

بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن لایه نازک موز به روش سطح پاسخ

فاطمه کریمی^۱، جلال دهقان نیا^{۲*} و بابک قنبرزاده^۲

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۱/۶/۳۱

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

^۲ به ترتیب استادیار و دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبه: Email: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

چکیده

خشک‌کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است ولی به علت امکان بروز برخی تغییرات نامطلوب در ماده غذایی خشک‌شده، کنترل این فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از تکنیک‌هایی است که جهت کنترل و بهینه‌سازی فرآیندهایی به کار می‌رود که در آن‌ها سطح مورد نظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار می‌گیرد؛ لذا این روش می‌تواند یکی از راه‌های مناسب برای کنترل زمان و شرایط مختلف خشک‌کردن باشد. در این پژوهش، فرآیند خشک‌کردن لایه نازک موز در چهار دمای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد، سه سرعت هوای ورودی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه و سه ضخامت ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بیشترین مطلوبیت به مقدار ۰/۹۱ به منظور کمینه‌کردن محتوای رطوبت و بیشینه‌کردن نرخ خشک‌شدن، در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه، زمان ۱۰۰ دقیقه و ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی فرآیند، خشک‌کردن لایه نازک، روش سطح پاسخ، موز

مقدمه

خشک‌کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است ولی به علت امکان بروز برخی تغییرات نامطلوب در ماده غذایی خشک‌شده مانند تغییرات رنگ، طعم، عطر، کاهش مواد مغذی، افزایش وزن مخصوص (به علت چروکیدگی شدید) و کاهش ظرفیت آبیگری مجدد، کنترل و انجام صحیح عملیات این فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (فنگ و تانگ ۱۹۹۸). پژوهش‌های مختلفی در ارتباط با پارامترهای مؤثر روی زمان مورد نیاز برای خشک‌کردن میوه‌های مختلف مانند ضخامت محصول و سرعت و دمای هوا، با هدف افزایش کیفیت محصول خشک‌شده نهایی از جمله موز صورت گرفته است (کریم و هاوالادر ۲۰۰۵، پراچایاواراکورن و همکاران ۲۰۰۸، توپانی چایانان و همکاران ۲۰۰۸، دویماز ۲۰۱۰، فرناندو و همکاران ۲۰۱۱). به عنوان مثال، کریم و هاوالادر (۲۰۰۵) در پژوهشی نشان دادند که اگرچه سرعت هوا بر زمان خشک‌شدن تأثیر معنی‌داری دارد، اما تأثیر دمای هوا در مقایسه با سرعت هوا به مراتب بیشتر است. در این پژوهش، با افزایش دمای خشک‌کن از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن ورقه‌های موز حدود ۴۴ درصد کاهش نشان داد. در پژوهشی دیگر نیز که بر روی فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های موز انجام شده است، نتایج مشابهی به دست آمد (دویماز ۲۰۱۰). در این پژوهش، با افزایش دما از ۵۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد، زمان خشک‌شدن ورقه‌های موز با ضخامت ۵ میلی‌متر از ۵۰۰ به ۱۸۰ دقیقه کاهش یافت. علت این امر نیز به تأثیر کاهش رطوبت نسبی هوای خشک‌کن در دماهای بالاتر و در نتیجه افزایش پتانسیل خشک‌کردن هوای خشک‌کن نسبت داده شد. در مطالعه‌ای دیگر روی تأثیر ضخامت موز بر فرآیند خشک‌شدن، افزایش ضخامت، عامل مهمی بر افزایش زمان خشک‌شدن معرفی شد (فرناندو و

همکاران ۲۰۱۱). در این مطالعه، زمان خشک‌شدن ورقه‌های موز در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه و ضخامت‌های ۰/۵ تا ۱/۵ سانتی‌متر از ۳۰۰ تا ۶۰۰ دقیقه گزارش شد.

از طرف دیگر، بالابردن قابلیت اجرایی و بازده سیستم‌ها در فرآیند خشک‌کردن بدون افزایش هزینه‌ها مقوله‌ای بسیار حائز اهمیت است. روش اجرایی که بدین منظور استفاده می‌گردد، بهینه‌سازی نامیده می‌شود و این عمل، یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی و تحلیل سیستم‌ها است. روش سطح پاسخ^۱ (RSM)، مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که جهت توسعه، پیشبرد و بهینه‌کردن فرآیندهایی به کار می‌رود که در آن‌ها سطح مورد نظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار داشته و هدف، بهینه‌کردن پاسخ مزبور است. روش سطح پاسخ کاربرد قابل توجهی در طرح‌ریزی، توسعه، فرموله‌کردن محصولات جدید غذایی و همچنین ارتقای طراحی محصولات موجود دارد. این روش‌شناسی، تجربه‌ای علاوه بر آنالیز تأثیرات متغیرهای مستقل، یک مدل ریاضی را نیز که توضیح دهنده فرآیند است، در اختیار محقق قرار می‌دهد (باس و بایاک ۲۰۰۷). این روش در تحقیقات متعددی برای بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن محصولات غذایی مختلف استفاده شده است (همامی و همکاران ۱۹۹۹، مادامبا ۲۰۰۲، اودین و همکاران ۲۰۰۲، گیری و پراساد ۲۰۰۷، کرزو و همکاران ۲۰۰۸، کوچکی و آذرپژوه ۲۰۰۹، اربای و ایسیر ۲۰۰۹). به عنوان مثال، در پژوهشی فرآیند خشک‌شدن ورقه‌های سیب در یک خشک‌کن انجمادی با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه‌سازی شده است (همامی و همکاران ۱۹۹۹). این پژوهشگران، متغیرهای فشار و دما را به عنوان متغیرهای مستقل و شاخص‌های کیفی رنگ، بافت و ظاهر را به

^۱ Response Surface Methodology

محتوای فنلی کل و کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و حداکثر بازده انرژی دسترس‌پذیر برای محتوای رطوبت نهایی زیر ۶٪ در نظر گرفته شد. شرایط بهینه برای رسیدن به اهداف در نظر گرفته شده فوق، دمای هوای ۵۱/۱۶ درجه سانتی‌گراد، سرعت هوای ۱/۰۱ متر بر ثانیه و زمان فرآیند ۲۹۸/۶۸ دقیقه به دست آمد. در این نقطه بهینه، محتوای فنلی کل، کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی، محتوای رطوبت نهایی و بازده انرژی دسترس‌پذیر به ترتیب ۱۰/۲۵٪، ۱/۸۸٪، ۶/۰٪ و ۶۵/۵۰٪ بودند.

هدف این پژوهش، بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن لایه نازک موز به روش سطح پاسخ از طریق بررسی تأثیرات ضخامت ورقه‌های موز، زمان، دما و سرعت هوای فرآیند بر محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای انجام آزمایش‌ها، از یک خشک‌کن لایه نازک آزمایشگاهی استفاده شد. آزمایش‌ها به منظور بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن لایه نازک به روش سطح پاسخ با ورقه‌های موز به ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر، دمای هوای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ورودی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه انجام شد. نحوه خشک‌کردن بدین صورت بود که هوای جریان یافته به وسیله دمنده از المنت‌ها گذشته، گرم شده و به وسیله کانال به سمت ورقه‌های موز هدایت می‌شد. جریان هوا با عبور از توده موز باعث جذب رطوبت و خشک‌شدن آن می‌شد. برای تهیه ورقه‌های نازک موز از دستگاه ورقه‌بر (کالباس بر) استفاده گردید. ۸۵ گرم ورقه نازک موز بر روی سینی توری آلومینیومی مربعی به ابعاد ۲۵×۲۵ سانتی‌متر مربع به گونه‌ای چیده شد که روی هر سینی یک لایه از محصول قرار گرفته بود. در طی خشک‌شدن، وزن ورقه‌ها به وسیله ترازوی دیجیتالی متصل به رایانه

عنوان متغیر وابسته تعیین کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که فشار ۵۰ پاسکال و دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد به عنوان نقطه بهینه، بیشترین کیفیت را دارا می‌باشد.

همچنین، کرزو و همکاران (۲۰۰۸)، فرآیند خشک‌شدن ورقه‌های کربو^۱ را با استفاده از روش سطح پاسخ مدل-سازی کردند. متغیرهای مستقل پژوهش، دما، سرعت هوا و زمان خشک‌شدن بود؛ در حالی که متغیرهای وابسته، محتوای رطوبت، نرخ خشک‌شدن، بازده انرژی و بازده انرژی دسترس‌پذیر^۲ (پتانسیل انجام بیشترین کار برگشت پذیر ممکن توسط سیستم)، را شامل می‌شد. اهداف توابع مطلوبیت در این پژوهش، کمینه‌کردن محتوای رطوبت و بیشینه‌کردن نرخ خشک‌شدن، بازده انرژی و انرژی دسترس‌پذیر تعیین شد. در این پژوهش، مدل‌های درجه دوم با استفاده از روش سطح پاسخ به خوبی متغیرهای وابسته را پیش‌بینی کردند و دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت هوای ۱/۰۸ متر بر ثانیه و زمان ۶۹ دقیقه به عنوان نقطه بهینه به منظور کمینه‌شدن محتوای رطوبت و بیشینه‌شدن نرخ خشک‌شدن، بازده انرژی و انرژی دسترس‌پذیر برای خشک‌شدن ورقه‌های کربو ارائه شد.

در تحقیقی دیگر، روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی شرایط فرآیند خشک‌کردن برگ‌های زیتون به کار رفته است (اربابی و ایسیر ۲۰۰۹). در این تحقیق، از تابع مطلوبیت به عنوان روش بهینه‌سازی استفاده شد. فاکتورهای بهینه‌سازی شامل دمای هوا (۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، سرعت هوا (۰/۵ تا ۱/۵ متر بر ثانیه)، زمان فرآیند (۲۴۰ تا ۴۸۰ دقیقه) و پاسخ‌های مورد بررسی شامل محتوای فنلی کل، کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی، محتوای رطوبت نهایی و بازده انرژی دسترس‌پذیر بود. شرایط بهینه برای خشک‌کردن برگ‌های زیتون، حداقل

¹ Coroba

² Exergy

که در آن x متغیر مستقل کد نشده و X متغیر مستقل کد شده می‌باشد. مدلی که از طرح مورد اجرا به دست می‌آید، برای هر یک از پاسخ‌ها توسط رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 a_{ij} x_i x_j \quad [2]$$

که در آن y ، پاسخ پیش‌بینی شده (محتوای رطوبت و نرخ خشک شدن)، x_i و x_j متغیرهای مستقل کد شده و a_0 ، a_i و a_{ij} ضرایب مدل می‌باشند.

محتوای رطوبت و نرخ خشک شدن ورقه‌های موز بر پایه خشک در یک دوره زمانی به ترتیب توسط روابط ۳ و ۴ محاسبه شدند (کرزو و همکاران ۲۰۰۸):

$$MC = \frac{W_i M_0 - (W_t - W_{t+\Delta t})}{W(1 - M_0)} \quad [3]$$

MC: محتوای رطوبت (kg/kg d.m.)

W_i : وزن اولیه (kg)

W_t : وزن در لحظه t ام (kg)

$W_{t+\Delta t}$: وزن در لحظه $t+\Delta t$ (kg)

M_0 : محتوای رطوبت اولیه (kg/kg d.m.)

$$DR = \frac{W_t - W_{t+\Delta t}}{W(1 - M_0)(t_{t+\Delta t} - t_t)} \quad [4]$$

DR: نرخ خشک شدن (kg_{water}/kg d.m. .min)

Δt : یک دوره زمانی (min)

ΔW : تغییر وزن محصول در دوره زمانی (kg)

و رطوبت و دمای هوای خشک‌کن هر ۵ ثانیه اندازه‌گیری و ثبت شد. خشک‌شدن تا زمان ثابت‌شدن تقریبی وزن ورقه‌های نازک موز ادامه داشت. سپس، نمونه‌ها در داخل آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و وزن خشک نمونه‌ها به دست آمد.

طرح مورد استفاده روش سطح پاسخ در این پژوهش، طرح مرکب مرکزی بود که بیشترین کاربرد در میان طرح‌های روش سطح پاسخ را به خود اختصاص داده است (باس و بایاک ۲۰۰۷). انواع طرح‌هایی که می‌توان در روش سطح پاسخ استفاده کرد عبارتند از: طرح گردش-پذیر^۱، طرح مرکب مرکزی^۲، طرح باکس بنکن^۳، طرح هیبریدی^۴ و طرح بهینه دی و جی^۵. در طرح مرکب مرکزی، می‌توان تا پنج سطح از متغیرهای مستقل را به کار برد و در عین حال به تعداد آزمایش‌های زیادی نیاز نمی‌باشد. این امر باعث می‌شود که دقت پیش‌بینی و آسانی پژوهش (به خاطر تعداد آزمایش کمتر) به طور هم‌زمان بیشتر شود. متغیرهای مستقل در خشک‌کن شامل ضخامت لایه موز، زمان خشک‌شدن، دما و سرعت هوای خشک‌کن و پاسخ‌های مورد نظر نیز محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن بودند. بر اساس طرح مرکب مرکزی، سطوح متغیرهای مستقل بر اساس مقادیر کد شده ۰، ±۱ و ±α انتخاب می‌شود. α برابر مجذور تعداد متغیرهای مستقل می‌باشد. مقادیر کمینه و بیشینه مورد نظر در آزمایش برای هر متغیر مطابق با کدهای ±۱ قرار داده می‌شود و با استفاده از رابطه ۱ سه مقدار کد شده دیگر (۰ و ±α) به دست می‌آید:

$$X = \frac{x - (x_{\max} + x_{\min})/2}{(x_{\max} - x_{\min})/2} \quad [1]$$

¹ Rotatable Designs

² Central Composite Designs

³ Box-Behnken Designs

⁴ Roquemore's (Hybrid) Designs

⁵ D and G-Optimal Designs

از برنامه نرم‌افزاری SAS 9.1 و براساس طرح روش سطح پاسخ و توابع مطلوبیت انجام شد و در نهایت یک نقطه بهینه برای متغیرهای مستقل که منجر به بیشینه‌شدن نرخ خشک‌شدن و کمینه‌شدن محتوای رطوبت لایه‌های موز می‌شود، به دست آمد.

نتایج و بحث

در جدول ۱ مقادیر به دست آمده محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن ورقه‌های موز در نقاط کد شده و کد نشده طرح مرکب مرکزی ارائه شده است. در این بخش، تأثیرات ضخامت ورقه‌های موز، زمان، دما و سرعت هوای خشک‌شدن بر محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن به روش سطح پاسخ مدل شده است. خلاصه‌ای از ANOVA در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که از این جدول مشخص است، مقدار P برای عبارتهای خطی، درجه دو و متقابل مربوط به مدل رگرسیونی درجه دوم محتوای رطوبت به ترتیب ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۴ بود. همچنین، این مقادیر برای مدل رگرسیونی درجه دوم نرخ خشک‌شدن به ترتیب ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۲۴ و ۰/۰۰۱۲ به دست آمد. مقدار P برای مدل رگرسیونی درجه دوم محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن نیز ۰/۰۰۰۱ حاصل شد. مدل‌ها و عبارتهایی که مقدار P آن‌ها از ۰/۰۵ کمتر باشد، از لحاظ آماری می‌تواند داده‌ها را با خطای کمتر از ۵ درصد پیش‌بینی کند (کرزو و همکاران ۲۰۰۸). بنابراین، جدول ANOVA برای پیش‌بینی محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن مدل‌های درجه دومی که هر سه عبارت خطی، درجه دو و متقابل را شامل می‌شود، ارائه داده شده است. نتایج رگرسیونی بدست آمده از مدل‌های طرح مرکب مرکزی نیز در جدول ۳ آمده است. عبارتهایی که مقدار P آن‌ها از ۰/۰۵ بیشتر باشد وارد مدل نمی‌شود. هر چه مقدار P یک عبارت کوچکتر باشد معنی‌داری آن عبارت

از آنجایی که هدف پژوهش حاضر، بهینه‌سازی برای دو متغیر وابسته (محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن) می‌باشد، بنابراین از بهینه‌سازی چندهدفه^۱ به طور هم‌زمان بر اساس توابع مطلوبیت استفاده شد. تابع مطلوبیت برای هر یک از پاسخ‌ها به شکل زیر نوشته می‌شود (راوی کومار و همکاران ۲۰۰۷):

[۵]

$$d_q(y_q) = \begin{cases} 0 & \text{if } y_q(x_i) < L_q \\ \left(\frac{y_q(x_i) - L_q}{T_q - L_q} \right)^s & \text{if } L_q \leq y_q(x_i) \leq T_q \\ 1 & \text{if } y_q(x_i) > T_q \end{cases}$$

L_q و T_q به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه، $y_q(x_i)$ مقدار پاسخ q به ازای متغیر مستقل i ، $d_q(y_q)$ تابع مطلوبیت پاسخ q می‌باشد. بدین ترتیب برای هر پاسخ، یک تابع مطلوبیت مجزا با بردی از ۰ تا ۱ به دست خواهد آمد. با استفاده از معادله ۶ یک میانگین هندسی از توابع مطلوبیت مجزا به دست می‌آید:

$$D = (d_1(y_1) \times d_2(y_2))^{1/2} \quad [۶]$$

که در آن D مطلوبیت کلی فرآیند می‌باشد. بنابراین، تابع مطلوبیت کلی که دامنه تغییراتش همان دامنه تغییرات متغیرهای مستقل می‌باشد محدودده ای بین ۰-۱ ارائه می‌دهد که هر چه مقدار تابع به عدد ۱ نزدیکتر شود مطلوبیت فرآیند از لحاظ پاسخ‌ها (محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن) بیشتر خواهد بود. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده

جدول ۱ - نقاط کدشده و کدنشده طرح روش سطح پاسخ و مقادیر مشاهده شده محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن

نرخ خشک‌شدن (kg _{water} /kg _{d.m.} .min) *10 ⁻¹	محتوای رطوبت (kg/kg _{d.m.})	دمای خشک‌کن (°C)		سرعت هوا (m/s)		زمان خشک‌شدن (min)		ضخامت ورقه موز (mm)	
		کدشده	کدنشده	کدشده	کدنشده	کدشده	کدنشده	کدشده	کدنشده
۲/۰۸۱	۰/۶۹۲	-۱	۶۰	-۱	۰/۵	-۱	۱۰۰	-۱	۲
۱/۴۴۷	۱/۷۳۷	-۱	۶۰	-۱	۰/۵	-۱	۱۰۰	۱	۶
۱/۲۰۲	۰/۱۲۸	-۱	۶۰	-۱	۰/۵	۱	۲۲۰	-۱	۲
۱/۰۶۹	۰/۸۳۱	-۱	۶۰	-۱	۰/۵	۱	۲۲۰	۱	۶
۲/۳۸۰	۰/۴۶۷	-۱	۶۰	۱	۱/۵	-۱	۱۰۰	-۱	۲
۱/۷۲۱	۱/۳۷۷	-۱	۶۰	۱	۱/۵	-۱	۱۰۰	۱	۶
۱/۲۷۰	۰/۰۵۲	-۱	۶۰	۱	۱/۵	۱	۲۲۰	-۱	۲
۱/۲۰۸	۰/۴۴۱	-۱	۶۰	۱	۱/۵	۱	۲۲۰	۱	۶
۲/۹۶۹	۰/۲۱۵	۱	۸۰	-۱	۰/۵	-۱	۱۰۰	-۱	۲
۱/۸۷۸	۱/۱۳۸	۱	۸۰	-۱	۰/۵	-۱	۱۰۰	۱	۶
۱/۴۳۹	۰/۰۱۸	۱	۸۰	-۱	۰/۵	۱	۲۲۰	-۱	۲
۱/۲۱۰	۰/۳۵۵	۱	۸۰	-۱	۰/۵	۱	۲۲۰	۱	۶
۲/۷۰۷	۰/۱۳۹	۱	۸۰	۱	۱/۵	-۱	۱۰۰	-۱	۲
۲/۳۰۷	۰/۷۹۱	۱	۸۰	۱	۱/۵	-۱	۱۰۰	۱	۶
۱/۲۸۵	۰/۰۲۰	۱	۸۰	۱	۱/۵	۱	۲۲۰	-۱	۲
۱/۳۲۳	۰/۱۸۹	۱	۸۰	۱	۱/۵	۱	۲۲۰	۱	۶
۱/۴۵۹	۰/۴۵۴	-۱	۶۰	۰	۱	۰	۱۶۰	۰	۴
۱/۵۱۷	۰/۱۶۹	۱	۸۰	۰	۱	۰	۱۶۰	۰	۴
۱/۳۳۷	۰/۳۶۹	۰	۷۰	-۱	۰/۵	۰	۱۶۰	۰	۴
۱/۷۳۹	۰/۱۷۱	۰	۷۰	۱	۱/۵	۰	۱۶۰	۰	۴
۲/۱۳۷	۰/۷۷۰	۰	۷۰	۰	۱	-۱	۱۰۰	۰	۴
۱/۲۶۲	۰/۱۳۱	۰	۷۰	۰	۱	۱	۲۲۰	۰	۴
۲/۹۴۹	۱/۷۲۷	۰	۷۰	۰	۱	-۲	۴۰	۰	۴
۱/۰۱۵	۰/۰۶۵	۰	۷۰	۰	۱	۲	۲۸۰	۰	۴
۱/۹۴۹	۰/۰۸۳	۰	۷۰	۰	۱	۰	۱۶۰	-۱	۲
۱/۴۴۶	۰/۷۱۸	۰	۷۰	۰	۱	۰	۱۶۰	۱	۶
۱/۶۱۸	۰/۳۱۷	۰	۷۰	۰	۱	۰	۱۶۰	۰	۴
۱/۴۲۴	۰/۲۵۱	۰	۷۰	۰	۱	۰	۱۶۰	۰	۴
۱/۳۵۱	۰/۲۳۵	۰	۷۰	۰	۱	۰	۱۶۰	۰	۴

جدول ۲ - تجزیه واریانس برای مدل‌های کلی و پیش‌بینی محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن بر اساس روش سطح پاسخ

نرخ خشک‌شدن			محتوای رطوبت			منبع
P	مجموع مربعات	درجه آزادی	P	مجموع مربعات	درجه آزادی	
						مدل کلی
۰/۰۰۰۱	۸/۱۲۲	۱۴	۰/۰۰۰۱	۶/۴۶۳	۱۴	مدل درجه دوم
۰/۰۰۰۱	۷/۰۳۱	۴	۰/۰۰۰۱	۵/۳۴۱	۴	عبارت خطی
۰/۰۰۲۴	۰/۴۳۴	۴	۰/۰۰۰۱	۰/۶۸۰	۴	عبارت درجه دو
۰/۰۰۱۲	۰/۶۵۸	۶	۰/۰۰۰۴	۰/۴۴۱	۶	عبارت متقابل
	۰/۲۱۳	۱۴		۰/۱۱۴	۱۴	اشتباه
۰/۶۴۴۲	۰/۱۷۹	۱۲	۰/۱۸۲	۰/۱۱۰	۱۲	عدم تناسب
	۰/۰۳۴	۲		۰/۰۰۴	۲	اشتباه خالص
	۸/۳۳۶	۲۸		۰/۵۷۷	۲۸	کل
						مدل پیش‌بینی
۰/۰۰۰۱	۸/۰۵۷	۹	۰/۰۰۰۱	۶/۴۳۷	۱۰	مدل
	۰/۲۷۸	۱۹		۰/۱۳۹	۱۸	اشتباه
۰/۶۶۷۴	۰/۲۴۴	۱۷	۰/۱۹۶	۰/۱۳۵	۱۶	عدم تناسب
	۰/۰۳۴	۲		۰/۰۰۳	۲	اشتباه خالص
	۸/۳۳۶	۲۸		۶/۵۷۷	۲۸	کل

ضخامت وارد مدل شدند؛ درحالی که بقیه عبارت‌ها رابطه معنی‌داری با محتوای رطوبت نداشته و وارد مدل نشدند. علامت مثبت برای ضرایب عبارت‌ها یک تأثیر مستقیم و هم‌جهت و علامت منفی یک رابطه عکس را بین عبارت‌ها و محتوای رطوبت نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، همه عبارت‌های خطی به غیر از ضخامت، یک رابطه معکوس با محتوای رطوبت داشتند.

بنابراین، محتوای رطوبت ورقه‌های موز با افزایش این عبارت‌ها کاهش خواهد یافت. در طرف دیگر، همه عبارت‌های مربع در مدل یک تأثیر مثبت بر محتوای رطوبت داشتند که نشان می‌دهد با افزایش این عبارت‌ها محتوای رطوبت نیز افزایش خواهد یافت. همان‌طور که در جدول ۳ آمده است، مقدار بالای R^2 (۹۶/۷۱) نشان می‌دهد که همبستگی بالایی بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده

در مدل بیشتر خواهد بود (راوی کومار و همکاران ۲۰۰۷).

محتوای رطوبت

جدول ۳ نشان می‌دهد که فاکتورهای خطی ضخامت ورقه‌های موز (d)، زمان (t)، دما (T) و سرعت هوای خشک‌شدن (V) تأثیر معنی‌داری بر محتوای رطوبت ورقه‌های موز داشتند. از میان عبارت‌های مربع (درجه دوم) تنها زمان خشک‌شدن و ضخامت ورقه‌های موز وارد مدل شده است. این امر نشان می‌دهد که بین این عبارت‌ها و محتوای رطوبت، یک رابطه درجه دوم وجود دارد. از میان عبارت‌های متقابل، عبارت‌های متقابل دما و زمان، دما و ضخامت، سرعت هوا و ضخامت، زمان و

جدول ۳ - ضرایب تخمینی برای مدل‌های رگرسیون محتوای رطوبت و نرخ خشک شدن بر اساس روش سطح پاسخ

نرخ خشک شدن				محتوای رطوبت				عبارت
P	مجموع مربعات	خطای انحراف معیار	ضریب	P	مجموع مربعات	خطای انحراف معیار	ضریب	
۰/۰۰۰۱	۰/۴۳۴۷	۰/۰۲۸۵	۰/۱۵۵۴	۰/۰۰۰۱	۰/۵۴۰۷	۰/۰۲۰۷	-۰/۱۷۳۳	T
۰/۰۱۹۹	۰/۰۹۴۶	۰/۰۲۸۵	۰/۰۷۳۵	۰/۰۰۰۱	۰/۱۸۷۴	۰/۰۲۰۷	-۰/۱۰۲۰	V
۰/۰۰۰۱	۵/۷۵۲۱	۰/۰۲۳۷	-۰/۴۷۰۳	۰/۰۰۰۱	۲/۷۶۸۱	۰/۰۱۷۲	-۰/۳۲۶۲	t
۰/۰۰۰۱	۰/۷۴۹۳	۰/۰۲۸۵	-۰/۲۰۴۰	۰/۰۰۰۱	۱/۸۴۴۹	۰/۰۲۰۷	۰/۳۲۰۲	d
								T ²
								T*V
۰/۰۰۲۰	۰/۱۸۶۳	۰/۰۳۰۲	-۰/۱۰۷۹	۰/۰۰۵۲	۰/۰۷۸۴	۰/۰۲۲۰	۰/۰۶۹۹	T*t
				۰/۰۱۳۲	۰/۰۵۸۴	۰/۰۲۲۰	-۰/۰۶۰۴	T*d
								V ²
								V*t
۰/۰۰۵۲	۰/۰۶۳۰	۰/۰۳۰۲	۰/۰۶۳۷	۰/۰۲۱۴	۰/۰۴۹۱	۰/۰۲۲۰	-۰/۰۵۵۴	V*d
۰/۰۰۰۱	۰/۳۵۶۲	۰/۰۲۳۴	۰/۱۱۵۵	۰/۰۰۰۱	۰/۶۱۴۸	۰/۰۱۷۰	۰/۱۵۱۸	t ²
۰/۰۰۰۱	۰/۳۵۸۹	۰/۰۳۰۲	۰/۱۴۹۸	۰/۰۰۰۱	۰/۲۳۳۳	۰/۰۲۲۰	-۰/۱۲۰۸	t*d
۰/۰۴۷۸	۰/۰۶۵۵	۰/۰۴۶۳	۰/۰۹۷۹	۰/۰۰۸۸	۰/۰۶۶۶	۰/۰۳۳۷	۰/۰۹۸۸	d ²
شاخص‌های آماری								
		۱/۶۸۰۰			۰/۴۸۵۳			Mean
		%۹۶/۶۶			%۹۷/۸۸			R-Square
		%۹۵/۰۸			%۹۶/۷۱			Adj. R-Square
		۰/۱۲۱۰			%۰/۰۸۸۸			RMSE
		۷/۲۰۲۱			۱۸/۱۱۹۰			C.V.

[۷]

محتوای رطوبت برقرار است. مدل به دست آمده بر

$$\begin{aligned}
 MC = & 3.0032 - 0.0239T + 0.01730V - 0.0231t \\
 & + 0.3903d + 0.0001T.t - 0.0030T.d \\
 & - 0.0554V.d + 0.0001t^2 \\
 & - 0.0010t.d + 0.0247d^2
 \end{aligned}$$

اساس داده‌های کد نشده عبارت است از:

نرخ خشک‌شدن

همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است، همه عبارات‌های خطی و همچنین عبارات‌های مربع زمان خشک‌شدن و ضخامت ورقه‌های موز، رابطه معنی‌داری با نرخ خشک‌شدن دارند و بنابراین همه این عبارات‌ها وارد مدل شدند. در مورد عبارات‌های متقابل نیز، به غیر از عبارات‌های متقابل دما و سرعت، دما و ضخامت، سرعت و زمان، بقیه عبارات‌های متقابل رابطه معنی‌داری با نرخ خشک‌شدن داشته و وارد مدل شدند. عبارات‌های خطی زمان و ضخامت و همچنین عبارت متقابل دما و زمان نیز یک رابطه معکوس با نرخ خشک‌شدن داشتند؛ در حالی که بقیه عبارات‌های معنی‌دار در مدل، رابطه مستقیم با نرخ خشک‌شدن از خود نشان دادند. مدل سطح پاسخ به دست آمده بر اساس داده‌های کد نشده برای نرخ خشک‌شدن عبارت است از:

[۸]

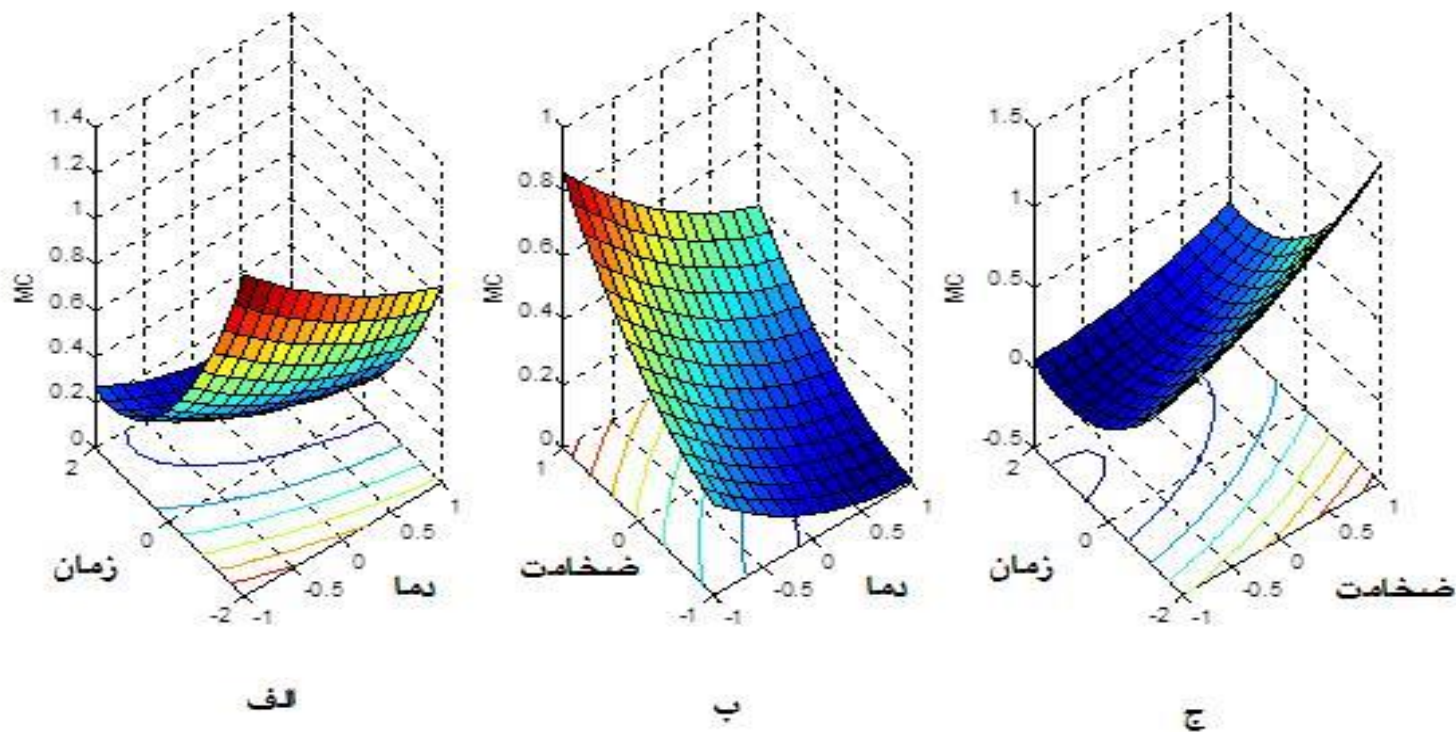
$$DR = 2.1942 + 0.0443T - 0.1060V - 0.0105t - 0.5604d - 0.0002T.t + 0.0627V.d + 0.0001t^2 + 0.0012t.d + 0.0245d^2$$

سطوح سه بعدی

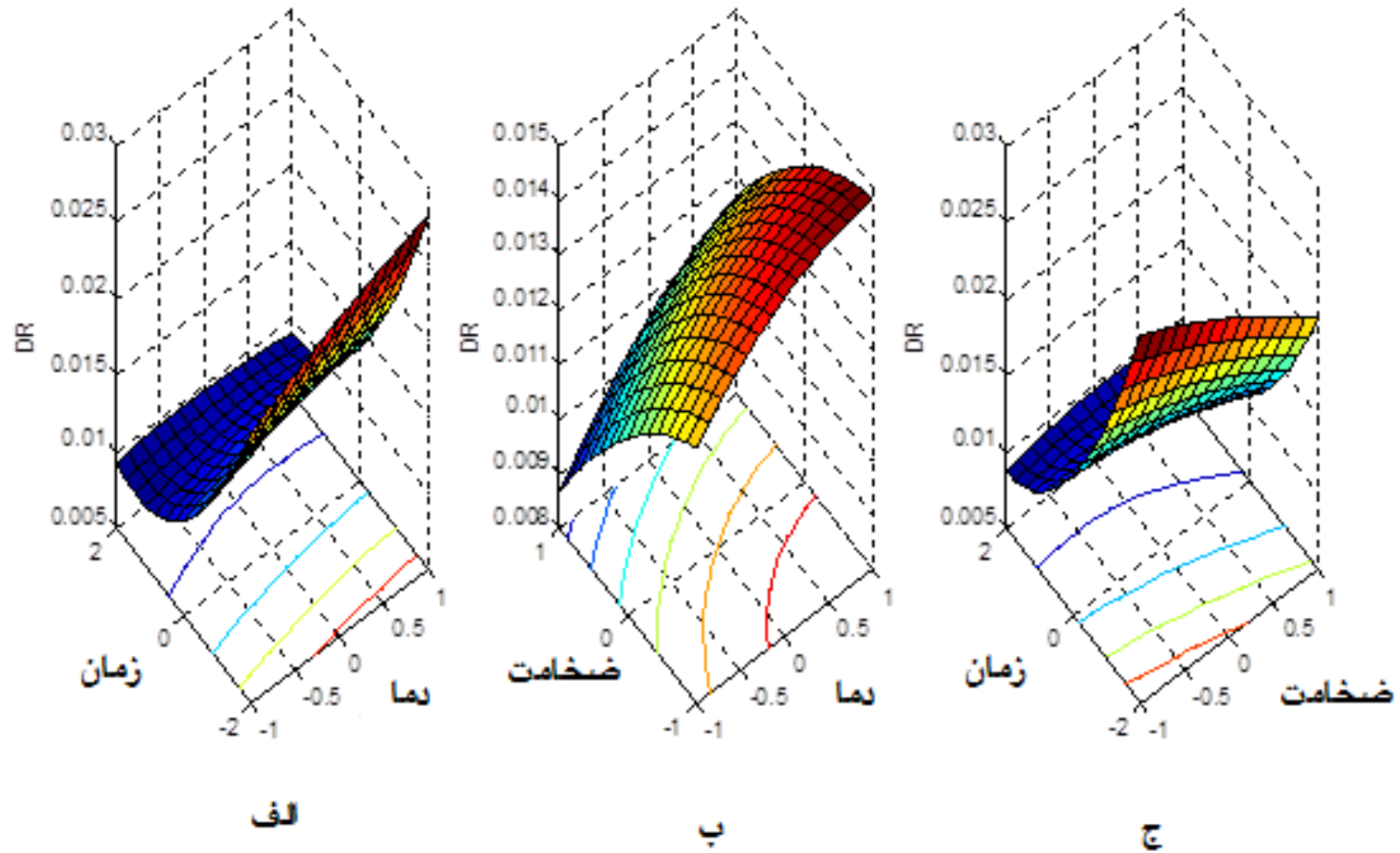
سطوح سه بعدی برای مدل محتوای رطوبت در شکل ۱ نشان داده شده است. در این سطوح، بازه تغییرات دما و ضخامت از -۱ تا +۱ و زمان از -۲ تا +۲ در سرعت هوای صفر در مقادیر کد شده می‌باشد. این سطوح نشان می‌دهند که با افزایش دما و زمان و همچنین کاهش ضخامت، محتوای رطوبت کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، رابطه بین محتوای رطوبت و متغیرهای دما و زمان خشک‌شدن مستقیم بوده در حالی که بین محتوای رطوبت و متغیر ضخامت رابطه معکوس وجود دارد. با استفاده از معادله ۷ در سرعت هوا و ضخامت برابر صفر کد شده، محتوای

رطوبت در بیشترین مقدار دما (۸۰ درجه سانتی‌گراد) و بیشترین زمان خشک‌شدن (۲۸۰ دقیقه) کمترین مقدار رطوبت در کمترین دما (۶۰ درجه سانتی‌گراد) و کمترین زمان (۴۰ دقیقه) بیشترین میزان (۵/۱۸ kg/kgd.m.) را داشت. در سرعت هوا و زمان برابر صفر کد شده، کمترین مقدار محتوای رطوبت (۰/۱ kg/kgd.m.) در دمای بالا (۸۰ درجه سانتی‌گراد) و ضخامت کمتر (۲ میلی‌متر) حاصل می‌شود. همچنین، زمانی که سرعت و دمای هوا برابر صفر کد شده باشد، کمترین محتوای رطوبت (۱/۱ kg/kgd.m.) در زمان بیشتر (۲۸۰ دقیقه) و ضخامت کمتر (۲ میلی‌متر) وجود خواهد داشت. کرزو و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی بر اساس روش سطح پاسخ با خشک‌شدن لایه نازک ورقه‌های کربوا، نتایجی مشابه با پژوهش حاضر را ارائه کردند. این پژوهش‌گران، کمترین محتوای رطوبت (۰/۲ kg/kgd.m.) را در دمای ۹۷/۳ درجه سانتی‌گراد به عنوان بیشترین دما و در ۱۱۱ دقیقه به عنوان بیشترین زمان گزارش کردند. فرناندو و همکاران (۲۰۱۱) نیز کمترین محتوای رطوبت ورقه‌های موز را در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳۰۰ دقیقه، در کمترین ضخامت گزارش کردند. این پژوهش‌گران نیز از ورقه‌های موز با ضخامت‌های ۰/۵ تا ۱/۵ سانتی‌متر، ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر را با کمترین محتوای رطوبت برابر kg/kgd.m. گزارش نمودند.

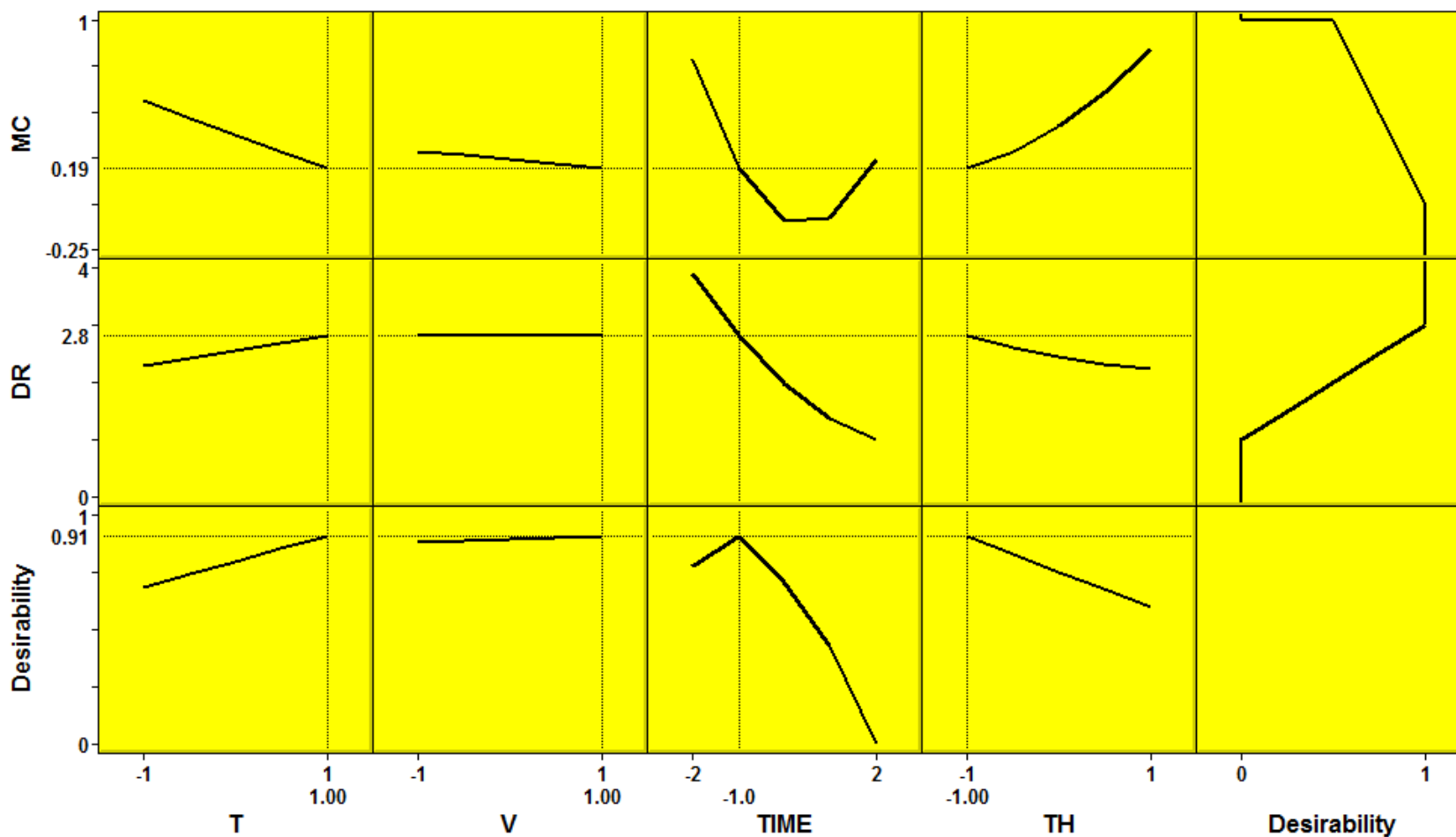
علاوه بر این، شکل ۲ سطوح سه بعدی برای مدل نرخ خشک‌شدن را نشان می‌دهد. نرخ خشک‌شدن در شرایط کمترین زمان و ضخامت و همچنین بیشترین دما، بیشترین مقدار را داشت. با کاهش زمان و افزایش دما، نرخ خشک‌شدن نیز افزایش یافت؛ اما با افزایش زمان، دما تأثیر معنی‌داری بر نرخ خشک‌شدن نداشت. با افزایش زمان، ضخامت هم تأثیری بر نرخ خشک‌شدن از خود



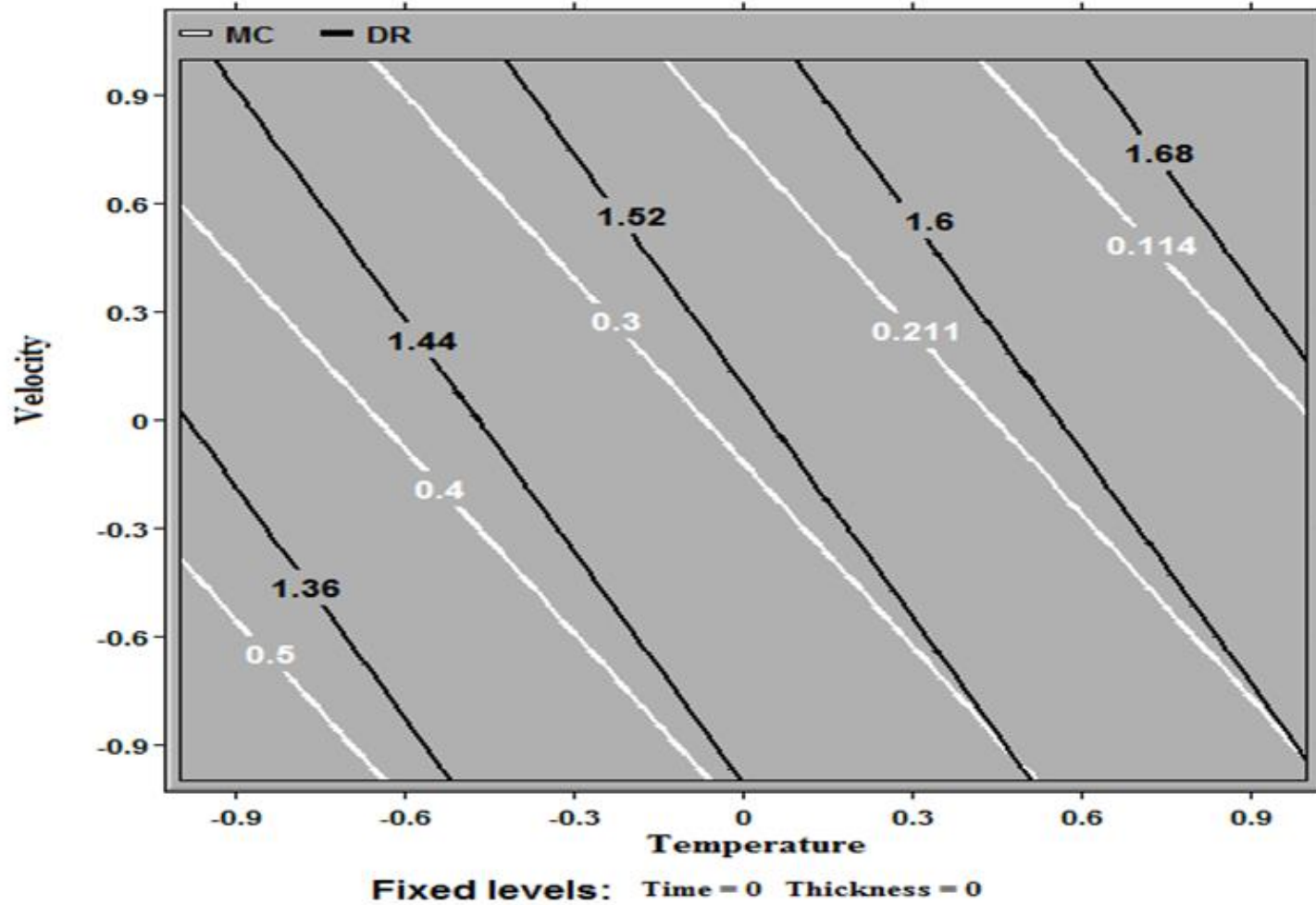
شکل ۱ - سطوح پاسخ MC: محتوای رطوبت ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{d.m}}$) در سرعت هوای صفر کد شده و الف) ضخامت برابر صفر، ب) زمان برابر صفر، ج) دمای برابر صفر در واحدهای کد شده (سرعت هوا (m/s)، ضخامت (mm)، زمان (min)، دما ($^{\circ}\text{C}$))



شکل ۲ - سطوح پاسخ DR: نرخ خشک شدن ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{d.m.}}\cdot\text{min}$) در سرعت هوای صفر کد شده و الف) ضخامت برابر صفر، ب) زمان برابر صفر، ج) دمای برابر صفر در واحدهای کد شده (سرعت هوا (m/s)، ضخامت (mm)، زمان (min)، دما ($^{\circ}\text{C}$))



شکل ۳- مقطع عرضی روند مدل‌های محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن در نقطه بهینه (T: دما (°C)، V: سرعت (m/s)، TIME: زمان (min)، TH: ضخامت (mm)، DR: نرخ خشک‌شدن (kg_{water}/kg_{d.m.}.min)، MC: محتوای رطوبت (kg/kg_{d.m.}) و Desirability: مطلوبیت می‌باشد).



شکل ۴ - نقشه تراز پاسخ‌های دوگانه MC: محتوای رطوبت ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{d.m.}}$) و DR: نرخ خشک شدن ($\text{kg} \cdot 10^{-1} / \text{kg}_{\text{d.m.}} \cdot \text{min}$) در زمان و ضخامت برابر صفر در واحد کد شده (Velocity: سرعت (m/s) و Temperature: دما ($^{\circ}\text{C}$) می‌باشد).

یک پاسخ خاص می‌باشد که به خط پیش‌بینی معروف است. این خطوط با تغییر جایگاه در نهایت در بهینه‌ترین نقطه ثابت می‌شوند. در پژوهش حاضر، با توجه به این که بیشترین مقبولیت فرآیند در کمترین محتوای رطوبت و بیشترین نرخ خشک‌شدن تعریف شده است، مطلوبیت فرآیند به بهینه‌سازی هم‌زمان هر دو پاسخ مذکور مرتبط است. همانطور که در شکل ۳ مشخص است، بیشترین مطلوبیت در دمای $1 (^{\circ}\text{C})$ ، سرعت هوای $1 (1/5 \text{ m/s})$ ، زمان $1- (100 \text{ min})$ و ضخامت $1- (2 \text{ mm})$ به دست آمد. در این نقطه، فرآیند خشک‌شدن ورقه‌های موز به طور هم‌زمان بیشترین سرعت خشک‌شدن را به همراه کمترین محتوای رطوبت تجربه می‌کند. مطلوبیت این شرایط برابر $0/91$ بوده که بیشترین مطلوبیت ممکن می‌باشد.

یک نمونه از نقشه تراز پاسخ‌های دوگانه محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن در شکل ۴ ارائه شده است. نقشه‌های تراز به وضوح، تأثیر متغیرهای مستقل را بر پاسخ‌ها نشان می‌دهند. در این نقشه‌ها، دو متغیر در نقطه صفر کد شده ثابت نگه داشته شده و نقشه بر اساس دو متغیر دیگر کشیده می‌شود. به عنوان مثال، در شکل ۴، زمان و ضخامت ثابت بوده و تأثیرات متغیرهای دما و سرعت هوا بر محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، با افزایش دما، محتوای رطوبت کمتر از $0/5 \text{ kg/kgd.m.}$ ، در سرعت هوای بیشتر از $0/8$ متر بر ثانیه و دمای بیشتر از $63/7$ درجه سانتی‌گراد حاصل شد. نرخ خشک‌شدن بالاتر از $0/14 \text{ kg/kgd.m.}$ نیز در سرعت هوای بیشتر از $1/1$ متر بر ثانیه و دمای بیشتر از 65 درجه سانتی‌گراد به دست آمد. تأثیر افزایش سرعت نیز مشابه افزایش دما بود. به عبارت دیگر، افزایش سرعت نیز باعث کاهش

نشان نداد؛ در حالی که با کاهش زمان، نرخ خشک‌شدن با کاهش ضخامت، افزایش پیدا کرد. با استفاده از معادله ۸، در ضخامت و سرعت برابر صفر در واحد کد شده، بیشترین نرخ خشک‌شدن برابر $2/22 \text{ kg/kgd.m.}$ بود که در بیشترین دما (80 درجه سانتی‌گراد) و کمترین زمان (40 دقیقه) حاصل شد. در زمان و سرعت برابر صفر کد شده، بیشترین نرخ خشک‌شدن که برابر kg/kgd.m. بود، در بیشترین دما (80 درجه سانتی‌گراد) و کمترین ضخامت (2 میلی‌متر) به دست آمد. همچنین، در دما و سرعت برابر صفر کد شده، بیشترین نرخ خشک‌شدن برابر $2/42 \text{ kg/kgd.m.}$ بود که در کمترین زمان (40 دقیقه) و کمترین ضخامت (2 میلی‌متر) حاصل شد. کوا و همکاران (2009) نیز با بررسی تأثیر زمان بر نرخ خشک‌شدن، بیشترین نرخ خشک‌شدن ورقه‌های موز را در یک خشک‌کن خورشیدی در زمان‌های اولیه برابر $0/2 \text{ kg/kgd.m.}$ گزارش کردند و با گذشت 20 ساعت به عنوان بیشترین زمان، مقدار این نرخ به $0/2 \text{ kg/kgd.m.}$ کاهش یافته و به کمترین مقدار رسید. پراچایاواراکورن و همکاران (2008) نیز تأثیر دو عامل زمان و دماهای 110 تا 140 درجه سانتی‌گراد را بر نرخ خشک‌شدن ورقه‌های موز بررسی کردند و بیشترین نرخ خشک‌شدن ورقه‌های موز با مقدار kg/kgd.m. در زمان‌های اولیه و دمای 140 درجه سانتی‌گراد گزارش شد.

بهینه‌سازی با استفاده از توابع مطلوبیت

شکل ۳، مقطع عرضی روند مدل‌های محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن در نقطه بهینه را نشان می‌دهد. این مقطع عرضی یا به عبارت دیگر این نمودارهای برشی، روند هر یک از پاسخ‌ها (محتوای رطوبت و نرخ خشک‌شدن) را در دامنه تغییرات هر یک از متغیرهای مستقل نشان می‌دهد. هر یک از خطوط نقطه‌چین مربوط به یک متغیر مستقل از

وجود دارد؛ به طوری که نرخ خشک‌شدن در شرایط کمترین زمان خشک‌شدن و ضخامت و همچنین بیشترین دمای خشک‌کن، بیشترین مقدار را دارد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین مطلوبیت در دمای 80°C ، سرعت هوای $1/5\text{ m/s}$ ، زمان 100 min و ضخامت 2 mm به دست آمد. در این نقطه، فرآیند خشک‌شدن ورقه‌های موز به طور هم‌زمان بیشترین سرعت خشک‌شدن را به همراه کمترین محتوای رطوبت تجربه کرد. مطلوبیت این شرایط با مقدار $0/91$ به عنوان بیشترین مطلوبیت ممکن حاصل شد.

محتوای رطوبت و افزایش نرخ خشک‌شدن گردید. این شکل همچنین نشان می‌دهد که تأثیر دما بر پاسخ‌ها از سرعت هوا بیشتر است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که رابطه بین محتوای رطوبت و متغیرهای دما و زمان خشک‌شدن ورقه‌های موز مستقیم بوده در حالی که بین محتوای رطوبت و متغیر ضخامت، رابطه معکوس وجود دارد. علاوه بر این، بین نرخ خشک‌شدن و متغیر دما یک رابطه مستقیم ولی بین نرخ خشک‌شدن با زمان و ضخامت ورقه‌های موز یک رابطه عکس

منابع مورد استفاده

- Bas D and Boyac I, 2007. Modeling and optimization II: Comparison of estimation capabilities of response surface methodology with artificial neural networks in a biochemical reaction. *Journal of Food Engineering* 78: 846-854.
- Corzo O, Bracho N, Vasquez A and Pereira A, 2008. Optimization of a thin layer drying process for coroba slices. *Journal of Food Engineering* 85: 372-380.
- Doymaz I, 2010. Evaluation of mathematical models for prediction of thin-layer drying of banana slices. *International Journal of Food Properties* 13: 486-497.
- Erbay Z and Icier F, 2009. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 91: 533-541.
- Feng H and Tang J, 1998. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science* 63: 238-251.
- Fernando WJN, Low HC and Ahmad AL, 2011. Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of sliced materials. A study on slices of banana, cassava and pumpkin. *Journal of Food Engineering* 102: 310-316.
- Giri SK and Prasad S, 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering* 78(2): 512-521.
- Hammami C, Rene F and Marin M, 1999. Process-quality optimization of the vacuum freeze-drying of apple slices by the response surface method. *International Journal of Food Science & Technology* 34(2): 145-160.
- Karim MA and Hawlader MNA, 2005. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. *Journal of Food Engineering* 70: 35-45.
- Koocheki A and Azarpazhooh E, 2009. Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of plum using response surface methodology. *International Journal of Food Properties* 13: 155-166.
- Koua BK, Fassinou WF, Gbaha P and Toure S, 2009. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. *Energy* 34: 1594-1602.

- Madamba PS, 2002. The Response Surface Methodology: An Application to Optimize Dehydration Operations of Selected Agricultural Crops. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 35: 584-592.
- Prachayawarakorn S, Tia W, Plyto N and Soponronnarit S, 2008. Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *Journal of Food Engineering* 85: 509-517.
- Ravikumar K, Krishnan S, Ramalingam S and KB, 2007. Optimization of process variables by the application of response surface methodology for dye removal using a novel adsorbent. *Dyes Pigments* 72: 66-74.
- Thuwapanichayanan R, Prachayawarakorn S and Soponronnarit S, 2008. Drying characteristics and quality of banana foam mat. *Journal of Food Engineering* 86: 573-583.
- Uddin MB, Ainsworth P and Ibanoglu S, 2004. Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of carrots using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 65:473-477.

Process optimization of banana thin-layer drying using response surface methodology

F Karimi¹, J Dehghannya^{2,*} and B Ghanbarzadeh²

Received: September 10, 2011 Accepted: September 21, 2012

¹M.Sc. Graduate, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Assistant Professor and Associate Professor, respectively, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding author: E-mail: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

Abstract

Drying is one of the old methods used for preserving foods; however, due to possible occurrence of some undesirable changes in dried foods, its control is specifically important. Response surface methodology (RSM) is set of techniques used for controlling and optimizing processes where a desired surface is affected by many variables. Thus, RSM can be one of the appropriate methods for controlling time and various drying conditions. In this study, thin-layer drying of banana was conducted at four temperatures (50, 60, 70 and 80°C), three inlet air velocities (0.5, 1 and 1.5 m/s) and three banana thicknesses (2, 4 and 6 mm). The results showed that the highest desirability (0.91) in order to minimize moisture content and maximize drying rate achieved at 80°C temperature, 1.5 m/s inlet air velocity, 100 min drying time and 2 mm thickness.

Keywords: Process optimization, Thin-layer drying, Response surface methodology, Banana