بهینه سازی چروکیدگی پسته در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز با پیش تیمارمیکروویو با روش سطح پاسخ

معین زرین نژاد[۱]*، مریم احمدی[۱] ، رضا امیری چایجان [۲]

۱–دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا،
moeinzarin1367@yahoo.com
۲–دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا

چکیده:

در این پژوهش، تغییرات مقدار رطوبت و چروکیدگی پسته در طی فرآیند خشک شدن به روش مادون قرمز به کمک میکروویو مورد بررسی قرار گرفتند. برای انجام آزمایش‌ها از یک خشک‌کن بسترسیال مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد. مقدار رطوبت اولیه پسته ۰/۵۶ بدست آمد. آزمایشها در دمای هوای ۴۵، ۶۵ و ۸۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای ثابت ۲/۲۹ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ وات انجام شد. سطوح توان میکروویو نیز ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات درنظر گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش دمای هوا از ۴۵ به ۸۵ درجه سلسیوس زمان خشک کردن کاهش یافت. همچنین تأثیر دمای هوا، توان مادون قرمز و نیز توان میکروویو بر چروکیدگی بررسی شد، نتایج نشان داد که با افزایش دما و افزایش همزمان توان مادون قرمز و توان میکروویو مقدار چروکیدگی افزایش یافت. مقادیر بیشترین و کمترین چروکیدگی ۲۱/۷۸ و ۲/۹۱ درصد بود. در خشک‌کن مورد استفاده مقادیر بهینه برای چروکیدگی ۶/۲۷٪ و زمان خشک کردن ۳۳/۶۵ دقیقه در دمای $45^{\circ}C$، توان مادون قرمز ۱۵۰۰ وات و توان میکروویو ۶۳۰ وات پیشنهاد شد.

واژه های کلیدی: خشک‌کن مادون قرمز به کمک میکروویو، پسته، چروکیدگی، مقدار رطوبت

مقدمه

کشور ایران رتبه اول را در تولید پسته به خود اختصاص داده است هم‌اکنون در حدود ۲۵۷۹۲۵ هکتار از اراضی کشور زیر کشت این محصول است. سالانه ۴۷۰۹۷ تن پسته تولید می‌شود و ایران مهم‌ترین صادر کننده پسته است به‌طوری که ایران ۱۳۰۱۳۷ تن صادرات سالانه پسته را بخود اختصاص داده است (FAO, 2011). امواج میکروویو با بسامد بالا تا ۳۰۰۰۰ مگاهرتز می‌تواند در خشک‌کردن به کار گرفته شود. یک ژنراتور بسامد بالا، موجها را به یک آون که برای جلوگیری از عبور موجها طراحی‌شده است

می‌فرستد. میزان نفوذ امواج میکروویو، تحت تاثیر عمق و نوع مواد در معرض موج قرار می‌گیرد. چنانچه انرژی امواج به داخل ماده وارد شود مولکول‌های ماده سعی می‌کند در جهت میدان الکتریکی اعمال شده آرایش بگیرد. سپس در حول محور خود شروع به نوسان می‌کند و انرژی موج‌ها را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند. این حرارت تولید شده موجب خشک‌شدن ماده غذایی می‌گردد. در این روش سرعت خشک‌شدن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. هدف از خشک کردن دانه‌های غذایی و محصولات کشاورزی، افزایش ذخیره‌سازی و انبارداری می‌باشد. با خشک‌کردن محصولات کشاورزی می‌توان محصولات جانبی یا ضایعات کشاورزی را به فرآورده‌های مفید تبدیل کرد. گرمایش مادون‌قرمز شامل قرار گیری یک ماده در معرض تشعشعات الکترومغناتیسی در دامنه موج بین ۱۰۰۰–۰/۸ میکرومتر می‌باشد. در این روش انتقال گرما مستقیما با جذب انرژی مادون قرمز خشک می‌شوند. تولید امواج الکترومغناطیسی به طرق مختلف صورت می‌گیرد که جهت خشک‌کردن معمولا از لامپ مادون‌قرمز استفاده می‌شود. در این روش، جذب اشعه مادون قرمز توسط ماده غذایی، سبب ایجاد ارتعاش حرارتی در مولکول‌ها می‌شود. همچنین در این روش، بدون گرم شدن هوای اطراف ماده غذایی، حرارت داخلی ماده افزایش می‌یابد. اشعه مادون قرمز به عمق خاصی از محصولات نفوذ می‌کند و باعث افزایش دمای آن می‌شود. در سال‌های اخیر خشک‌کن مادون قرمز توسط برخی از محققین مورد مطالعه قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که زمان خشک‌کردن با افزایش توان مادون قرمز کاهش پیدا کرد (Sharma *et al*, 2005; Meeso *et al*, 2004). از جمله اهداف این مقاله عبارت است از: الف) تعیین تأثیر شرایط مختلف خشک کردن از قبیل دمای هوا، توان مادون قرمز و توان میکروویو بر میزان چروکیدگی نمونه‌های پسته در خشک‌کن مادون قرمز به کمک میکروویو، ب) محاسبه چروکیدگی نمونه‌ها و پ) بهینه سازی فرآیند خشک‌کردن برای کمینه کردن چروکیدگی.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه

نمونه‌های پسته تازه از بازار تهیه شدند. نمونه ها در یخچال در دمای ۱±۳ °C برای جلوگیری از کاهش رطوبت ذخیره شدند. برای بدست آوردن مقدار رطوبت اولیه نمونه‌های پسته، نمونه‌ها در یک آون در دمای ۱±۱۰۳ °C به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. مقدار رطوبت اولیه با استفاده از رابطه زیر بدست آمد:

$$MC_{db} = \frac{M_i - M_d}{M_d} \qquad (۱)$$

که در آن، MC_{db} میزان رطوبت بر پایه خشک، M_i وزن محصول تر(کیلوگرم) و M_d وزن محصول خشک (کیلوگرم) است.

خشک‌کن مادون قرمز به کمک میکروویو

در این پژوهش از یک دستگاه خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو آزمایشگاهی استفاده شد. با توجه به شرایط آزمایش، از سه لامپ مادون قرمز که توان هر لامپ ۵۰۰ وات می‌باشد برای ایجاد توان مادون قرمز استفاده شد. این دستگاه مجهز به یک میکروویو شارپ با حداکثر توان ۹۰۰ وات، دمنده گریز از مرکز با موتور الکتریکی (۳۷۵ وات، تک فاز) برای ایجاد سرعت جریان هوای ۲/۲۹ متر بر ثانیه، ۷ المنت گرمایی با توان ۲/۱ کیلووات برای ایجاد دمای هوای ۴۵ تا ۸۵ درجه سلسیوس، یک ترموستات دیجیتال با دقت ±۰/۱ درجه سلسیوس برای تنظیم دمای داخل محفظه خشک‌کن بود. همچنین دمای هوای ورودی به داخل محفظه خشک‌کن با استفاده از یک ترموکوپل مدل Atbin mega ساخت ایران با دقت ±۰/۱ درجه سلسیوس، سرعت هوای ورودی با استفاده از اینورتر مدل Vincker VSD ساخت کشور تایوان، رطوبت نسبی و دمای نسبی هوا با استفاده از ابزار اندازه‌گیری چند منظوره اندازه‌گیری شدند. برای شروع کار، نمونه‌ها در داخل ظرف به صورت لایه نازک قرار داده شدند.

چروکیدگی

یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی که در طول فرآیند خشک شدن اتفاق می‌افتد، کاهش حجم خارجی محصول است. گرم شدن محصول به همراه کاهش آب آن باعث تنش‌هایی در ساختار سلولی مواد غذایی می‌شود که منجر به تغییر شکل و کاهش ابعاد آنها می‌گردد. پدیده چروکیدگی پیامد منفی بر روی محصول خشک‌شده دارد. قطر میانگین هندسی نمونه‌های پسته از رابطه زیر بدست آمد :

$$D = (A \times B \times C)^{\frac{1}{3}} \quad (۱)$$

که در آن D قطر میانگین هندسی (m) و A، B و C به ترتیب قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک بر حسب متر می‌باشد. حجم فندق قبل از خشک کردن از رابطه زیر بدست آمد:

$$V_O = \frac{4}{3}\pi(\frac{D}{2})^3 \quad (۲)$$

و در نهایت درصد چروکیدگی از رابطه زیر بدست آمد (Nathakaranakule *etal*, 2010):

$$S_b = (1 - \frac{V}{V_O}) \times 100 \quad (۳)$$

که S_b درصد چروکیدگی، V_o و V حجم فندق (متر مکعب) به ترتیب قبل و بعد از خشک کردن است.

بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ

تئوری و روش‌های بهینه‌سازی که روش تازه‌ای در ریاضیات، ریاضیات تحلیلی و مسائل تحقیقاتی است، در علوم، مهندسی، مدیریت تجارت، صنایع نظامی و تکنولوژی‌های فضایی بکار می‌رود. در واقع بهینه‌سازی حل مطلوب مسائلی است که به صورت ریاضی تعریف شده‌اند. بهینه-سازی، مطالعه شرایط مطلوب مسائل، ایجاد مدل مناسب وتعیین الگوریتم برای حل، ایجاد تئوری همگرایی برای الگوریتم‌ها و آزمایش‌های عددی با مسائل معمولی و مسائلی که در شرایط واقعی اتفاق می‌افتد را در بر می‌گیرد. بهینه‌سازی و مدل‌سازی فرآیند به عنوان یکی از مهم-ترین مراحل افزایش بازدهی فرآیندهای حرارتی به شمار می‌رود. پیداکردن روابط بین عوامل ناخواسته و محصول نهایی برای محققین بسیار ارزشمند است. روش سطح پاسخ شامل (RSM) شامل مجموعه‌ای از راهکارها است که برای بررسی شرایط عملیاتی بهینه از طریق روش‌های تجربی کاربرد دارد. به طور معمول، این روش شامل انجام آزمایش‌های مختلف، با استفاده از نتایج حاصل از یک آزمایش برای راهنمایی مسیری که بعداً باید پیمود، می‌باشد. اقدام بعدی، تمرکز بر روی آزمایش‌ها برای جمع‌آوری اطلاعات بیشتر در حوزه آزمایشی موجود به منظور برازش دادن مدل مرتبه بالاتر است. به طور کلیRSM شامل مراحلی از جمله کدبندی داده‌ها، ایجاد طرح، برازش مدل سطح پاسخ و نمایش نموداری سطح پاسخ می‌باشد. در این مطالعه از نرم‌افزار Design Expert ۷ برای بهینه سازی فرآیند خشک‌شدن پسته با خشک‌کن مادون قرمز به کمک میکروویو استفاده شد. این برنامه برای بهینه سازی از ۲۰ روش آزمایشی با سطوح و تکرارهای متفاوت که در جدول ۱ آورده شده است استفاده می‌کند. در این نرم افزار برای تعیین مقادیر بهینه جواب‌ها، در ابتدا باید مقادیر بیشینه و کمینه مورد نظر مشخص را مشخص کرد. با تعیین هدف مورد نظر برای متغیرهای پاسخ (چروکیدگی و زمان خشک‌کردن) و مستقل (دمای هوا، توان مادون قرمز و توان میکروویو)، نرم افزار، سطوح پیشنهادی را همراه با تابع مطلوبیت آزمایش در قالب یک جدول ارائه می‌کند. در این پژوهش بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن پسته با توجه به کمینه مقدار چروکیدگی برای بازار یابی بیشتر دارای اهمیت بالاتری قرار می‌باشد و زمان در درجه اهمیت پایین‌تری انجام شد. نقشه آزمایش‌های فرآیندخشک‌کردن پسته برای خشک-کن مادون‌قرمز به کمک میکروویو در جدول ۲ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

سینتیک خشک‌کردن

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که زمان خشک کردن با افزایش دمای هوای خشک کردن از ۴۵ به ۸۵ درجه سلسیوس، توان مادون قرمز از ۵۰۰ به ۱۵۰۰ وات و نیز توان میکروویو از ۲۷۰ به ۶۳۰ وات به دلیل افزایش نرخ تبخیر رطوبت کاهش پیدا کرد. این نتایج با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین مطابقت داشت (Kocabiyik and Tezar, 2009; Nimol *et al*, 2007).

جدول۱. سطوح کدبندی شده بیشینه، متوسط و کمینه متغیرهای مستقل در خشک‌کن مادون‌قرمز به کمک میکروویو

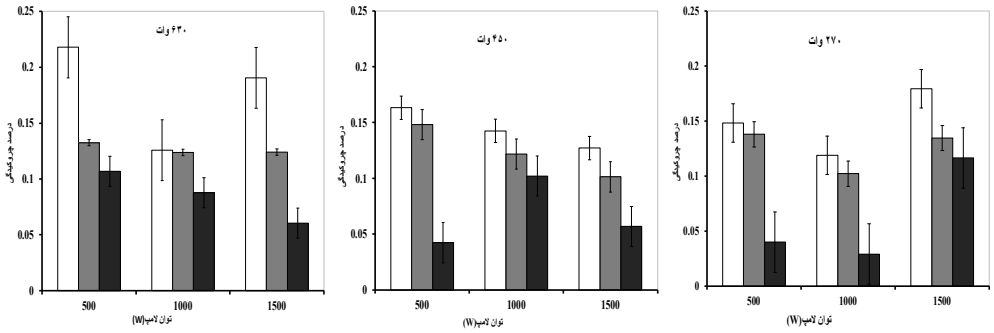
متغیر	نماد	سطوح کدبندی شده متغیر		
		-۱	۰	۱
دمای هوای ورودی(C)	T	۴۵	۶۵	۸۵
توان مادون قرمز(W)	L	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
توان میکروویو(W)	W	۲۷۰	۴۵۰	۶۳۰

جدول۲. نقشه آزمایش‌های فرآیند خشک‌کردن پسته برای خشک‌کن مادون‌قرمز به کمک میکروویو در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت

شماره آزمایش	مقادیر حقیقی(کد) هر متغیر مستقل (ورودی)			تکرار
	توان مایکروویو (W)	توان مادون قرمز (W)	دمای هوا (°C)	
۱	۲۷۰(-۱)	۱۰۰۰ (۰)	۶۵(۰)	۱
۲	۴۵۰(۰)	۱۰۰۰(۰)	۸۵(۱)	۱
۳	۴۵۰(۰)	۱۰۰۰ (۰)	۶۵ (۰)	۶
۴	۲۷۰(-۱)	۱۵۰۰(۱)	۴۵(-۱)	۱
۵	۲۷۰(-۱)	۱۵۰۰ (۱)	۸۵(۱)	۱
۶	۶۳۰(۱)	۵۰۰(-۱)	۴۵(-۱)	۱
۷	۶۳۰(۱)	۱۰۰۰(۰)	۶۵(۰)	۱
۸	۴۵۰(۰)	۱۵۰۰(۱)	۶۵(۰)	۱
۹	۶۳۰(۱)	۵۰۰ (-۱)	۸۵(۱)	۱
۱۰	۶۳۰(۱)	۱۵۰۰ (۱)	۸۵(۱)	۱
۱۱	۴۵۰(۰)	۱۰۰۰ (۰)	۴۵(-۱)	۱
۱۲	۶۳۰(۱)	۱۵۰۰ (۱)	۴۵(-۱)	۱
۱۳	۲۷۰(-۱)	۵۰۰ (۱)	۸۵(۱)	۱
۱۴	۲۷۰(-۱)	۵۰۰(-۱)	۴۵(-۱)	۱
۱۵	۴۵۰(۰)	۵۰۰(-۱)	۶۵(۰)	۱

چروکیدگی

در طی انجام آزمایش‌ها، اندازه نمونه‌ها به دلیل از دست دادن مقدار رطوبت کاهش پیدا کرد اما شکل کلی آن‌ها تغییری نکرد. شکل ۱ مقادیر چروکیدگی را در تمامی شرایط مختلف آزمایشگاهی نشان می‌دهد.



شکل ۱. تأثیر دماهای هوای خشک کردن (■ ۴۵، ▒ ۶۵ و □ ۸۵ درجه سلسیوس)، در تمامی سطوح آزمایشگاهی بر چروکیدگی نمونه‌های پسته خشک شده به روش مادون قرمز به کمک میکروویو

مشاهده‌ها نشان داد که با افزایش دمای هوا، چروکیدگی نمونه‌های پسته خشک شده به روش مادون قرمز به کمک میکروویو افزایش پیدا کرد. چروکیدگی نمونه‌های خشک شده پسته در دمای ۸۵ درجه سلسیوس، توان مادون قرمز ۵۰۰ وات و توان میکروویو ۶۳۰ وات دارای بیشترین مقدار (۲۱/۷۸) و در دمای ۴۵ درجه سلسیوس، توان مادون قرمز ۱۰۰۰ وات و توان میکروویو ۲۷۰ وات دارای کمترین مقدار (۲/۹۱) بود. این امر به دلیل اختلاف دمای زیادی است که در دماهای بالا بین قسمت‌های داخلی نمونه‌های پسته خشک شده و محیط خارجی ایجاد می‌شود و همین امر منجر به افزایش چروکیدگی می‌شود. به دلیل این‌که بیشترین چروکیدگی در نخستین مراحل خشک کردن رخ می‌دهد و همچنین به منظور این‌که چروکیدگی به کمترین اندازه برسد، باید فرآیند خشک کردن در دمای پایین صورت گیرد به طوری که اختلاف رطوبت در درون محصول به پایین‌ترین اندازه برسد. به همین دلیل مطالعه پدیده چروکیدگی برای درک بهتر فرآیند خشک‌کردن و حفظ کیفیت محصول مهم و ضروری است.

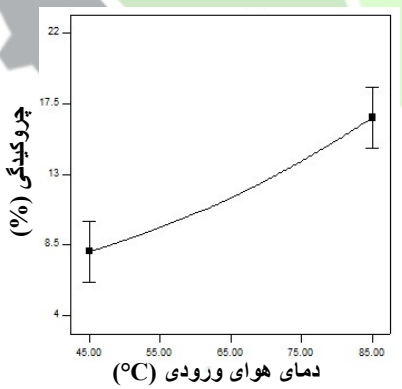
بهینه سازی

جدول ۳ نتایج حاصل از آنالیز واریانس جهت بررسی اثر دمای هوا، توان مادون قرمز و توان میکروویو بر چروکیدگی را در خشک-کن بسترسیال به کمک میکروویو نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که اثر دمای هوا در سطح ۱٪ و نیز اثر متقابل توان مادون قرمز و توان میکروویو در سطح ۱٪ بر میزان چروکیدگی معنی‌دار می‌باشد. توان میکروویو و توان مادون قرمز به تنهایی تاثیر معنی‌داری بر چروکیدگی نداشتند. شکل۲ و ۳ به ترتیب تغییرات چروکیدگی در برابر دما و تاثیر متقابل توان میکروویو و مادون قرمز بر چروکیدگی را نشان می‌دهد.

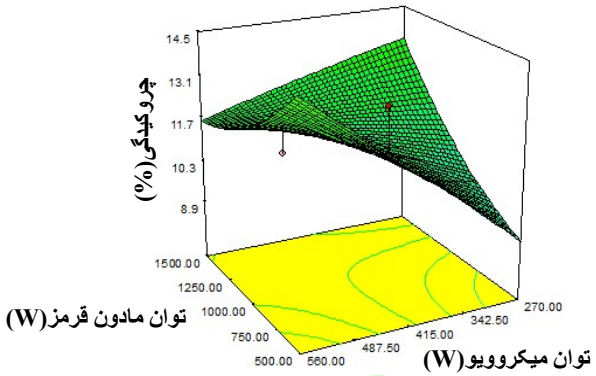
جدول۳. نتایج آنالیز واریانس برای چروکیدگی در خشک‌کن بسترسیال با پیش تیمار میکروویو

منابع تغییرات	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	p-value Prob > F
مدل	۲۷۲/۵۰	۳۰/۲۸	۹/۷۷	۰/۰۰۰۱
A(دما)	۱۶۷/۲۳	۱۶۷/۲۳	۵۳/۹۸	<۰/۰۰۰۱
B (توان مادون قرمز)	۳/۳	۳/۳	۱/۰۷/۵۷	۰/۳۲۶۰
C(توان میکروویو)	۱۲/۸۶	۱۲/۸۶	۲/۱۶	۰/۰۵۵۴
A×B	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۲۸	۰/۶۱۰۳
A×C	۶/۰۹	۶/۰۹	۱/۹۷	۰/۱۹۱۰
B×C	۴۱/۱۸	۴۱/۱۸	۱۳/۳۰	۰/۰۰۴۵
A^2	۱/۸۵	۱/۸۵	۰/۶۰	۰/۴۵۸۱
B^2	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۲۷	۰/۶۱۴۱
C^2	۰/۰۳۰	۰/۰۳۰	$۹/۷۵\times۱۰^{-۳}$	۰/۹۲۳۲
باقیمانده	۳۰/۹۸	۳/۱۰		
کل	۳۰۳/۴۸			

در خشک‌کن مادون‌قرمز به کمک میکروویو، مهمترین متغیر تاثیرگذار بر چروکیدگی، دمای هوا بود. بطوری که چروکیدگی با افزایش دما، افزایش پیدا کرد. با افزایش دما سرعت تبخیر سریع‌تر بوده و باعث سریع خشک شدن محصول شده و تنشهای بافت پسته به سرعت افزایش یافته و در نتیجه چروکیدگی بیشتر می شود.



شکل۲. تاثیر دما بر میزان چروکیدگی



شکل۳. تاثیر متقابل توان و دما بر میزان چروکیدگی

همان‌طور در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش همزمان توان میکروویو و توان مادون‌قرمز، چروکیدگی نمونه‌های پسته افزایش می‌یابد. این هم به دلیل افزایش دمای بافت پسته و در نتیجه افزایش تنشهای ناشی از کاهش شدید رطوبت است. افزایش همزمان این دو پارامتر نیز باعث کاهش زمان خشک کردن و متعاقب آن افزایش چروکیدگی نمونه‌ها می‌شود.

مدل ریاضی چروکیدگی

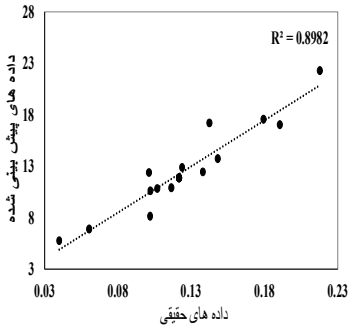
معادله چند جمله‌ای (۴) رابطه چروکیدگی و متغیرهای مستقل را در خشک‌کن مادون‌قرمز به کمک میکروویو نشان می‌دهد. همچنین اطلاعات آماری معادله در جدول (۴) آورده شده است. ضرایب مثبت و منفی مدل نشان دهنده رابطه مستقیم و غیر مستقیم چروکیدگی با متغیرهای مستقل می‌باشد. مقدار R^2 (۰/۸۹۷) و Adeq.pre (۱۳/۲۶) در خشک‌کن مادون‌قرمز به کمک میکروویو نشان دهنده این است که معادله ارائه شده، رفتار سیستم را به خوبی پیش‌بینی کرده و دارای دقت مناسبی می‌باشد. شکل ۴ مقادیر حقیقی و پیش‌بینی شده چروکیدگی را در خشک‌کن مادون‌قرمز به کمک میکروویو نشان می‌دهد.

$$\text{چروکیدگی} = -۱/۷۹۰-۰/۱۱۶\times T-۲/۵۲۱\times۱۰^{-۵}\times P\times L \qquad (٤)$$

که در رابطه بالا T دمای هوا (درجه سیلسیوس)، P توان میکروویو (وات) و L توان مادون قرمز (وات) می‌باشد.

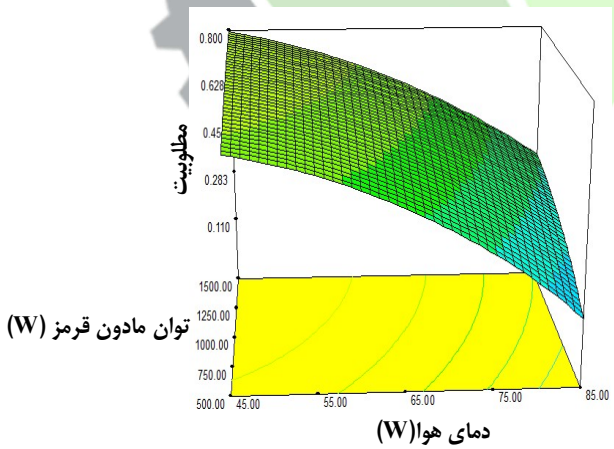
جدول٤. اطلاعات آماری مربوط به مدل تجربی چروکیدگی در خشک‌کن مادون‌قرمز به کمک میکروویو

R^2(%)	Adj.R^2	Adeq.pre	Std. Dev.	Mean	C.V. %
۸۹/۸۲	۰/۸۰۶	۱۳/۲۶۶	۱/۷۶	۱۲/۵۰	۱۴/۰۸



شکل ٤. مقادیر حقیقی چروکیدگی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده در خشک‌کن مادون‌قرمز با پیش تیمار میکروویو

با توجه به نتایج بدست آمده در فرآیند بهینه‌سازی خشک‌کردن پسته با خشک‌کن مادون‌قرمز با پیش تیمار میکروویو، برای رسیدن به کمترین چروکیدگی و نیز کمینه زمان خشک‌شدن، ۱۰ انتخاب پیشنهاد شد، شکل ۵ یکی از منحنی‌های مطلوبیت بر حسب متغیرهای پاسخ و مستقل در خشک‌کن مادون‌قرمز با پیش تیمار میکروویو را نشان می‌دهد. در خشک‌کن مورد استفاده، مقادیر بهینه برای چروکیدگی (۶/۲۷٪) در دمای ۴۵°C، توان مادون قرمز ۱۵۰۰ وات و توان میکروویو ۶۳۰ وات پیشنهاد شد که این فرآیند طبق پیش‌بینی نرم‌افزار در ۳۳/۶۵ دقیقه به اتمام خواهد رسید. به دلیل تاثیر زیاد دما بر چروکیدگی با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) ، کمترین مقادیر چروکیدگی در آزمایش‌های با دمای هوای پایین اتفاق افتاد، به همین علت دما در جدول مطلوبیت در کمترین مقدار خود می‌باشد.



شکل ۵. منحنی مطلوبیت (سطح بهینه) در توان ۶۳۰ وات و دما و توان‌های مادون‌قرمز منتخب ، در خشک‌کن مادون‌قرمز به کمک میکروویو

جدول۵. نتایج بهینه‌سازی فرایند خشک‌کردن پسته در خشک کن بستر سیال مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو

شماره آزمایش	دما (°C)	توان لامپ (W)	توان میکروویو (W)	چروکیدگی (٪)	زمان (ساعت)	مطلوبیت
۱	۴۵	۱۵۰۰	۶۳۰	۶/۲۶۷۷	۳۳/۶۵	۰/۸۷۴
۲	۴۵/۳۶	۱۴۹۹/۹۹	۶۳۰	۶/۳۶۰۲	۳۳/۲۵	۰/۸۷۱
۳	۴۵/۶۶	۱۵۰۰	۶۳۰	۶/۴۳۴۷	۳۲/۹۳	۰/۸۶۸
۴	۴۵	۱۴۷۵/۴۳	۶۲۹/۳۳	۶/۳۷۱۶	۳۴/۴۲	۰/۸۶۸
۵	۴۵	۱۴۷۰/۲۲	۶۳۰	۶/۳۸۵	۳۴/۵۰	۰/۸۶۷
۶	۴۵	۱۵۰۰	۶۱۷/۲۵	۶/۴۱۰	۳۴/۸۵	۰/۸۶۶
۷	۴۵	۱۴۶۱/۱۶	۶۳۰	۶/۴۲۰۸	۳۴/۷۶	۰/۸۶۵
۸	۴۵	۱۵۰۰	۶۳۰	۶/۶۰۳۵	۳۲/۲۲	۰/۸۶۳
۹	۴۶/۴۹	۱۴۹۹/۹۹	۶۳۰	۶/۶۴۴۲	۳۲/۰۵	۰/۸۶۱
۱۰	۴۶/۷۲	۱۵۰۰	۶۳۰	۶/۷۰۲۷	۳۱/۸۱	۰/۸۵۹

نتیجه‌گیری

رفتار خشک‌کردن، چروکیدگی و زمان خشک‌کردن پسته در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز با پیش تیمارمیکروویو بررسی شد. دمای هوای خشک‌کن عامل مهمی در محاسبه زمان خشک‌شدن، و چروکیدگی بود. مقادیر چروکیدگی بدست آمده در آزمایشات بین ۲/۹۱ درصد تا ۲۱/۷۸ درصد متغیر شد. چروکیدگی نمونه‌های خشک شده پسته در دمای ۸۵ درجه سلسیوس، توان مادون قرمز ۵۰۰ وات و توان میکروویو ۶۳۰ وات دارای بیشترین مقدار ۲۱/۷۸ و در دمای ۴۵ درجه سلسیوس، توان مادون قرمز ۱۰۰۰ وات و توان میکروویو ۲۷۰ وات دارای کمترین مقدار ۲/۹۱ بود. مقادیر بهینه برای چروکیدگی ۶/۲۷٪ و زمان خشک کردن ۳۳/۶۵ دقیقه در دمای ۴۵°C، توان مادون قرمز ۱۵۰۰ وات و توان میکروویو ۶۳۰ وات پیشنهاد شد.

منابع

1. F. A. O. 2011. Statistics. www.FAO.org
2. Kocabiyik, H.,and D. Tezer. 2009. Drying of carrot slices using infrared radiation. International Journal of Food Science and Technology 44: 953-959.
3. Meeso, N., A. Nathakaranakule, TH. Madhiyanon, and S. Soponronnarit. 2004. Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying. Journal of Food Engineering 65: 293-301.
4. Nathakaranakule, A., P. Jaiboon, and S. Soponronnarit. 2010. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. Journal of Food Engineering 100: 662-668.

5. Nimmol, CH., S. Devahastin, T. Swasdisevi, and S. Soponronnarit. 2007. Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. Journal of Food Engineering 81: 624-633.
6. Sharma, G.P., R.C. Verma, and P. Pathare. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. Journal of Food Engineering 71: 282-286.

Optimization of pistachio shrinkage under infrared fluidized bed with microwave pretreatment

Moein Zarin nejad[1]*, Maryam Ahmadi[1], Reza Amiri Chayjan[2]
1. MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Bu-Ali Sina University of Hamedan
2. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Bu-Ali Sina University of Hamedan

Abstract

In this study, changes in moisture content and shrinkage of pistachio samples were studied during the infrared fluidized bed with microwave drying. A laboratory scale infrared fluidized bed with microwave dryer was used to dry the pistachio samples. Initial moisture content of the pistachio was obtained 56% (d.b.). The samples were dried under the following drying conditions: air temperatures at 45, 65 and 85˚C, air velocity at fix level of 2.29 m/s, infrared power at 500, 1000 and 1500 W and microwave power at 270, 450 and 630 W. The results showed that the drying time decreased with increasing temperature from 45 to 85 ˚C. Also effect of air temperature, infrared power and microwave power on the shrinkage of pistachio samples was investigated. The results showed that with increasing temperature, microwave and infrared powers, shrinkage value was increased. Maximum and minimum values of shrinkage for pistachio samples were achieved between 2.91 and 21.78%. The optimized operational point of the drying process was occurred at air temperature of 45˚C, infrared power of 1500 W and microwave power of 630 W. The best shrinkage value was obtained 6.2677% with drying time of 33.65 min.

Key Words: infrared fluidized bed with microwave dryer, Pistachio, shrinkage, Moisture content