



بهینه‌سازی فرایند خشک کردن کلزا به روش بستر سیال با استفاده از روش پاسخ رویه

نرجس ملک جانی^۱، سیدمهدی جعفری^{۲*}، محمدهاشم رحمتی^۳،
ابراهیم اسماعیل‌زاده^۴ و حبیب‌اله میرزایی^۵

^۱دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
^۲استادیار گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
^۳استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

چکیده

خشک کردن کلزاجهت افزایش طول عمر انبارداری و جلوگیری از افت کیفیت روغن تولیدی ضروری می‌باشد. خشک‌کن بستر سیال یک روش خشک کردن با دمای پایین است که باعث حفظ کیفیت محصولات می‌شود. در این بررسی آزمایشات در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد، سه سطح رطوبت نسبی هوا ۲۰، ۴۰ و ۶۰٪ و سه سطح سرعت هوای ورودی به خشک‌کن ۱، ۳ و ۴/۵ متر بر ثانیه انجام شد. تأثیر پارامترهای فوق روی زمان خشک کردن دانه کلزا، میزان استخراج، اسیدیته و رنگ روغن و همچنین قوه نامیه بذر کلزا با استفاده از روش پاسخ رویه تعیین شد. برای این کار از یک طرح قابل چرخش مکعب مرکزی با سه متغیر دما، سرعت و رطوبت نسبی هوا در سه تکرار استفاده شد. نتایج آنالیز واریانس مدل‌های رگرسیونی پارامترهای فوق نشان داد که همه مدل‌ها با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۹۸، ۸۴/۹۱، ۹۸/۱۳، ۹۷/۷۲ و ۹۵/۷۵ برای زمان خشک کردن، میزان استخراج، اسیدیته و رنگ روغن، و قوه نامیه بذر، همگی در سطح یک درصد معنی‌دار هستند و می‌توان از آنها برای پیشگویی مقادیر متغیرهای تابع در سطوح مختلف متغیرها در فرایند خشک کردن کلزا، استفاده نمود. نتایج بهینه‌سازی با روش پاسخ رویه نشان داد که بهترین شرایط برای خشک کردن دانه کلزا، دمای ۵۲ درجه سانتی‌گراد، سرعت هوا ۴ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۲۲ درصد است.

واژه‌های کلیدی: کلزا، خشک کردن بستر سیال، روش پاسخ رویه

مقدمه

فرایندهای اعمال شده روی دانه کلزا دارای مشکلات خاصی است که عمده آنها در مرحله برداشت و پس از برداشت اتفاق می‌افتد. برای نگهداری محصول در انبار و جلوگیری از بروز کپک زدگی و رشد قارچ‌ها عملیات خشک کردن و هوادهی روی محصول برداشت شده انجام می‌گیرد. به منظور انبار کردن دانه‌های کلزا باید ابتدا آنها را تمیز کرد و وقتی رطوبت دانه‌ها به ۸ درصد رسید آنها را در یک انبار با تهویه مطلوب ذخیره کرد (Anonymous, 2001). در برخی نقاط کشور بالاخص استان‌های شمالی، بالا بودن رطوبت هوا در هنگام برداشت، انبارمانی این محصول را دچار مشکل می‌کند. جذب رطوبت مجدد از هوای مرطوب اطراف عاملی در افزایش احتمال بروز کپک و فساد کلزای برداشت شده در انبارهای استان‌های شمالی کشور می‌باشد. لذا کاهش رطوبت محصول به حدود مجاز برای نگهداری طولانی، از موارد بسیار مهم و مطلوب به خصوص در مناطق دارای رطوبت نسبی بالا می‌باشد. خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های محافظت از مواد غذایی است (Doymaz, 2007) و یکی از مهمترین و گرانترین فرایندها در فرایندهای پس از برداشت مواد غذایی محسوب می‌شود (Cohan and Yang, 1995).

هدف از خشک کردن کاهش آب به میزانی است که در آن فساد میکروبی و واکنش‌های مخرب به حداقل میزان خود برسند (Akpınar and Bicer, 2005). از آنجایی که خشک کردن مواد غذایی یک فرایند پرهزینه است، تعیین شرایط بهینه خشک کردن جهت صرفه جویی در مصرف انرژی و حفظ پارامترهای کیفی محصول بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

روش پاسخ رویه (RSM¹) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که برای بهینه‌سازی، توسعه و بهبود فرایندها به کار می‌رود. بیشترین کاربرد روش پاسخ رویه در شرایطی است که متغیرهای ورودی زیادی داشته باشیم که روی کارایی و یا کیفیت فرایند تأثیر گذار باشند.

در تحقیقی مقاومت به عبور هوا و دماهای مطلوب برای خشک کردن کلزا بررسی شد. نتایج نشان داد که دماهای مناسب برای خشک کردن کلزا با رطوبت اولیه ۱۲ تا ۱۶ درصد محدوده ۵۵ تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Sutherland and Ghaly, 1982).

در تحقیق دیگری چهار دانه روغنی گلرنگ، سویا، آفتابگردان و کلزا در خشک کن بستر سیال در معرض گرما قرار گرفتند تا دماهای مجاز برای خشک کردن این محصولات تعیین گردند. نتایج بدست آمده نشان داد که دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر معنی‌داری بر روی عدم امکان جوانه‌زنی محصولات ذکر شده ندارد (Ghaly and Sutherland, 1984).

پاتاک و همکاران تأثیر دمای خشک کردن (۲۵۰-۵۰ درجه سانتی‌گراد) را بر روی کیفیت و کمیت روغن استحصال کلزا مورد مطالعه قرار دادند. آنها بروز تغییر در میزان اسیدهای چرب آزاد، رنگ روغن و همچنین مقدار کل روغن را گزارش نمودند هر چند در رنگ و مقدار اسیدهای چرب آزاد تغییرات مشاهده شده در حد معنی‌داری نبودند (Pathak et al., 1991).

در زمینه مدلسازی و بهینه‌سازی فرایندهای صنایع غذایی با روش پاسخ رویه کارهای بسیاری صورت گرفته است. از جمله مادامبا و یابس (Madamba and Yabes, 2004) شرایط بهینه خشک کردن برنج خام را مورد بررسی قرار دادند. یک طرح سه سطحی سه فاکتوره فاکتوریل برای تحقیق مورد استفاده قرار گرفت و ترکیب بهینه دمای هوای خشک‌کن، سرعت هوا و زمان خیساندن اولیه را که منجر به بهبود پارامترهای کیفی دانه از قبیل شکستگی دانه، قوه جوانه زنی، سفیدی، سختی و... می‌شد مورد بررسی قرار دادند. دمای آزمایش بین ۳۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. سرعت هوا به وضوح روی سختی دانه تأثیر گذار بود و زمان خیساندن در سطح ۹۵ درصد روی زمان خشک کردن دانه‌ها تأثیر گذار بود. نهایتاً بهترین شرایط خشک کردن برنج خام، با استفاده از روش پاسخ رویه، دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد و زمان خیساندن ۲ ساعت تعیین گردید.

آسوتا (Asota, 1997) نیز کیفیت مکانیکی بذر سویا را تحت شرایط مختلف خشک کردن با استفاده از روش پاسخ رویه مورد بررسی قرار داد. وی سویا با رطوبت اولیه ۲۰٪ بر پایه خشک را در بستری با ضخامت ۵ سانتی متر در یک آون خشک کرد. دمای خشک‌کن ۴۸ و ۱۶۴ درجه سانتی‌گراد و زمان کل خشک کردن ۲۶ و ۹۴ ساعت بود. آنالیز پاسخ رویه نشان داد که دماهای خشک کردن زیر ۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های بالای ۸۰ ساعت منجر به تولید سویای مقاوم به شکستگی شد که میزان مقاومت آن ۲۷۵ نیوتن بود.

در این تحقیق بهینه‌سازی فرایند خشک کردن کلزا با استفاده از خشک‌کن بستر سیال، با روش پاسخ رویه انجام شد و به منظور ارزیابی صحت مدل‌های برازش شده با داده‌های آزمایشی خشک کردن، عمل خشک کردن در شرایط بهینه انجام و نتایج ارزیابی کمی و کیفی آن با مقادیر پیشگویی شده توسط مدل مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

آزمایشات خشک کردن: دانه کلزا (واریته RGS003) از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان در سال ۱۳۸۸ تهیه شد. برای متعادل کردن رطوبت، دانه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی کاملاً در بسته به مدت یک هفته در یخچال ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و قبل از انجام هر آزمایش نمونه‌ها برای تعادل با دمای محیط به مدت ۲ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری شدند. خشک‌کن مورد

استفاده برای خشک کردن دانه کلزا، یک خشک‌کن بستر سیال بود که در گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان طراحی و ساخته شده است. آزمایشات در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱، ۳ و ۴/۵ متر بر ثانیه و سه سطح رطوبت نسبی هوای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد انجام گردید. و در فواصل ۱۰ دقیقه‌ای تغییرات وزنی نمونه‌ها به وسیله ترازوی دیجیتال (Satorius، آلمان) با دقت ۰/۰۰۱ گرم ثبت گردید. محتوی رطوبت اولیه و نهایی نمونه‌ها با استفاده از روش تعیین رطوبت با آون اندازه‌گیری شد (AOAC, 1990). فرایند خشک کردن تا زمان ثابت شدن تقریبی وزن نمونه‌ها و رسیدن به رطوبت تعادلی ادامه داشت. پس از انجام آزمایشات خشک کردن، زمان کل خشک شدن تا رطوبت ۸ درصد تعیین شد.

پس از اتمام آزمایشات خشک کردن نمونه‌ها، عملیات استحصال روغن از تیمارهای آزمایش انجام و شاخص‌های کمی و کیفی روغن استحصالی از جمله میزان استخراج، درصد اسیدهای چرب آزاد (اسیدیتته) و رنگ روغن و همچنین در مورد مصارف بذری میزان قوه نامیه یا درصد جوانه زنی بذور خشک شده، طبق روش‌های زیر محاسبه شد.

اندازه‌گیری مقدار کل روغن نمونه‌ها: برای اندازه‌گیری و استحصال میزان استخراج روغن از نمونه‌های آزمایش طبق روش استاندارد (AOAC, 1990) Ba 3-38، ابتدا نمونه‌های خشک شده و شاهد به وسیله آسیاب خرد و بعد از آن از الک با مش ۲۰ عبور داده شد. استخراج روغن توسط حلال اتردوپترول با نقطه جوش ۶۵ درجه سانتی‌گراد در دستگاه سوکسله انجام و مقدار آن با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۱)} \quad \times 100 = \frac{\text{وزن بالن خالی} - \text{وزن بالن با روغن}}{\text{وزن اولیه نمونه}} = \text{میزان استخراج روغن}$$

اندازه‌گیری میزان اسیدهای چرب آزاد: برای تعیین اسیدیتته روغن استخراجی حاصل از تیمارهای مختلف آزمایش، از روش استاندارد (AOAC, 1990) Da14-48 استفاده شد. ابتدا ۵ گرم نمونه روغن از هر تیمار برداشته و به آن حدود ۵۰ میلی‌لیتر حلال خنثی شده الکل-کلروفورم به نسبت یک به یک افزوده شده و در مقابل فنل فتالین با محلول پتاس ۰/۱ نرمال تیترو سبب اندیس اسیدی بر حسب اسیداولئیک محاسبه شد.

اندازه‌گیری رنگ روغن استحصالی: برای اندازه‌گیری و سنجش رنگ روغن استحصالی از نمونه‌های آزمایش که اغلب مخلوطی از رنگ‌های قرمز و زرد است، از روش اسپکتروفتومتری استفاده شد. برای این منظور نمونه‌ها توسط تتراکلریدکربن ده مرتبه رقیق شد و جذب نوری روغن در طول موج‌های

۶۷۰، ۴۸۴، ۴۵۴ و ۴۳۰ نانومتر اندازه گیری و پس از آن با استفاده از رابطه (۲) رنگ بر حسب رنگ زرد لایویناند^۱ اندازه گیری شد (Parvaneh, 1992).

$$C = 1/29 A_{430} + 69/7A_{454} + 41/2 A_{484} - 56/4 A_{670} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن C غلظت نور و A میزان جذب نور در طول موج های ۴۳۰، ۴۵۴ و ۴۸۴ نانومتر بر اساس رنگ زرد ناشی از کاروتنوئیدها و در ۶۷۰ نانومتر در رابطه با رنگدانه هایی از قبیل کلروفیل می باشد. **آزمون جوانه زنی بذری:** آزمایش با استفاده از یک دستگاه جوانه زنی مجهز به کنترل دما، رطوبت نسبی و نور و با استفاده از کاغذ مخصوص بالاتر^۲ در سه تکرار انجام گردید. بدین صورت که ابتدا کاغذ بالاتر با ۱۰ میلی لیتر آب مقطر مرطوب شده و سپس تعداد ۱۰۰ عدد بذر روی کاغذ قرار داده شده و به دستگاه جوانه زنی که از قبل دمای آن در ۲۵ درجه سانتی گراد تنظیم گردیده بود انتقال یافت. سپس شمارش بذرهاى جوانه زده بعد از مدت ۷ روز نگهداری در دستگاه جوانه زنی انجام شد (Ghaly and Sutherland, 1984).

بهینه سازی شرایط آزمایش به کمک روش پاسخ رویه: به منظور بهینه سازی فرایند خشک کردن کلزا در شرایط آزمایش شده از روش آنالیز پاسخ رویه در قالب طرح قابل چرخش مرکب مرکزی^۳ با سه تکرار در نقطه مرکزی برای ۳ متغیر دما، سرعت و رطوبت نسبی هوا در ۳ سطح انجام شد. آنالیز پاسخ رویه با استفاده از نرم افزار Minitab 16 انجام شده و هر یک از متغیرهای تابع (زمان خشک کردن کلزا، میزان استخراج روغن، اسیدیته و رنگ روغن و همچنین قوه نامیه بذر کلزا) در قالب مدل رگرسیون درجه دوم زیر به صورت تابعی از متغیرهای مستقل فرایند خشک کردن شامل دما، سرعت و رطوبت نسبی هوای خشک کن (X_1, X_2, X_3) ارائه شدند:

$$Y_K = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_i x_j \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن Y نشان دهنده متغیر تابع یا پاسخ است. β_{kij} و β_{kii} ، β_{ki} ، β_{k0} ضرایب رگرسیونی و x_i ها متغیرهای غیر وابسته کد گذاری شده دما، رطوبت نسبی و سرعت هوا هستند. کل مدل شامل جملات خطی درجه دوم و حاصل ضربها می باشد:

- 1- LovibondTintometer
- 2- Blotter
- 3- Central Composite Design

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{21}x_2x_1 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{31}x_3x_1 + \beta_{32}x_3x_2 + \beta_{33}x_3^2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

برای نشان دادن رابطه هر یک از متغیرهای تابع در مدل رگرسیون با متغیرهای مستقل نمودارهای سطوح پاسخ و کانتور^۱ به وسیله نرم افزار Minitab رسم شدند. نقطه ای که تمام پارامترهای کیفی در آن بهینه می‌شوند توسط آنالیز پاسخ رویه و بر هم نهادن نمودارهای کانتور پارامترهای مختلف تحت شرایط آزمایش شده به دست آمد. به منظور ارزیابی صحت مدل‌های برازش شده با داده‌های آزمایشی خشک کردن، عمل خشک کردن در شرایط بهینه صورت گرفته و نتایج ارزیابی کمی و کیفی آن با مقادیر پیشگویی شده توسط مدل مقایسه گردید.

نتایج و بحث

مدل رگرسیون حاصل از برازش نتایج اندازه‌گیری شده زمان خشک کردن، میزان استخراج، اسیدیته و رنگ روغن و همچنین قوه نامیه بذر کلزا برای هر کدام از متغیرهای رابطه (۴) دارای ضرایبی می‌باشد که این ضرایب در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ضرایب برآورد شده مدل‌های رگرسیون فاکتورهای کیفی و زمان خشک کردن

ضریب	زمان خشک کردن	میزان استخراج روغن	اسیدیته روغن	رنگ روغن	قوه نامیه بذر
β_0	۲۳۴/۱۵۷**	۴۴/۶۴۷۷**	۰/۷۱۷۰۸۰**	۸۵/۶۱۹۰**	۸۸/۷۰۰۶**
β_1	-۳/۴۸۷**	-۰/۴۰۳۵**	-۰/۰۱۸۹۶**	-۰/۵۹۱۷**	۰/۰۹۴۴ ^{ns}
β_2	-۳۶/۴۹۴**	-۰/۰۷۵۷ ^{ns}	-۰/۰۳۴۲۱۹**	-۰/۴۷۲۲**	۲/۲۳۲۲**
β_3	۰/۷۹۵**	-۰/۰۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۳۸۷ ^{ns}	-۰/۰۳۰۲**	-۰/۰۳۲۲ ^{ns}
β_{11}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۴۵**	۰/۰۰۰۲۲۸**	۰/۰۰۶۵**	-۰/۰۰۵۱**
β_{21}	۰/۴۴۵**	-۰/۰۰۲۷ ^{ns}	-۰/۰۰۰۲۳۰**	-۰/۰۰۱۲ ^{ns}	-۰/۰۰۱۳ ^{ns}
β_{22}	۱/۲۹۸**	۰/۰۲۹۳ ^{ns}	۰/۰۰۶۰۸۵**	۰/۰۶۱۰**	-۰/۵۰۹۷**
β_{31}	-۰/۰۰۶*	. ^{ns}	-۰/۰۰۰۰۰۸*	۰/۰۰۰۳**	۰/۰۰۰۵ ^{ns}
β_{32}	-۰/۰۳۱ ^{ns}	-۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۱۹**	-۰/۰۰۲۸ ^{ns}
β_{33}	-۰/۰۰۱ ^{ns}	. ^{ns}	-۰/۰۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}

* معنی‌دار در سطح $P < 0/05$ ؛ ** معنی‌دار در سطح $P < 0/01$ ؛ ns : عدم وجود تفاوت معنی‌دار

1- Contour

نتایج آنالیز واریانس مدل‌های رگرسیونی زمان خشک کردن، میزان استخراج، اسیدیته و رنگ روغن و قوه نامیه بذر (جدول ۲) نشان داد که بجز برای میزان استخراج روغن که ضریب همبستگی کمی پایین‌تر بود (البته طبق منابع مدل‌های دارای ضریب همبستگی بالای ۸۰ کارایی مناسبی دارند)، مدل‌های دیگر با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۷، ۰/۹۵ و ۰/۹۷ برای زمان خشک کردن، درصد، اسیدیته، رنگ روغن و قوه نامیه بذر، همگی معنی‌دار بوده و با نتایج آزمایش‌ها به خوبی برازش شده‌اند. آنالیز واریانس مدل‌های رگرسیونی فرایند خشک کردن نشان دادند که در مدل‌های رگرسیونی مربوط به زمان خشک کردن، اسیدیته و رنگ روغن همگی عبارات مدل طبق سطوح ذکر شده در جدول معنی‌دار بودند در حالی که در مدل‌های مربوط به میزان استخراج روغن و قوه نامیه بذر، عبارات مربوط به حاصل‌ضربها طبق سطوح ذکر شده در جدول معنی‌دار نبودند. بنابراین برای پیشگویی مقادیر متغیرهای تابع در سطوح مختلف متغیرهای فرایند خشک کردن، می‌توان از مدل‌های رگرسیون مذکور استفاده نمود.

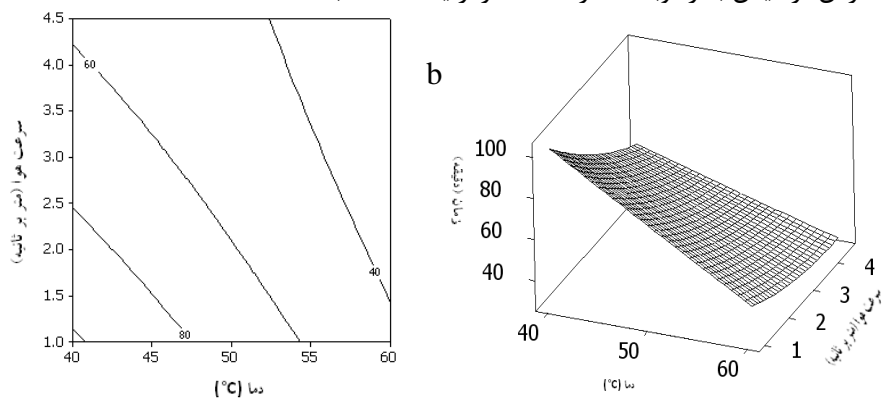
جدول ۲- آنالیز واریانس رگرسیون مدل‌های پیشگویی شده

مجموع مربعات					درجه آزادی	منابع تنوع
قوه نامیه بذر	رنگ روغن	اسیدیته روغن	میزان استخراج روغن	زمان خشک کردن		
۹۸۹/۹۸**	۳۶/۳۶۹۴**	۰/۰۸۳۱۷۱**	۱۱/۲۵**	۴۱۷۲۴/۱**	۹	رگرسیون
۹۴۲/۷۱**	۲۲/۹۶۷۹**	۰/۰۶۷۱۶۵**	۷/۴۳**	۳۹۱۶۲/۳**	۳	خطی
۴۶/۵۷**	۸/۱۲۱۱**	۰/۰۱۵۳۰۲**	۳/۷۳۲**	۲۷۵/۲**	۳	درجه دوم
۰/۷ ^{ns}	۰/۲۸۰۵**	۰/۰۰۰۷۰۴**	۰/۰۸۲ ^{ns}	۲۲۸۶/۵**	۳	حاصل ضربها
۴۳/۹ ^{ns}	۰/۷۳۳۶ ^{ns}	۰/۰۰۱۵۸۵ ^{ns}	۱/۹۹۹۴ ^{ns}	۸۴۵/۸ ^{ns}	۷۱	خطای باقیمانده
۱۷/۲۳ ^{ns}	۰/۷۳۳۶ ^{ns}	۰/۰۰۱۵۸۵ ^{ns}	۱/۹۷۳۱ ^{ns}	۶۷۰/۵ ^{ns}	۱۷	عدم برازش ^۱
۲۶/۶۷ ^{ns}	. ^{ns}	. ^{ns}	۰/۰۲۶۳ ^{ns}	۱۷۵/۳ ^{ns}	۵۴	خطای خالص
۹۵/۷۵	۹۷/۷۲	۹۸/۱۳	۸۴/۹۱	۹۸/۰۱	۸۰	ضریب همبستگی

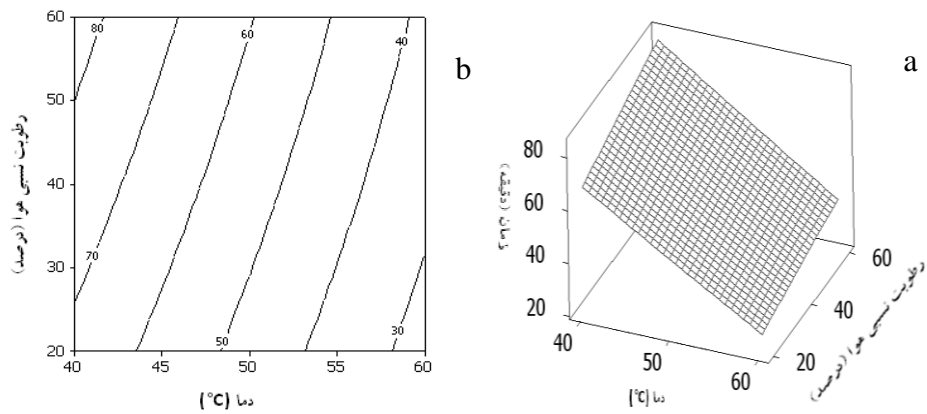
روند تغییرات زمان خشک کردن کلزا با متغیرهای دما، سرعت و رطوبت نسبی هوا در شکل‌های (۱) و (۲) و (۳) نشان داده شده است. مشاهده شد که با افزایش دما و سرعت هوا و کاهش رطوبت نسبی هوا، زمان خشک کردن کاهش می‌یابد. این امر بدین علت است که با افزایش دما قابلیت جذب رطوبت در هوا و همچنین انرژی جنبشی مولکول‌های هوا افزایش یافته و تبادل رطوبت دانه با هوای

1- Lack of fit

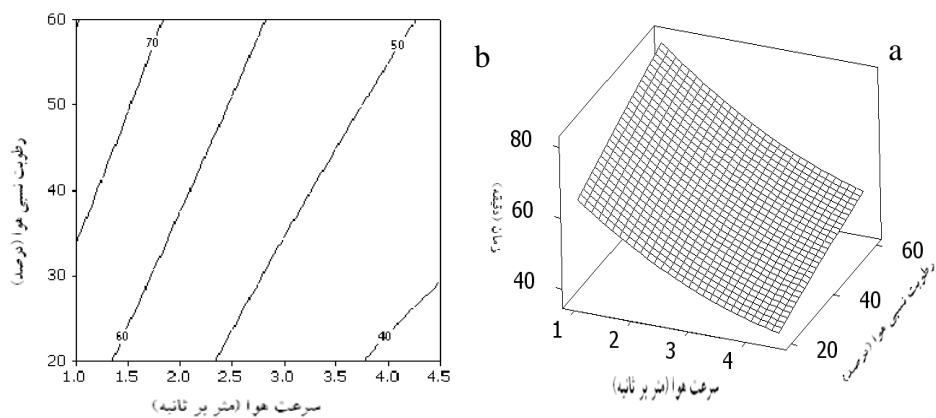
پیرامون بسیار مناسب انجام می‌گیرد. نتایج حاضر با تحقیقات انجام شده قبلی نیز همخوانی دارد (Babalıs and Belessiotıs, 2004). با افزایش سرعت هوانیز به علت تهویه بهتر در توده محصول انتقال رطوبت به هوای پیرامون بیشتر می‌شود و موجب کاهش زمان خشک شدن محصول می‌شود. سرعت خشک شدن در مراحل ابتدایی فرایند که رطوبت لایه‌های سطحی از ماده جدا می‌شود نسبت به حالت بستر ثابت سریع‌تر می‌باشد. با محدود شدن سرعت انتقال رطوبت از لایه‌های داخلی به سطح ماده در انتهای فرایند، روند خشک شدن کند شده و بین تغییرات محتوی رطوبت در سرعت‌های مختلف اختلاف چشمگیری مشاهده نمی‌شود. این امر بیانگر این است که سیال‌سازی محصول باعث افزایش سرعت خشک شدن آن می‌شود بنابراین کاربرد تکنیک سیال‌سازی محصول در دماهای محیط یا نزدیک به آن و با رطوبت نسبی پایین در کاهش مصرف انرژی حرارتی که در فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی بسیار با اهمیت بوده و نقش موثری دارد. بنابراین هنگامی که کاربرد دماهای بالا برای حفظ کیفیت محصول عملی نمی‌باشد و یا موجب اتلاف انرژی بسیار زیادی می‌شود می‌توان از روش سیال سازی در دماهای پایین‌تر استفاده نمود و محصول را با حداقل دمای مورد استفاده و صرف انرژی کمتر در زمان کوتاهی خشک کرد (Tasirin *et al.*, 2006). در مورد تأثیر رطوبت نسبی هوا نیز می‌توان اشاره کرد که با کاهش رطوبت نسبی هوا، پتانسیل هوا برای جذب رطوبت افزایش می‌یابد و در نتیجه با سریع‌تر جذب کردن رطوبت از دانه‌ها، زمان خشک کردن کاهش می‌یابد (Tado *et al.*, 2002). در دماهای بالای ۵۴ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ورودی به خشک‌کن بالای ۴ متر بر ثانیه زمان خشک کردن (رسیدن به رطوبت ۸ درصد) کمتر از یک ساعت به دست آمد.



شکل ۱- نمودار سطحی (a) و کانتور (b) پاسخ رویه تأثیر دما و سرعت هوای خشک‌کن روی زمان خشک کردن.



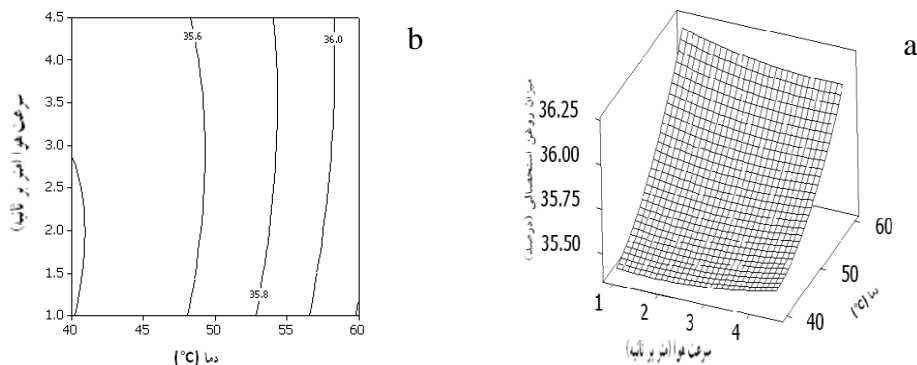
شکل ۲- نمودار سطحی (a) و کانتور (b) پاسخ رویه تأثیر دما و رطوبت نسبی هوای خشک‌کن روی زمان خشک کردن.



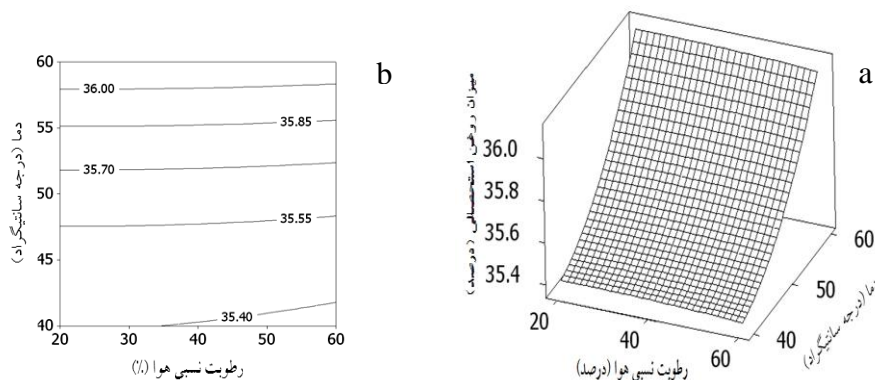
شکل ۳- نمودار سطحی (a) و کانتور (b) پاسخ رویه تأثیر سرعت و رطوبت نسبی هوای خشک‌کن روی زمان خشک کردن.

در شکل‌های (۴) و (۵) علت بالا بودن میزان استخراج روغن در دماهای بالاتر را می‌توان این موضوع فرض کرد که با افزایش دمای خشک‌کن و ایجاد تنش‌های حرارتی و چروک سطحی و کاهش چسبندگی پوسته به مغز دانه و همچنین امکان سریع‌تر جدا شدن پوسته از دانه، میزان استخراج روغن

بالا تر رفت. سرعت و رطوبت نسبی هوائ تأثیری بر میزان استخراج روغن نداشت. در دماهای بالاتر از ۵۶ درجه سانتی‌گراد در تمامی سرعت‌های هوا میزان استخراج روغن از کلزا بالاتر از ۳۶ درصد بود.



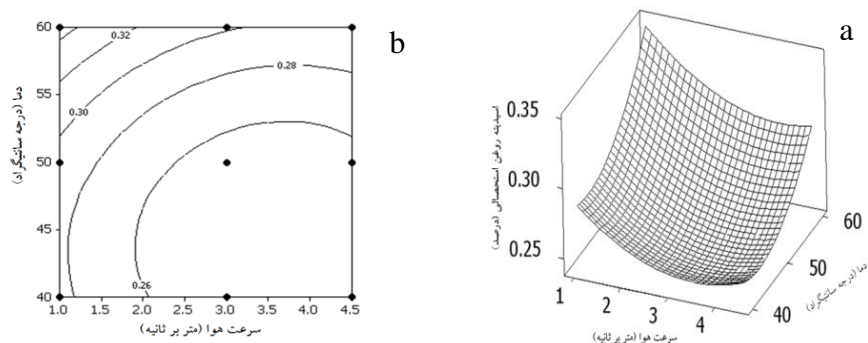
شکل ۴- نمودار سطحی (a) و کانتور (b) پاسخ رویه تأثیر سرعت و رطوبت نسبی هوای خشک‌کن روی میزان استخراج روغن.



شکل ۵- نمودار سطحی (a) و کانتور (b) پاسخ رویه تأثیر دما و رطوبت نسبی هوای خشک‌کن روی میزان استخراج روغن.

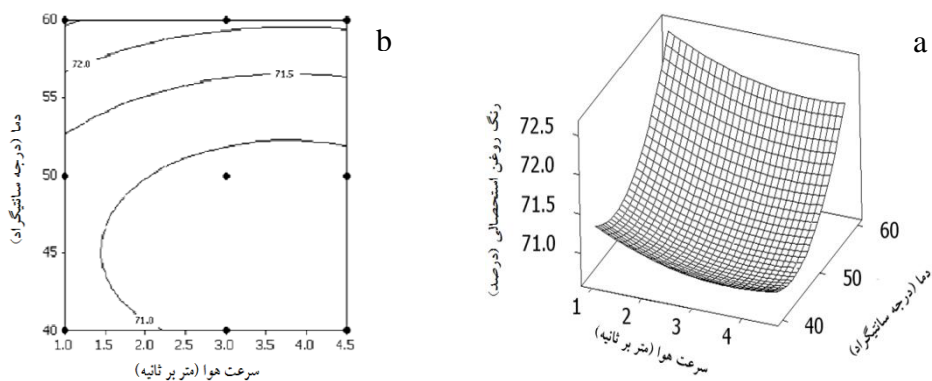
با توجه به نتایج آزمایشات اثر دما و سرعت روی تغییرات اسیدیته روغن استحصالی در سطح یک درصد معنی‌دار بود و با افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد و تغییر حالت به بستر ثابت یعنی کاهش سرعت هوا این مقدار افزایش یافت. علت افزایش اسیدیته در دمای بالا نتیجه اثرات تخریب حرارتی روی محصول است. علت کاهش اسیدیته در حالت بستر سیال نسبت به حالت بستر ثابت را می‌توان کمتر در معرض قرار گرفتن نمونه‌ها در مجاورت هوای گرم، به علت کوتاه شدن زمان

فرایند در حالت بستر سیال دانست. رطوبت نسبی تأثیری بر اسیدپتِه روغن استحصالی نداشت. نتایج نشان داد دماهای پایین‌تر از ۵۲ درجه و سرعت هوای بالای ۲ متر بر ثانیه منجر به اسیدپتِه کمتر از ۰/۲۶ می‌گردد.



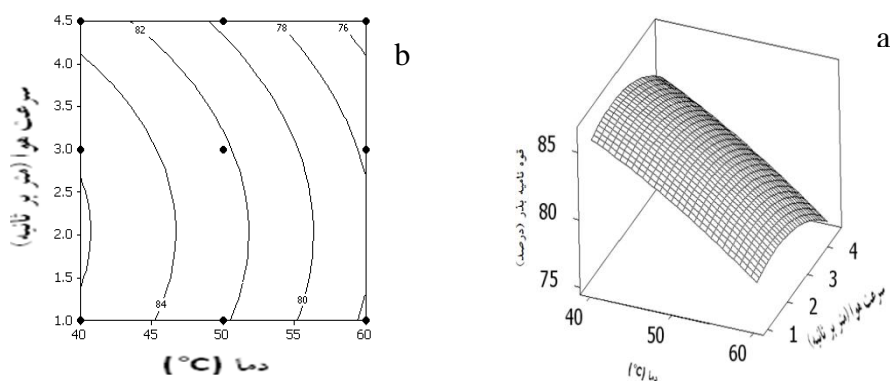
شکل ۶- نمودار سطحی (a) و کانتور (b) پاسخ رویه تأثیر دما و سرعت هوای خشک‌کن روی اسیدپتِه روغن استحصالی.

نتایج نشان داد با افزایش دما و تغییر حالت به بستر ثابت یعنی کاهش سرعت هوا این مقدار کاهش یافت ولی افزایش سرعت هوا بیشتر از ۳ متر بر ثانیه تأثیری روی رنگ روغن استحصالی نداشت. رطوبت نسبی تأثیری بر رنگ روغن استحصالی نداشت و در محدوده دمایی پایین‌تر از ۵۲ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای بالاتر از ۲/۲ متر بر ثانیه رنگ روغن کلزای حاصله کمتر از ۷۱ واحد لایباند بود.



شکل ۷- نمودار سطحی (a) و کانتور (b) پاسخ رویه تأثیر دما و سرعت هوای خشک‌کن روی رنگ روغن استحصالی.

با توجه به روند تغییرات قوه نامیه دانه‌های کلزا با متغیرهای دما، سرعت و رطوبت نسبی هوا ملاحظه شد که با افزایش دما و تغییر حالت به بستر ثابت یعنی کاهش سرعت هوا این مقدار کاهش یافت. علت این امر ضربه‌های وارده به بذر در شرایط سرعت بالای خشک‌کن می‌باشد. رطوبت نسبی تأثیری بر قوه نامیه بذر کلزا تأثیری ندارد. قوه نامیه بالاتر از ۸۴ درصد در دماهای زیر ۴۵ درجه و سرعت هوای کمتر از ۴/۱ متر بر ثانیه به دست آمد.



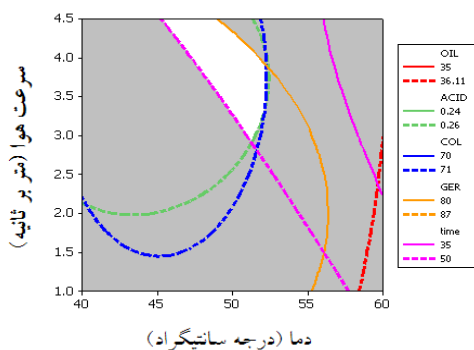
شکل ۸- نمودار سطحی (a) و کانتور (b) پاسخ رویه تأثیر دما و سرعت هوای خشک‌کن روی قوه نامیه دانه‌های کلزا.

تعیین نقطه بهینه در فرایند خشک کردن: هر یک از مدل‌های رگرسیونی به دست آمده از روش پاسخ رویه دارای نقاط بهینه خاص می‌باشند. تعیین نقطه بهینه برای شرایط آزمایش به کمک نرم‌افزار Minitab و با استفاده از ابزار بهینه‌سازی انجام شد. نتایج نشان داد که برای به دست آوردن بیشترین میزان روغن و قوه نامیه و کمترین زمان خشک کردن، اسیدیته و رنگ، دمای آزمایش باید ۵۲ درجه سانتی‌گراد، سرعت هوا ۴ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۲۲ درصد باشد. آزمایشات در سطوح یاد شده انجام شد و نتایج آن با نتایج مربوط به مدل در جدول (۳) مقایسه شد. مشاهده شد که مدل پاسخ رویه به خوبی قادر به پیشگویی و بهینه‌سازی شرایط آزمایش می‌باشد.

جدول ۳- مقایسه مقادیر پیشگویی شده و آزمایشی در نقطه بهینه

مقدار بدست آمده توسط آزمایش واقعی	مقدار پیشگویی شده توسط مدل بهینه‌سازی شده	پارامتر
۳۵/۹۳	۳۵/۷۱۱	میزان استخراج روغن (درصد)
۰/۲۴۹	۰/۲۵۹۷	اسیدیته (درصد)
۷۰/۸۷	۷۱	رنگ روغن (لاویباند)
۳۹/۴۵	۳۶/۶	زمان خشک کردن (دقیقه)
۸۲	۸۰	قوه نامیه بذر (درصد)

از روی هم گذاشتن نمودارهای کانتور (شکل ۹) نیز می‌توان محدوده بهینه را برای خشک کردن کلزا مشاهده کرد. منطقه سفید در شکل (۹) نشانگر محدوده بهینه از نظر سرعت و رطوبت نسبی هوا است. از آنجا که رطوبت نسبی هوا در اکثر فاکتورهای تأثیر بود محدوده آن در سطح میانی انتخاب شد.



شکل ۹- انطباق نمودارهای کانتور برای یافتن محدوده بهینه

نتیجه‌گیری کلی

آزمایشات خشک کردن کلزا در خشک‌کن بستر سیال در تیمارهای مختلف انجام شد و پارامترهای کمی و کیفی مربوط به روغن و بذر کلزا برای هر یک از تیمارها انجام شده و نتایج با استفاده از روش پاسخ رویه تجزیه و تحلیل شد. مدل رگرسیون حاصل از برازش نتایج اندازه‌گیری شده زمان خشک کردن، میزان استخراج، اسیدیته و رنگ روغن و همچنین قوه نامیه بذر کلزا برای هر کدام از متغیرها به کمک روش پاسخ رویه به دست آمد. نتایج آنالیز واریانس مدل‌های رگرسیونی زمان خشک کردن، میزان استخراج، اسیدیته و رنگ روغن و همچنین قوه نامیه بذر نشان داد که بجز برای میزان استخراج روغن که ضریب همبستگی کمی پایین‌تر بود، مدل‌های دیگر با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰.۹۸، ۰.۸۴/۹۱، ۰.۹۸/۱۳، ۰.۹۷/۷۲ و ۰.۹۵/۷۵ برای زمان خشک کردن، میزان استخراج، اسیدیته و رنگ روغن و همچنین قوه نامیه بذر، همگی معنی‌دار بوده و با نتایج

آزمایش‌ها به خوبی برآزش شدند. بنابراین برای پیشگویی مقادیر متغیرهای تابع در سطوح مختلف متغیرهای فرایند خشک کردن، می‌توان از مدل‌های رگرسیون مذکور استفاده نمود. نتایج نشان داد که برای به‌دست آوردن بیشترین میزان روغن و قوه نامیه و کمترین زمان خشک کردن، اسیدیته و رنگ، دمای آزمایش باید ۵۲ درجه سانتی‌گراد، سرعت هوا ۴ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۲۲ درصد باشد. آزمایشات در سطوح یاد شده انجام شد و نتایج آن با نتایج مربوط به مدل مقایسه شد. مشاهده شد که مدل پاسخ رویه به خوبی قادر به پیشگویی و بهینه‌سازی شرایط آزمایش می‌باشد. بنابراین استفاده از این روش برای بهینه‌سازی فرایند خشک کردن کلزا توصیه می‌شود.

منابع

- Akpinar, E.K., and Bicer, Y. 2005. Modeling of the drying of eggplants in thin layer. *International Journal of Food Science and Technology*. 40: 273–281.
- Anonymous. 2001. Conditioning of canola. Canola Council of Canada. <http://www.canolacouncil.org/storage.html>.
- AOAC. 1990. Official method of analysis. Association of official analytical Chemists (No. 934.06). Arlington, VA.
- AOCS, 1998. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society. American Oil Chemists' Society, Champaign, IL.
- Asota, C.N. 1997. Mechanical Seed Quality of Soyabeans Related to Drying Parameters. *Journal of Food Engineering*. 31: 387-394.
- Babalıs, S.J., and Belessiotıs, V.G. 2004. Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*. 65: 449–458.
- Cohan, J.S., and Yang T.C.S. 1995. Progress in food dehydration. *Trends in Food Science and Technology*. 6: 20–25.
- Doymaz, I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. 78: 1291–1297.
- Ghaly, T.F., and Sutherland, J.W. 1984. Heat damage to grain and seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 30(4): 337-345.
- Madamba, P.S., and Yabes, R.P. 2004. Determination of the optimum intermittent drying conditions for rough rice (*Oryza sativa* L.). *Lebensm.-Wiss. u.-Technology*, 38:157–165.
- Parvaneh, V. 1992. Quality Control and Chemical Experiments for Food. Tehran University Press. Tehran.
- Tadao, I., Ken-ichi, I., and Takeshi, F. 2002. Effect of Temperature and Relative Humidity on Drying Kinetics of Fresh Japanese Noodle (Udon). *Lebensm. Wiss. U.-Technology*. 35: 649–655.
- Pathak, P.K., Agrawal, Y.C. and Singh, B.N.P. 1991. Effect of elevated drying temperature on rapeseed oil quality. *JAOCS*. 68:580-582.
- Sutherland J.W., and Ghaly T.F. 1982. Heated air drying of oil seeds. *Journal of Stored Products Research*. 18(2): 43-54.
- Tasirin, S.M. Kamarudin, S.K., Jaafar, K., and Lee, K.F. 2006. The drying kinetics of bird's chillies in a fluidized bed dryer. *Journal of Food Engineering*. 79: 695–705.