

بررسی تاثیر عوامل مختلف بر میزان چروکیدگی ورقه‌های نازک موز طی فرایند خشک کردن با استفاده از روش سطح پاسخ

محمدعلی ابراهیمی^۱، سید سعید محتسبی^{۲*}، شاهین رفیعی^۳، امین نصیری^۴، سلیمان حسین پور^۵

۱- دانشجوی دکترای مکانیک ماشین‌های کشاورزی و دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری دانشگاه تهران

*۲- نویسنده مسؤول: استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران (mohtaseb@ut.ac.ir)

۳، ۴ و ۵- به ترتیب استاد، دانشجوی دکترا و دانش‌آموخته دکترای گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۷/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۲۰

چکیده

تحقیق پیش رو با هدف بررسی تاثیر عوامل مختلف بر میزان چروکیدگی ورقه‌های نازک موز طی فرایند خشک کردن با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شده است. در این تحقیق ورقه‌های نازک موز با استفاده از یک خشک‌کن آزمایشگاهی ساخته شده بر مبنای سامانه ماشین بینایی خشک شده و میزان چروک شدگی نمونه‌ها با استفاده از روش پردازش تصویر در نرم افزار متلب، طی فرایند خشک شدن، محاسبه شد. برای بررسی تأثیر زمان خشک کردن بر چروک شدگی، ضخامت نمونه، درجه حرارت و سرعت جریان هوا در فرایند خشک کردن به عنوان متغیرهای فرآیند و چروک شدگی به عنوان پاسخ فرآیند در نظر گرفته شد. در این تحقیق برای بررسی ارتباط بین پاسخ به دست آمده و متغیرهای فرآیند و بهینه‌سازی ترکیب متغیرها از روش سطح پاسخ، طرح مرکب مرکزی (CCD) با چهار متغیر، استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل مرتبه دوم به علت داشتن RMSE پایین (۰/۰۳۳) و میزان ضریب تعیین مناسب (۰/۹۵۱)، برای توصیف داده‌ها مناسب است. همچنین بررسی تاثیر عوامل مختلف نشان داد، زمان خشک شدن، دما، ضخامت نمونه و سرعت هوا به ترتیب بیشترین تاثیر را بر روی میزان چروک شدگی ورقه‌های نازک موز داشتند.

کلید واژه: پردازش تصویر، چروک شدگی، روش سطح پاسخ، طرح مرکب مرکزی، MATLAB

مقدمه

می‌رود؛ اما کیفیت نهایی محصول تولید شده به عنوان یکی از شاخص‌های بسیار مهم در فرآیند خشک کردن باید مورد توجه قرارگیرد. تعیین و کنترل شاخص‌های کیفی و کمی محصول از جمله شکل، رنگ، مزه، طعم و بافت می‌تواند در نگهداری و بازاریابی محصول نهایی بسیار موثر باشد. در طی فرایند خشک شدن، شبکه‌های ویسکوالاستیک موجود در داخل ماده، به درون فضاهای خالی ایجاد شده بر اثر تبخیر آب کشیده می‌شوند. در نهایت این فرایند موجب انقباض و چروک

خشک کردن یک فرآیند پیچیده ترمودینامیکی و بیوشیمیایی می‌باشد که شامل انتقال جرم و حرارت از سطح مواد و سیستم احاطه شده به طور هم‌زمان و انتقال گرما و رطوبت از درون مواد است. انتقال رطوبت از لایه‌های داخلی مواد به سطح آن‌ها وابسته به ساختمان و خصوصیات مواد می‌باشد.

اگر چه خشک کردن یکی از پرکاربردترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی و مواد غذایی به شمار

همچنین دریافته‌اند که میزان تغییرات سطح و محیط نسبت به حالت اولیه، رابطه خطی با نسبت محتوای رطوبتی محصول دارد. در این مطالعه نیز اثر سرعت هوای خشک کردن بر روی میزان چروکیدگی ناچیز گزارش شد.

یکی از مفاهیم طراحی آزمایش‌ها روش سطح پاسخ می‌باشد. این روش مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که جهت توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندهایی به کار می‌رود که در آن‌ها سطح مورد نظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار داشته و هدف بهینه کردن پاسخ مزبور است (کارگذاری، ۱۳۸۶؛ سجادی، ۱۳۸۵).

روش سطح پاسخ و تکنیک‌های هوش مصنوعی (همانند منطق فازی، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک) مدل‌های مبتنی بر تجربه هستند که به طور گسترده در مدل کردن فرآیندهای غذایی با توجه به پیچیدگی واکنش‌ها و ساختار ناهمگون محصولات غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها راه حل‌های جدیدی به منظور پیشرفت ابزار کنترل و مدل‌سازی در فرآیندهای غذایی ارائه می‌دهند. کارایی روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی فرآیندها در تکنولوژی مواد غذایی از مواد غذایی خام تا محصولات نهایی در منابع ثبت گردیده است (کارگذاری، ۱۳۸۶).

امروزه محققان زیادی از روش یاد شده برای تعیین متغیرهای موثر و انتخاب شرایط بهینه جهت انجام آزمایش استفاده کرده‌اند. از جمله:

امیری و همکاران (۱۳۸۹) از روش سطح پاسخ برای تعیین عوامل موثر در گشتاور چرخشی کاسه چرخ خودرو استفاده کردند. این محققان از مدل مرتبه دوم به علت داشتن خطای پایین و میزان ضریب تعیین مناسب برای توصیف داده‌ها استفاده کردند. در نهایت میزان متغیر خروجی به دست آمده از یک آزمایش عملی اختلاف ناچیز ۵ درصدی با مقدار پیش بینی شده داشت.

آذری کیا و عباسی (۱۳۸۷) برای تعیین شرایط بهینه استخراج پلی ساکاریدهای محلول از آکارا از روش شناسی سطح پاسخ استفاده کردند. در این تحقیق دما و نسبت آب به آکارا به عنوان متغیرهای مستقل برای پیش بینی مواد جامد کل

شدگی محصول می‌شود (آگیلرا^۱، ۲۰۰۳). چروکیدگی در واقع شاخصی است که به بررسی تغییرات حجمی مواد در اثر کاهش محتوای رطوبتی می‌پردازد (حاتمی پور و مولا^۲، ۲۰۰۲).

یان و همکاران^۳ (۲۰۰۸) میزان چروکیدگی و تخلخل^۴ را برای میوه‌های، موز، آناناس و انبه محاسبه کردند. آن‌ها برای اندازه‌گیری حجم واقعی^۵ محصول از روش پیکنومتری^۶ گازی استفاده کردند و برای اندازه‌گیری حجم ظاهری^۷ محصول طی فرآیند خشک شدن روش‌های پیکنومتری مایع، پیکنومتری گاز و اصل ارشمیدس را آزمایش کردند و در نهایت برای هدف خود اصل ارشمیدس با حلال ارگانیک (ان هپتان)^۸ را انتخاب کردند. نتایج نشان داد که با کاهش محتوای رطوبتی محصول میزان تخلخل افزایش می‌یابد. آن‌ها در تحقیق خود به یک رابطه درجه دوم بین چروکیدگی و نسبت محتوای رطوبتی محصول دست یافتند که مغایر با نتایج دیگر محققان بود. همچنین آن‌ها نتایج خود را با تکنیک پردازش تصویر مقایسه کردند. نتایج حاصل از این مقایسه نشان داد که داده‌های پردازش تصویر^۹، یافته‌های آن‌ها را تایید می‌کند.

یداللهی‌نیا و جهانگیری^{۱۰} (۲۰۰۹) از سامانه ماشین بینایی^{۱۱} و تکنیک پردازش تصویر برای بررسی چروکیدگی لایه‌های سیب زمینی طی فرآیند خشک شدن استفاده کردند. آن‌ها در سامانه خود تنها تصویر سطح محصول را دریافت می‌کردند. بنابراین مبنای چروکیدگی را تغییرات سطح، محیط، میزان کشیدگی^{۱۲} و میزان گردی^{۱۳} نمونه‌ها قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که با کاهش محتوای رطوبتی محصول میزان کشیدگی آن افزایش و میزان گردی کاهش می‌یابد. آن‌ها

- 1- Aguilera
- 2- Hatamipour and Mowla
- 3- Yan *et al.*
- 4- Porosity
- 5- True volume
- 6- Pycnometry
- 7- Apparent volume
- 8- n-heptane
- 9- Image Processing
- 10- Yadollahinia and Jahangiri
- 11- Machine Vision
- 12- Elongation
- 13- Roundness

و مولا (۲۰۰۲). بدین جهت دو دوربین برای تصویر برداری از نمونه‌های در حال خشک شدن، مورد استفاده قرار گرفت. یکی از دوربین‌ها در قسمت بالای محصول، جهت ثبت تغییرات سطح، و دوربین دیگر در قسمت جانبی نمونه‌ها، برای اندازه‌گیری تغییرات ضخامت، نصب شد. برای پردازش تصاویر دریافتی برنامه‌ای در محیط نرم افزار متلب^۳ ایجاد شد.

برای انجام این تحقیق از یک خشک‌کن لایه‌نازک ساخته شده بر مبنای سامانه ماشین بینایی استفاده گردید. این خشک‌کن با هدف اندازه‌گیری تاثیر خشک کردن بر روی خصوصیات ظاهری محصولات و نیز بررسی رابطه بین این خواص و محتوای رطوبتی، در گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران در سال ۱۳۸۹ ساخته شد. این خشک‌کن شامل یک فن گریز از مرکز (Damandeh, BEF-25/25F4T, 6300 m³/hr)، یک هواکش، چهار المنت گرمکن الکتریکی (یک المنت ۷۵۰ واتی در کنار فن گریز از مرکز برای پیش گرم کردن و سه المنت ۲۰۰۰ واتی در کنار هواکش برای گرم کردن جریان هوای ورودی)، مستقیم کننده‌ای جریان هوا، واحد کنترل، محفظه نورپردازی و تصویربرداری، یک لودسل تک نقطه‌ای، حسگرهای اندازه‌گیری، دما، رطوبت نسبی هوا و سرعت هوا، محفظه خشک‌کن و سینی محصولات می‌باشد. تمام قسمت‌های خشک‌کن به وسیله عایق پشم شیشه پوشانده شده است (شکل ۱). روش سطح پاسخ از گروهی از تکنیک‌های آماری و ریاضی تشکیل شده است که می‌توان با استفاده از آن‌ها روابط موجود بین پاسخ و متغیرهای مستقل را مشخص کرد.

روش سطح پاسخ تأثیر متغیرهای مستقل را به تنهایی یا با هم بر روی فرآیندها تعریف می‌کند، علاوه بر این به منظور تجزیه و تحلیل تأثیر متغیرهای مستقل این روش شناسی، یک مدل ریاضی در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد. نمای گرافیکی مدل به دست آمده موجب کاربرد اصطلاح روش سطح پاسخ گردیده است. رابطه بین ورودی و پاسخ به صورت رابطه (۱) است:

عصاره استخراج شده در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل مرتبه دوم با ضریب تعیین ۰/۹۷۹۵۷ به خوبی توانسته است، ارتباط بین متغیرهای استخراج (دما و نسبت آب به اکارا) و مواد جامد استخراج شده را نشان دهد. گودرزی (۱۳۸۷) برای بهینه سازی مصرف سولفیت در تولید برگه زرد آلو، عباسی و فرزانه مهر (۱۳۸۸) برای بهینه سازی شرایط استخراج اینولین از کنگر با و بدون اعمال فراصوت، میلانی و همکاران (۱۳۸۹) جهت بهینه سازی استخراج اینولین از غده‌ی سیب زمینی ترشی، از روش شناسی سطح پاسخ استفاده کردند.

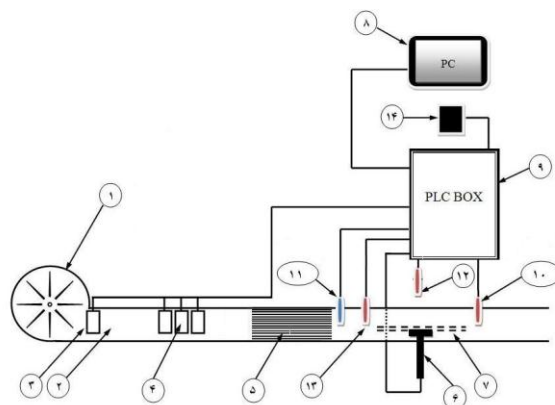
بنابراین هدف اصلی این تحقیق بررسی تاثیر عوامل مختلف از جمله، زمان، دمای خشک کردن، سرعت هوا و ضخامت نمونه‌ها بر روی میزان چروک شدگی ورقه‌های نازک موز در خشک کردن به روش لایه نازک با استفاده از روش شناسی سطح پاسخ^۱ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موزهای رقم کاوندیشن^۲ بعد از خریداری به آزمایشگاه تحقیق و توسعه گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران انتقال یافت. میزان رطوبت اولیه محصول با استفاده از یک دستگاه آون برابر 75 ± 0.5 درصد بر پایه تر محاسبه شد. برای انجام آزمایش، پوست نمونه موز مورد آزمایش جدا شده و قسمت مغذی آن توسط یک دستگاه برش (کالباس خرد کن) به ضخامت‌های تعیین شده برش داده شد. تکه‌های بریده شده بر روی یک سینی سیاه رنگ به ابعاد 20×15 سانتیمتر قرار گرفتند. سپس سینی درون دستگاه خشک‌کن، در یک شرایط تنظیم شده (از لحاظ دما، سرعت هوا) قرار گرفت و آزمایش تا رسیدن رطوبت نمونه‌ها به یک مقدار تعادلی ادامه یافت. برای خارج کردن رطوبت باقی مانده درون محصول و محاسبه‌ی درصد ماده خشک، نمونه‌ها پس از خارج شدن از دستگاه خشک‌کن وزن شده و درون دستگاه آون قرار گرفتند.

در این تحقیق برای محاسبه تغییرات شکل محصول، از روش پردازش تصویر استفاده و میزان چروک شدگی برابر نسبت تغییرات حجم به حجم اولیه در نظر گرفته شد حاتمی‌پور

1- Response Surface Methodology
2- Kavendishion



شکل ۱- شماتیک خشک کن مورد استفاده؛ ۱: فن گریز از مرکز؛ ۲: محفظه پخش؛ ۳: المنت پیش گرم کننده؛ ۴: المنت های گرم کننده جریان هوا؛ ۵: لوله های مستقیم کننده؛ ۶: لودسل؛ ۷: سینی محصول؛ ۸: کامپیوتر؛ ۹: محفظه کنترل کننده PLC؛ ۱۰: حسگر دما؛ ۱۱: باد سنج؛ ۱۲: حسگر اندازه گیری دمای محیط؛ ۱۳: حسگر رطوبت نسبی؛ ۱۴: صفحه کنترلی

با توجه به این که پارامترهای دارای واحدها و محدوده های متفاوت، در حوزه آنالیز رگرسیونی نباید مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین باید پیش از اجرای طرح رگرسیونی، پارامترها را نرمال کرد، به عبارت دیگر هر یک از متغیرها بین ۱- و ۱ تغییر کنند، در نتیجه همگی آن ها پاسخ را به شکل همگن تری تحت تأثیر قرار می دهند. بنابراین متغیرهای مذکور مطابق معادله (۲) کدگذاری می شوند (عباسی و فرزانه مهر، ۱۳۸۶).

$$x_i = \frac{X_i - Y_i}{dX_i} \quad (2)$$

در رابطه فوق مقدار X_i ، مقدار بدون بعد متغیر مستقل فرایند، X_i مقدار واقعی متغیر مستقل فرایند Y_i ، مقدار واقعی متغیر مستقل فرایند در نقطه مرکزی و dX_i تغییر پله ای است. کدهای مشخص شده عبارتند از معادلات (۳)، (۴)، (۵) و (۶):

$$t = \frac{\text{زمان} - 69}{69} \quad (3)$$

$$T = \frac{\text{دما} - 70}{20} \quad (4)$$

$$V = \frac{\text{سرعت} - 1}{0.5} \quad (5)$$

$$d = \frac{\text{ضخامت} - 5}{2} \quad (6)$$

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (1)$$

که در رابطه فوق η متغیر وابسته (پاسخ)، X_1 تا X_n متغیرهای مستقل، f تابعی نامعلوم از پاسخ می باشد، چند جمله ای ها و توابع شعاع مبنا از جمله مدل هایی هستند که در روش سطح پاسخ مورد استفاده قرار می گیرند. از آن جا که در عمل تخمین همراه با خطاست پارامتر ε نیز در کنار تابع نشان داده می شود (سجادی، ۱۳۸۵؛ کارگذاری، ۱۳۸۶).

برای بررسی تأثیر زمان خشک کردن، ضخامت نمونه، درجه حرارت و سرعت جریان هوا در فرآیند خشک کردن به عنوان متغیرهای فرآیند بر چروکیدگی به عنوان پاسخ فرآیند، از روش سطح پاسخ، طرح مرکب مرکزی^۱ با چهار متغیر برای بررسی ارتباط بین پاسخ به دست آمده و متغیرهای فرآیند و بهینه سازی ترکیب متغیرها استفاده شد. مقادیر عددی متغیرهای مستقل شامل: t (زمان خشک کردن) در سه سطح ۰، ۶۹ و ۱۳۸ دقیقه، d ضخامت نمونه ها در سه سطح ۳، ۵ و ۷ میلیمتر، T (دما) در سه سطح ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه سلسیوس و V (سرعت جریان هوا) در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه در جدول (۱) نشان داده شده است.

تعداد نمونه های مورد آزمایش ۳۰ مورد بود که شش مورد آن نقاط مرکزی بودند. از تکرار به کار رفته در نقاط مرکزی برای برآورد خطای آزمایش استفاده شد.

جدول ۱- نمایش متغیرهای مستقل فرایند و مقادیر آن‌ها در روش سطح پاسخ

۱۳۸	۶۹	۰	زمان خشک کردن (min)
۷	۵	۳	ضخامت نمونه‌ها (mm)
۹۰	۷۰	۵۰	دما (°C)
۱/۵	۱	۰/۵	سرعت جریان هوا (m/s)

و پاسخ فرآیند را توضیح می‌دهد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس ضرایب رگرسیون مدل سطح پاسخ (معادله ۱۰) و میزان ضرایب در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به مقدار عدد P می‌توان نتیجه گرفت متغیرهای دما و زمان خشک کردن و درجه دوم متغیرهای زمان، سرعت و ضخامت نمونه تاثیر معنی‌داری بر میزان چروک شدن شادگی دارند. همچنین با توجه به جدول (۱) زمان خشک کردن بیش‌ترین تاثیر معنی‌دار را بر میزان چروک شدن شادگی دارند. مقادیر عددی متغیرهای مستقل به همراه نتایج مشاهده شده و نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل سطح پاسخ (معادله ۱۰) برای پیش‌بینی میزان چروک شدن شادگی در جدول (۴) نشان داده شده است. در شکل‌های (۳ تا ۸) تأثیر متقابل متغیرهای مستقل بر میزان چروک شدن شادگی توسط نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها با ثابت نگه داشتن سه متغیر مستقل و تغییر متغیر چهارم این نتایج حاصل شد:

۱- افزایش زمان خشک کردن در تمام شرایط آزمایش میزان حجم محصول به دلیل خروج محتوای رطوبتی و ایجاد تنش‌های ویسکوالاستیکی در منافذ، کاهش و در نتیجه چروک شدن شادگی افزایش یافت (شکل ۳، ۴ و ۵). نتایج نشان داد در تمام شرایط آزمایش بیش‌ترین تغییر در میزان چروک شدن شادگی در زمان‌های اولیه خشک کردن اتفاق افتاده و با گذشت زمان میزان تغییرات کاهش یافته است؛ زیرا در ابتدای آزمایش این رطوبت سطحی است که تبخیر می‌شود. ولی با گذشت زمان تبخیر رطوبت سطحی پایان یافته و رطوبت درونی محصول به سطح منتقل شده و تبخیر می‌شود که نسبت به حالت اول با سرعت کمتری انجام می‌شود (حاتمی پور و مولا، ۲۰۰۲؛ یداللهی نیا و جهانگیری، ۲۰۰۹).

پس از انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها به منظور جستجوی هرگونه ارتباط ریاضی بین زمان خشک کردن، ضخامت نمونه، درجه حرارت و سرعت جریان هوا به عنوان متغیرهای مستقل و چروک شدن شادگی به عنوان پاسخ فرآیند، نحوه پراکندگی داده‌ها توسط نرم افزار متلب مورد ارزیابی قرار گرفت. از مدل رگرسیونی درجه دوم (معادله ۷) برای بیان این همبستگی ریاضی استفاده شد.

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i=1}^k B_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} B_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (7)$$

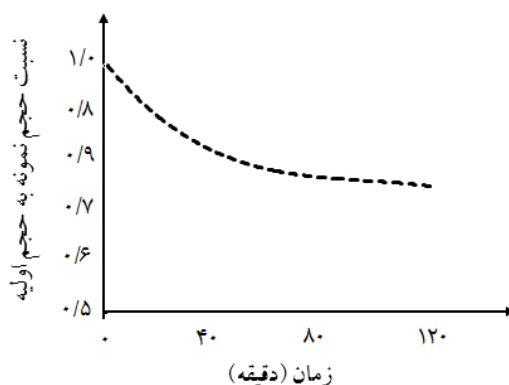
که در رابطه فوق X_i متغیرهای مستقل و B_i ضرایب مدل می‌باشند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از پردازش تصاویر دریافتی نشان داد که در فرایند خشک شدن، تغییرات حجم محصول به صورت تابعی نمایی از زمان صورت می‌گیرد. به طوری که در ابتدای آزمایش نرخ تغییر بالا بوده و با گذشت زمان کاهش می‌یافت (شکل ۲).

با استفاده از روش آماری سطح پاسخ، معادله (۸) مدل رگرسیونی و معادله (۹) مدل رگرسیونی بهینه شده به کمک روش پله ای^۱ برای پیش‌بینی چروک شدن شادگی به دست آمد که ارتباط تجربی بین میزان چروک شدن شادگی و متغیرهای مستقل را به صورت کدگذاری شده نشان می‌دهند. معادله مدل رگرسیونی بهینه شده بر حسب متغیرهای حقیقی به صورت معادله (۱۰) تعریف می‌شود. شاخصه‌های آماری مورد استفاده برای بررسی اعتبار مدل رگرسیونی بهینه شده در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به مقادیر پارامترهای آماری مورد استفاده می‌توان نتیجه گرفت که مدل مورد استفاده به خوبی همبستگی ریاضی بین متغیرهای مستقل

محتسبی و همکاران: بررسی تاثیر عوامل مختلف بر چروکیدگی ...



شکل ۲- روند تغییرات حجم محصول طی فرایند خشک شدن

بیشتر می شود، نرخ تبخیر سطحی افزایش پیدا می کند. بنا بر دلیل ذکر شده، در تمام ترکیب تیمارهای مورد آزمایش با افزایش ضخامت نمونه ها تا ضخامت ۵ میلیمتر میزان کاهش حجم محصول در هر لحظه کمتر بوده و در نتیجه چروک شدگی کاهش یافت و با افزایش ضخامت نمونه تا ۷ میلیمتر میزان چروک شدگی افزایش پیدا کرد. نتایج مشابهی توسط حاتمی پور و مولی برای هویج در سال ۲۰۰۲ ذکر شده است.

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که روش سطح پاسخ به خوبی قادر است با خطایی ناچیز داده ها را پیش بینی کرده و رابطه ای مناسب بین متغیرهای مستقل (زمان، دما، سرعت هوا و ضخامت) و شاخص چروک شدگی را ارائه کند. بر اساس یافته های این روش صرف نظر از مدت زمان خشک شدن، دما و ضخامت نمونه ها به ترتیب بیشترین تاثیر را بر روی چروک شدگی ورقه های نازک موز داشتند. در این میان سرعت هوای خشک کردن کمترین تاثیر را نشان داد. بر اساس آزمون مدل ها، مدل مرتبه دوم با خطایی ناچیز و ضریب همبستگی مناسب برای مدل سازی چروک شدگی بر اساس متغیرهای مستقل استفاده شد.

۲- در دماهای بالا به دلیل افزایش نرخ تبخیر، میزان کاهش حجم محصول در هر لحظه و در تمام ترکیب تیمارهای آزمایش بیشتر بوده، بنابراین نرخ چروک شدگی روند افزایشی داشته است (شکل های ۳، ۶ و ۷) (کینگسلیو همکاران^۱، ۲۰۰۷؛ باتیستا و همکاران^۲، ۲۰۰۷).

۳- در تمام ترکیب تیمارهای مورد آزمایش با افزایش سرعت هوای خشک کردن تا سرعت ۱/۰۵ متر بر ثانیه میزان کاهش حجم محصول بیشتر بوده و با افزایش سرعت هوا تا سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه این نرخ روند کاهشی را نشان داد. بنابراین میزان چروک شدگی در سرعت هوای ۱/۰۵ متر بر ثانیه بیشترین مقدار را دارد (شکل های ۴، ۶ و ۸). با توجه به شکل ۶ در تمام شرایط آزمایش تغییر سرعت در محدوده ۰/۹ تا ۱/۲ متر بر ثانیه در مقایسه با سایر محدوده های سرعت هوای خشک کردن تاثیر کمتری بر میزان چروک شدگی داشت. حاتمی پور و مولی (۲۰۰۲) و یداللهی نیا و جهانگیری (۲۰۰۹) نیز تاثیر سرعت هوا بر میزان چروک شدگی را ناچیز گزارش کردند.

۴- به دلیل این که در ضخامت های پایین رطوبت درونی در بازه زمانی کمتری به سطح منقل شده و تبخیر می شود، میزان نرخ کاهش حجم بیشتر بوده و با افزایش ضخامت این نرخ انتقال کاهش می یابد؛ اما در ضخامت های بالا نیز چون تماس سطح تماس محصول با هوای گرم

1- Kingsly et al.

2- Batista et al.

جدول ۲- شاخصه های آماری مدل سطح پاسخ مورد استفاده برای پیش بینی میزان چروک شدگی موز (معادله ۱۰)

۰/۹۵۱۶۱	ضریب همبستگی	۰/۰۳۲۵۴	انحراف از میانگین
۰/۹۳۳۱۸	ضریب همبستگی (با مقادیر واقعی)	۰/۸۳۸۴۵	میانگین
۰/۸۹۱۴۹	ضریب همبستگی مطلق (با مقادیر پیش بینی مدل)	۰/۸۸۱۱۲	درصد تغییرات
۲۱/۲۳۰۸	دقت اندازه گیری مناسب	۰/۰۴۹۸۷	عامل تاثیر
۰/۰۴۱۱	عامل تاثیر ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۰۳۳۰۰	ریشه میانگین مربعات خطا

$$y = 0.82 - 0.15t - 0.016T - 0.0065V - 0.0072d - 0.014t \times T - 0.0036t \times V - 0.011t \times D - 0.0072T \times V - 0.0044T \times d + 0.0097V \times d + 0.052t^2 + 0.032T^2 + \quad (۸)$$

$$0.045V^2 - 0.1d^2 - 0.0072t \times T \times V - 0.0044t \times T \times d + 0.0097t \times V \times d + 0.0061T \times V \times d + 0.0061t \times T \times V \times d \quad (۹)$$

$$y = 0.82 - 0.15t - 0.016T - 0.0065V - 0.0072d - 0.014t \times T + 0.062t^2 + 0.055V^2 - 0.093d^2$$

$$y = 0.708 - 0.0032t - 0.000109T - 0.45V + 0.23d - 0.00001t \times T + 0.000013t^2 + 0.22V^2 - 0.023d^2 \quad (۱۰)$$

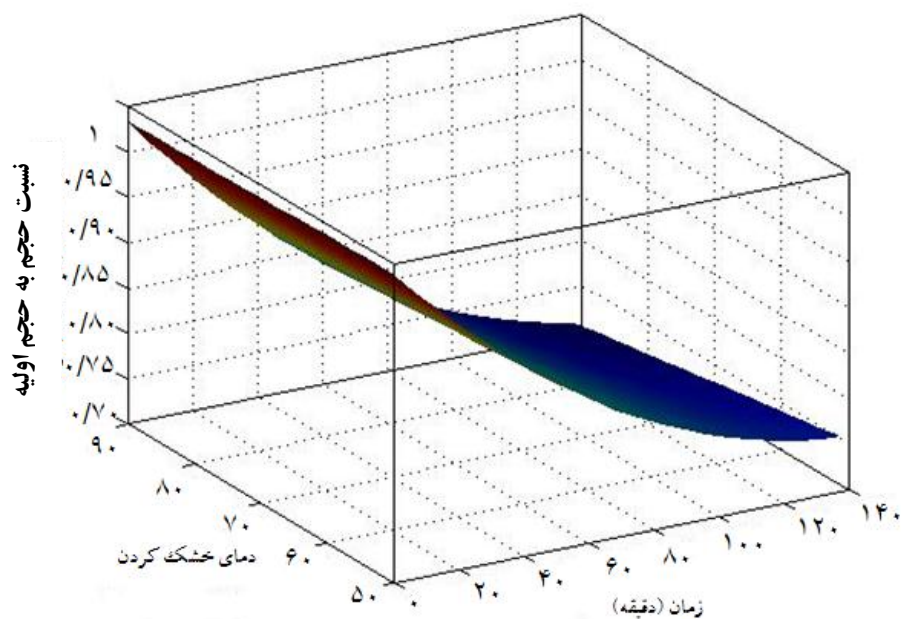
جدول ۳- نتایج جدول آنالیز واریانس ضرایب رگرسیون مدل سطح پاسخ (معادله ۹) بر میزان چروک شدگی در فرآیند خشک شدن

منبع	ضرایب رگرسیون	خطای استاندارد	آزادی درجه	میانگین مربعات	احتمال F	احتمال p Prob > F
مدل			۸	۰/۰۵۴۶۳	۵۱/۶۳۰	< ۰/۰۰۰۱
زمان	-۰/۱۴۷۸۷	۰/۰۰۷۶۷	۱	۰/۳۹۳۵۹	۳۷۱/۶۹	< ۰/۰۰۰۱
دما	-۰/۰۱۶۳۵	۰/۰۰۷۶۷	۱	۰/۰۰۴۸۱	۴/۵۴	۰/۰۴۵۰
سرعت	-۰/۰۰۶۴۶	۰/۰۰۷۶۷	۱	۰/۰۰۰۷۵	۰/۷۱	۰/۴۰۸۹
ضخامت	-۰/۰۰۷۱۸	۰/۰۰۷۶۷	۱	۰/۰۰۰۹۲	۰/۸۷	۰/۳۵۹۸
دما×زمان	-۰/۰۱۴۱۶	۰/۰۰۸۱۳	۱	۰/۰۰۳۲۱	۳/۰۳	۰/۰۹۶۳
زمان ^۲	-۰/۰۶۲۰۰	۰/۰۱۹۳۱	۱	۰/۰۱۰۹۱	۱۰/۳۰	۰/۰۰۴۲
سرعت ^۲	-۰/۰۵۴۹۸	۰/۰۱۹۳۱	۱	۰/۰۰۸۵۸	۸/۱۰	۰/۰۰۹۷
ضخامت ^۲	-۰/۰۹۳۴۹	۰/۰۱۹۳۱	۱	۰/۰۲۴۸۱	۲۳/۴۳	< ۰/۰۰۰۱
محل تقاطع	۰/۸۲۴۳۵	۰/۰۱۰۰۱	۱			
باقیمانده			۲۱	۰/۰۰۱۰۶		
مجموع			۲۹			

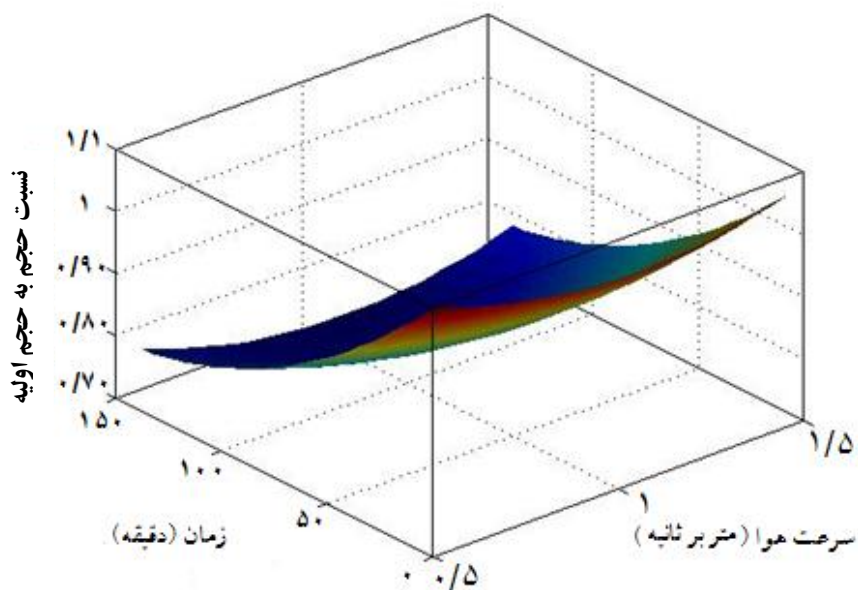
محتسبی و همکاران: بررسی تاثیر عوامل مختلف بر چروکیدگی ...

جدول ۴- نمایش طراحی آزمون‌ها بر اساس مدل مرکب مرکزی با چهار متغیر به همراه نتایج مشاهده شده و پیش‌گویی شده برای میزان چروک شدگی موز در فرآیند خشک شدن

شماره آزمون	مقادیر متغیرها				نتایج آزمایش	نتایج پیش‌بینی	باقیمانده
	زمان	دما	سرعت	ضخامت			
۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱/۰۱۱۵۵	-۰/۰۱۱۵۵
۲	۱	-۱	-۱	-۱	۰/۷۴۳۲	۰/۷۴۴۱	-۰/۰۰۰۹۰
۳	-۱	۱	-۱	-۱	۱	۱/۰۰۷۱	-۰/۰۰۷۱۸
۴	۱	۱	-۱	-۱	۰/۷۵۷۴	۰/۶۸۳۱	۰/۰۷۴۳۷
۵	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۰/۹۹۸۶	۰/۰۰۱۳۷
۶	۱	-۱	۱	-۱	۰/۷۴۳۲	۰/۷۳۱۲	۰/۰۱۲۰۳
۷	-۱	۱	۱	-۱	۱	۰/۹۹۴۲	۰/۰۰۵۷۵
۸	۱	۱	۱	-۱	۰/۶۵۰۷	۰/۶۷۰۱	۰/۰۱۹۴۰
۹	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۰/۹۹۷۲	۰/۰۰۲۸۱
۱۰	۱	-۱	-۱	۱	۰/۷۰۱۴	۰/۷۲۹۷	-۰/۰۲۸۳۶
۱۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۰/۹۹۲۸	۰/۰۰۷۱۸
۱۲	۱	۱	-۱	۱	۰/۶۳۱۴	۰/۶۶۸۷	-۰/۰۳۷۳۵
۱۳	-۱	-۱	۱	۱	۱	۰/۹۸۴۲	۰/۰۱۵۷۳
۱۴	۱	-۱	۱	۱	۰/۷۳۰۰	۰/۷۱۶۸	۰/۰۱۳۱۷
۱۵	-۱	۱	۱	۱	۱	۰/۹۷۹۹	۰/۰۲۰۱۱
۱۶	۱	۱	۱	۱	۰/۶۵۱۶	۰/۶۵۵۸	-۰/۰۰۴۲۰
۱۷	-۱	۰	۰	۰	۱	۱/۰۳۴۲	-۰/۰۳۴۲۳
۱۸	۱	۰	۰	۰	۰/۷۲۹۱	۰/۷۳۸۴	-۰/۰۰۹۳۷
۱۹	۰	-۱	۰	۰	۰/۸۷۸۱	۰/۸۴۰۷	۰/۰۳۷۴۵
۲۰	۰	۱	۰	۰	۰/۸۱۰۵	۰/۸۰۸۰	۰/۰۰۲۵۱
۲۱	۰	۰	-۱	۰	۰/۸۸۶۷	۰/۸۸۵۸	۰/۰۰۰۹۸
۲۲	۰	۰	۱	۰	۰/۸۲۸۳	۰/۸۷۲۸	-۰/۰۴۴۵۸
۲۳	۰	۰	۰	-۱	۰/۶۸۳۵	۰/۷۳۸۰	-۰/۰۵۴۵۰
۲۴	۰	۰	۰	۱	۰/۷۳۴۵	۰/۷۲۳۶	۰/۰۱۰۹۰
۲۵	۰	۰	۰	۰	۰/۸۷۲۸	۰/۸۲۴۳	۰/۰۴۸۵۳
۲۶	۰	۰	۰	۰	۰/۸۰۰۶	۰/۸۲۴۳	-۰/۰۲۳۷۱
۲۷	۰	۰	۰	۰	۰/۸۰۶۰	۰/۸۲۴۳	-۰/۰۱۸۳۱
۲۸	۰	۰	۰	۰	۰/۸۱۵۱	۰/۸۲۴۳	-۰/۰۰۹۱۸
۲۹	۰	۰	۰	۰	۰/۸۶۵۶	۰/۸۲۴۳	۰/۰۴۱۲۷
۳۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۳۲۹	۰/۸۲۴۳	۰/۰۰۸۵۸

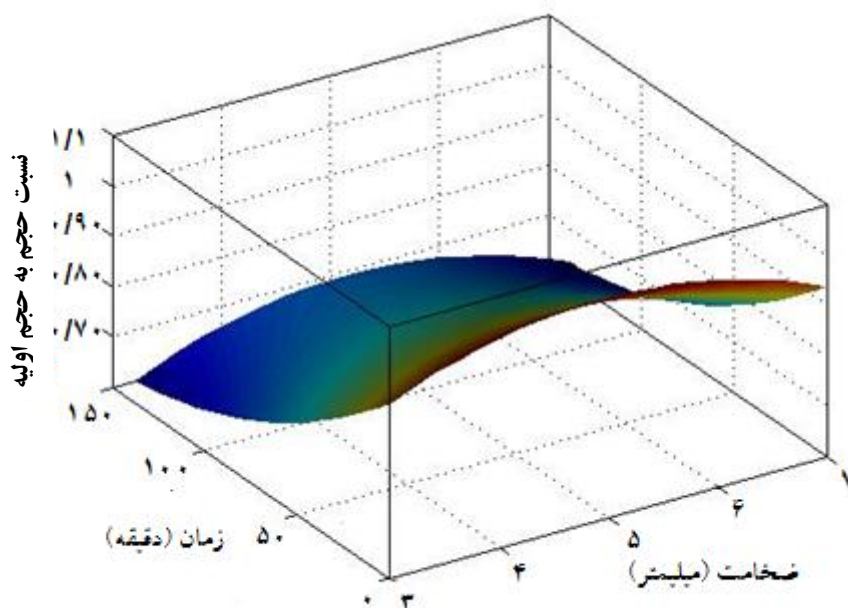


شکل ۳- نمایش نمودار سه بعدی سطح پاسخ مربوط به تأثیر زمان و دمای هوای خشک کردن بر میزان تغییرات نسبت حجم به حجم اولیه محصول در سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و ضخامت ۵ میلیمتر

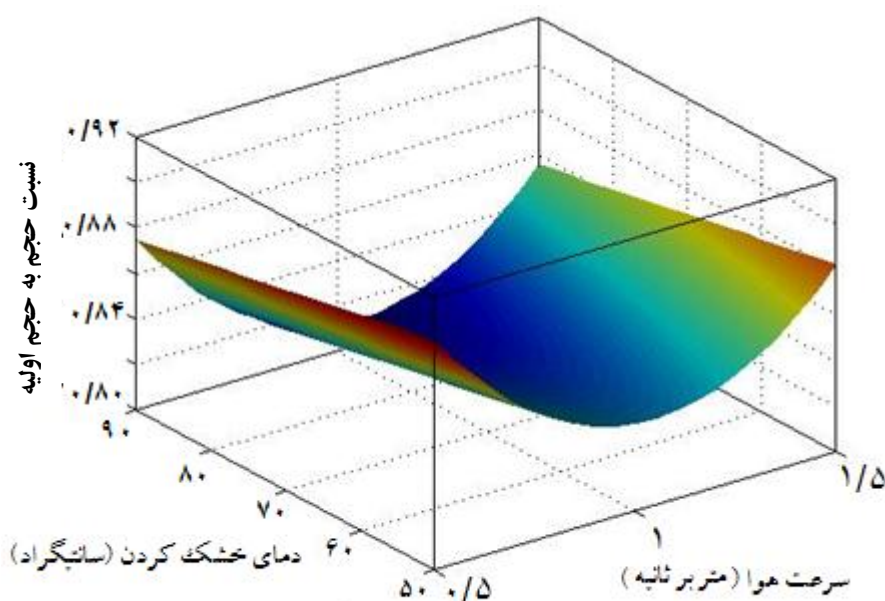


شکل ۴- نمایش نمودار سه بعدی سطح پاسخ مربوط به تأثیر زمان و سرعت هوای خشک کردن بر میزان تغییرات نسبت حجم به حجم اولیه محصول در دمای هوای ۷۰ درجه سانتیگراد و ضخامت ۵ میلیمتر

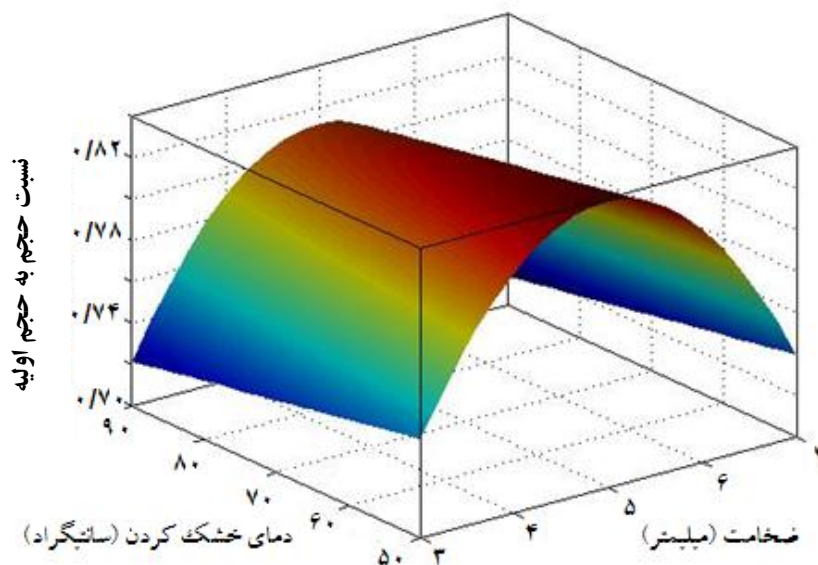
محتمسی و همکاران: بررسی تاثیر عوامل مختلف بر چروکیدگی ...



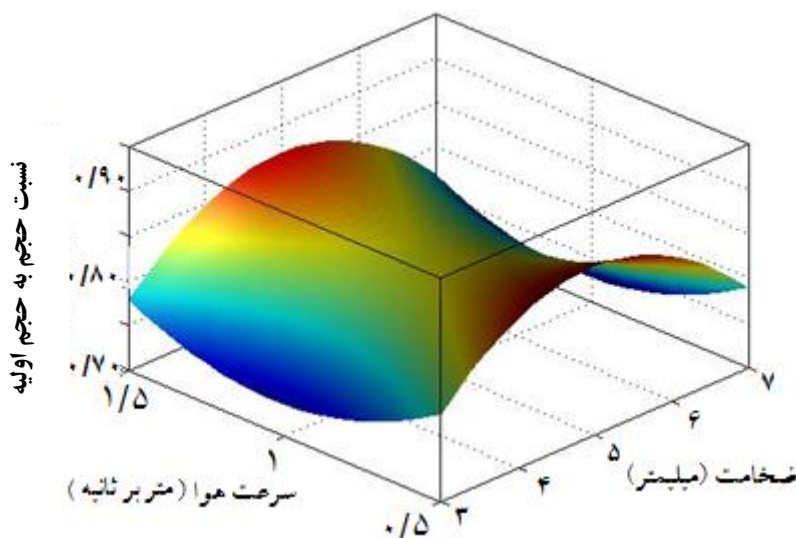
شکل ۵- نمایش نمودار سه بعدی سطح پاسخ مربوط به تأثیر زمان خشک کردن و ضخامت نمونه‌ها بر میزان تغییرات نسبت حجم به حجم اولیه محصول در دمای هوای ۷۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه



شکل ۶- نمایش نمودار سه بعدی سطح پاسخ مربوط به تأثیر سرعت و دمای هوای خشک کردن بر میزان تغییرات نسبت حجم به حجم اولیه محصول در زمان ۶۹ دقیقه و ضخامت ۵ میلی‌متر



شکل ۷- نمایش نمودار سه بعدی سطح پاسخ مربوط به تأثیر ضخامت نمونه‌ها و دمای هوای خشک کردن بر میزان تغییرات نسبت حجم به حجم اولیه محصول در زمان ۶۹ دقیقه و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه



شکل ۸- نمایش نمودار سه بعدی سطح پاسخ مربوط به تأثیر ضخامت نمونه‌ها و سرعت هوای خشک کردن بر میزان تغییرات نسبت حجم به حجم اولیه محصول در زمان ۶۹ دقیقه و دمای هوای ۷۰ درجه سانتیگراد

سپاسگزاری

کشاورزی دانشگاه تهران که در انجام آزمایش‌ها با نویسندگان همکاری نمودند، قدردانی می‌گردد.

از زحمات جناب آقای مهندس خسروی، مسئول آزمایشگاه تحقیق و توسعه گروه مهندسی ماشین‌های

منابع

- آذری کیا، ف. و عباسی، س. ۱۳۸۷. تعیین شرایط بهینه استخراج پلی ساکاریدهای محلول از آکارا. مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران، ۳(۱): ۴۵-۵۵.

۲. امیری، م.، صالحی صدقیانی، ج.، عزیز محمدی، ر. و هادی پور، ح. ۱۳۸۹. تعیین میران بهینه عوامل موثر در گشتاور چرخشی کاسه چرخ خودرو با استفاده از روش شناسی رویه پاسخ و الگوریتم ژنتیک. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۴، (۲۱): ۲۰۴-۲۱۱.
۳. بشیری، م و حسینی نژاد، ج. ۱۳۸۸. بهینه سازی فرایند با چند سطح پاسخ به کمک شبکه های عصبی بر مبنای مفهوم مطلوبیت. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۴ (۲۰): ۶۳-۵۳.
۴. سجادی، ج. ۱۳۸۵. بهینه سازی در طراحی آزمایشات. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
۵. عباسی، س و فرزانه مهر، ح. ۱۳۸۸. بهینه سازی شرایط استخراج اینولین از کنگر با و بدون اعمال فراصوت به کمک روش سطح پاسخ. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳ (۴۷): ۴۲۳-۴۳۵.
۶. قریشی، م. و توان، م. ۱۳۸۴. بهینه سازی پارامترهای موثر در تراشکاری قطعات توسط روش آماری سطح پاسخ. سیزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۷. کارگذاری، م. ۱۳۸۶. بهینه سازی خشک کردن اسمزی هویج با استفاده از روش سطح پاسخ. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، رشته مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
۸. گودرزی، ف. ۱۳۸۷. بهینه سازی مصرف سولفیت در تولید برگه زردآلو. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۲ (۴۶): ۳۹۱-۴۰۱.
۹. میلانی، ا.، پورآذرننگ، ه.، وطن خواه، ش. و وکیلیان، ع. ۱۳۸۹. بهینه سازی استخراج اینولین از غده ی سیب زمینی ترشی به کمک روش سطح پاسخ. نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران، ۶ (۳): ۱۷۶-۱۸۳.
10. Aguilera, J.M. 2003. Drying and dried products under the microscope. *Journal of Food Science and Technology*, 9 (3): 137-143.
11. Batista, M.L., Rosa, C. A. Pinto, L.A.A. 2007. Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan. *Journal of Food Engineering*, 81: 127-132.
12. Hatamipour, M.S., and Mowla, D. 2002. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, 55: 247-252.
13. Kingsly, A.R.P, Meena, H.R., Jain, R.K., and Singh, D.B. 2007. Shrinkage of ber (*Zizyphus mauritian* L.) fruits during sun drying. *Journal of Food Engineering* 79: 6-10.
14. Yadollahinia, A., and Jahangiri, M. 2009. Shrinkage of potato slices during drying. *Journal of Food Engineering*, 94: 52-58.
15. Yan, Z., Sousa-Gallagher, J. M., and Oliveira, A.R.F., 2008. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*. 84:430-440.