process Engineering*, 41(7), e12849. doi: 10.1111/jfpe.12849.
- Rywotycki, R. (2003). Electric sensor for prompt measurement of moisture content in solid food products. *Food Process Engineering*, 25(6): 473-483.
- Rezaei, S., Behroozi-Khazaei, N., & Darvishi, H. (2019). Microwave power adjusting during potato slice



- drying process using machine vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 160, 40–50. doi:10.1016/J.COMPAG.2019.03.013
- Seyedabadi, E., Khojastehpour, M., & Abbaspour-fard, M. H. (2019). Online measuring of quality changes of banana slabs during convective drying. *Engineering in Agriculture, Environment and food*, 12, 111-117.
- Su, Y., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2015). Recent development of smart drying technology. *Journal of Drying Technology*, 33(3), 260-276.
- Suprpto, S., & Riyanto, E. (2020). Grape drying process using machine vision based on multilayer perceptron networks. *Indonesian Journal of Science & Technology*, 5(3), 382-394.
- Sabzevari, M., Behroozi-Khazaei, N., & Darvishi, H. (2021). Developing the Microwave- Hot Air Dryer with Power Density Control System Using Kinetic Modeling of Banana Slice. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 52(4), 567-584, (In Persian).
- Wannapakhe, S., Chaiwong, T., Dandee, M., & Prompakdee, S. (2012). Hot air dryer with closed-loop oscillating heat pipe with check valves for reducing energy in drying process. *Procedia Engineering*, 32: 77-82.
- Wankhade, P. K., Sapkal, R. S., & Sapkal, V. S. (2013). Drying characteristics of okra slices on drying in hot air dryer. *Procedia Engineering*, 51, 371-374.
- Yadollahinia, A., Latifi, A., & Mahdavi, R. (2009). New methods for determination of potato slice shrinkage during drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65 (2), 268–274.
- Zhu, G., Raghavan, G.S.V., Xu, W., Pei, Y., & Li, Z. (2023). Online Machine Vision-Based Modeling during Cantaloupe Microwave Drying Utilizing Extreme Learning Machine and Artificial Neural Network. *Foods*, 12, 1372. doi:10.3390/foods12071372
- Zanoelo, E.F., Abitante, A., & Meleiro, L.A.C. (2008). Dynamic modeling and feedback control for conveyors-belt dryers of mate leaves. *Journal of Food Engineering*, 84, 458–468.

Prediction of output moisture content of dill from hot-air conveyor belt dryer using machine vision

Extended Abstract

Introduction

Due to the fact that high moisture content of agricultural products such as dill promotes the growth and activity of microorganisms. Therefore, they are typically dried before being introduced to the market to prevent biochemical reactions. Due to the disadvantages of traditional methods of the drying agricultural products, Hot-air conveyor belt dryers as industrial dryers are commonly used to dry of the agricultural products due to their simplicity of operation, easy access and cost-effective. But the systems or sensors that are used to correctly determine or measure the final moisture level from the output of this dryer have low accuracy or are not common due to their other disadvantages (Mizukami et al., 2006; Rywotycki, 2003). Today, machine vision and artificial neural network demonstrated their ability for online monitoring of drying processes and process modeling respectively. The application of these technologies to control the drying process are being widely developed (Li & Chen, 2020; Rezaei et al., 2019; Su et al., 2015). Suprpto & Riyanto (2020) studied the process of drying grapes in a conveyor belt dryer equipped with a machine vision system. Machine vision system was used to image the grapes during drying and neural network was used for modeling. Our research aimed to investigate the feasibility and application of machine vision in conveyor belt dryers for measuring moisture content and controlling the drying process. We found that there was a lack of studies focusing on this specific area.

Materials and Methods

Dill used in the experiments. The initial and final moisture content of products exit from the dryer was determined by AOAC (1980) method. In this study, a conveyor belt hot air dryer equipped with a machine vision system was developed (Fig. 1). This dryer consists of machine vision, conveyer belt, heater, SSR rely, temperature and belts speed control program. The machine vision system including three webcams (Logitech C920, FULL HD-1920*1080 pixels-30fps-Switzerland) were installed in the entrance, exit and middle part of the dryer (with equal distances from each other). The images taken by these webcams were transferred to the computer through a USB cable and received with the help of MATLAB 2018b software. Two LED tube lamps (230 v, power 18W, G13 base, length 1.20 m, manufactured by Pars Shahab Company, Iran) were used for lighting. The experiments was done with two levels of air temperature (50 and 60 C) and three levels of belt speed for each air temperature (Table 1).

An image processing algorithm was developed to extract features from the image. The first step to develop the desired algorithm is image segmentation to remove the background from the images (Fig. 2). After segmenting the images, shrinkage as a feature was extract following equation:

$$\text{AreaShrinkage} = A_t / A_0 \quad (1)$$

Where A_t the number of pixel of object with camera in the middle and exit of dryer and A_0 is the number of pixel with camera in the entrance of the dryer. Also the shrinkage difference between cameras extracted with flowing equations:

$$\Delta A_{12} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \quad (2)$$

$$\Delta A_{23} = \frac{A_2 - A_3}{A_1} \quad (3)$$

$$\Delta A_{13} = \frac{A_1 - A_3}{A_1} \quad (4)$$

For modeling using the neural network in this study, ΔA_{12} , ΔA_{23} , ΔA_{13} , and the initial moisture content (MC_0) were considered as inputs, while the moisture content output from the dryer (MC_f) was considered as the model's output.

Results and Discussions

The Fig. (9-a), (9-b), and (9-c) show images captured by the first, second, and third cameras, respectively, for under-drying conditions (conveyor speed of 1.7 cm/min), desired drying conditions (conveyor speed of 0.6 cm/min), and over-drying conditions (conveyor speed of 0.35 cm/min) at a temperature of 50 °C. The surface shrinkage of the samples is clearly visible from the images. The images captured by the first camera have similar conditions in almost all experimental treatments because the initial samples entering the dryer were identical. However, variations in the appearance of the samples are observed in the images captured by the second and third cameras. These variations are due to the loss of moisture, which is manifested in the form of



shrinkage of the samples.

Table 3 presents the results of training the model for predicting moisture content. By examining the results obtained from this modeling, the network with a structure of 4-12-1 was found to be the best model with RMSE values of 0.0657, 0.2494, and 0.4657, and R values of 0.9999, 0.9999, and 0.9998 for training, evaluation, and testing, respectively.