سینتیک خشک‌کردن و بهینه‌سازی چروکیدگی پسته در خشک‌کن بستر سیال به کمک میکروویو

معین زرین نژاد[1] *، رضا امیری چایجان[2]
1-دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا،
moeinzarin1367@yahoo.com
۲-دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا

چکیده

بهینه‌سازی و مدل‌سازی فرآیند به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل افزایش بازدهی فرآیندهای حرارتی به شمار می‌رود. پیداکردن روابط بین عوامل مؤثر و محصول نهایی برای محققین بسیار ارزشمند است. در این پژوهش یک خشک‌کن بسترسیال به کمک میکروویو آزمایشگاهی برای خشک کردن نمونه‌های پسته استفاده شد. رطوبت اولیه نمونه‌های پسته ۰/۵۵۷ برپایه خشک بدست آمد. برای خشک‌کردن نمونه ها از سه سرعت هوای ورودی ۱/۲، ۲/۹۳و ۴/۰۱ متر بر ثانیه و سه دمای هوا ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سلیسیوس و سه سطح توان میکروویو ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات استفاده شد. چروکیدگی نمونه‌های پسته بعد از خشک‌شدن اندازه-گیری شد. بیشترین مقدار درصد چروکیدگی در دمای ۷۰درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲/۹۳ متر بر ثانیه و کمترین مقدار درصد چروکیدگی در دمای ۴۰درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱/۲ متربرثانیه اتفاق افتاد. نتایج بهینه‌سازی خشک‌کردن پسته در خشک-کن مورد استفاده مقادیر بهینه برای چروکیدگی ۱۴/۴۱٪ در دمای ۷۰°C، سرعت هوای ۱/۲ متربرثانیه و توان میکروویو ۵۶۰ وات مشاهده شد.

واژه های کلیدی: خشک‌کردن، بهینه‌سازی، پسته، چروکیدگی

مقدمه

در ایران تولید پسته افزایش چشمگیری پیدا کرده و 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. پسته چربی بالایی دارد و بسیار غنی از اسیدهای چرب اشباع نشده است و این باعث می‌شود پسته بسیار حساس به آلودگی و فساد باشد. خشک کردن و عملیات ذخیره سازی تا حد زیادی بر کیفیت محصول تأثیر می‌گذارد (Kashaninejad and Mortazavi, 2007).

از آنجا که محتوای رطوبتی زیاد محصولات کشاورزی طول دوره انبارداری آنها را کاهش می

به روش مصنوعی محتوا

است که برای کاهش محتوای رطوبتی محصولات کشاورزی به طور گسترده استفاده شده است. سینیتیک خشک تغییرات زمانی مقادیر متوسط رطوبت و درجه حرارت ماده بحث می‌کند. بعلت عوامل غیرقابل کنترل، کاهش مقدار رطوبت دانه‌ها به میزان مناسب همیشه در مزارع امکان‌پذیر نیست. در بسیاری از کشورها قیمت دانه‌ها تا قبل از برداشت محصولات جدید بالا می‌باشد. کشاورزان با برداشت دانه‌ها با رطوبت بالا و کاهش مصنوعی رطوبت آنها ممکن است سود خود را افزایش دهند. در نواحی که دو یا سه محصول در سال تولید می‌شود، برداشت دانه‌ها با رطوبت بالا باعث می‌شود که فصل تولید زراعی محصول کاهش یابد. بنابراین برای کشاورزان زمان بیشتری فراهم می‌شود تا به امور دیگر مزرعه بپردازند. برداشت محصول با رطوبت بالا باعث افزایش دوره برداشت محصول می‌گردد که این امر در اکثر نقاط دنیا، سبب بالا رفتن مدت بکارگیری ادوات مکانیزه برداشت در مزارع مکانیزه و یا مدیریت مناسب‌تر در مزارعی که در فصل برداشت مشکل کمبود کارگر پیدا می‌کنند می‌گردد. برداشت دانه‌های مرطوب ضایعات ریزش را کاهش می‌دهد.

روش سطح پاسخ (RSM) با آثار باکس و ویلسون در سال ۱۹۵۱ میلادی شروع شد. این روش مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای بهینه‌سازی فرآیندها مفید بوده و می‌تواند با حداقل منابع و داده‌های کمی، با بکارگیری طرح آزمایشی مناسب، نقطه بهینه چندین متغیر را به طور همزمان تعیین کند. RSM یکی از متداول‌ترین روش‌های بهینه‌سازی است که در علوم غذایی استفاده می‌شود. تئوری قابل درک، بازدهی بالا و سادگی از مزایای این روش می‌باشد.

امواج میکروویو بخشی از طیف الکترومغناطیس هستند که دارای فرکانس ۳۰۰۰۰۰–۳۰۰ مگاهرتز و طول موج ۱ – ۰/۰۰۱ متر در هوا می‌باشد و این طیف بین دی الکتریک و مادون قرمز واقع شده است. در طی فرآیند خشک کردن، شکل و اندازه محصولات تغییر محسوسی می‌کند. تاثیر در خواص فیزیکی آنها به نوبه خود باعث تغییر بافت محصول نهایی (چروکیدگی) و خواص حمل و نقل محصولات خشک می‌شود. در مراحل ابتدایی فرایند خشک شدن سرعت رطوبت‌زدایی از دانه سریع است، زیرا در این مدت رطوبت از لایه‌های درونی به سطح دانه آمده و از آنجا به وسیله جریان هوای گرم از سطح دانه جدا می‌شود. با گذشت زمان عمل انتقال رطوبت از لایه‌های درونی و مغز دانه به سطح آن در مدت زمان بیشتری انجام می‌گیرد.

امواج میکروویو برخلاف اشعه ایکس و گاما، قادر به شکستن پیوندهای شیمیایی و آسیب رسانی به مولکولهای مواد غذایی نیستند. در روش‌های حرارت دهی متداول، گرما از منبع حرارتی خارجی به ماده غذایی منتقل می‌شود. در روش میکروویو، حرارت، در داخل ماده غذایی تولید می‌شود. خشک کردن به کمک میکروویو دارای مزایای متعددی نسبت به روش خشک کردن جابجایی دارد از جمله سرعت خشک کردن بالا، حرارت حداقل در نقاط با آب کمتر و در مکان‌هایی که در آن حرارت مورد نیاز نمی‌باشد، صرفه جویی در مصرف انرژی، کنترل دقیق فرایند و کیفیت بالای محصول (Mayor and Sereno, 2004).

تحقیقات زیادی در مورد خشک کردن محصولات کشاورزی از جمله چروکیدگی و بهینه سازی آنها انجام گرفته است که بـه چنـد نمونه از آنها اشاره می‌شود: کوچک زاده و همکاران (۲۰۱۰) مدل سازی سینتیک خشک کردن پسته را با میکروویو بررسی کردنـد. کورزو و همکاران (۲۰۰۸) بهینه سازی خشک‌کردن لایه نازک ورقه‌های کروبا را مورد بررسی قرار دادند.

چایجان و همکاران (۲۰۱۲)، مدل سازی بعضی از مشخصه‌های خشک‌کردن پسته در شرایط بسترسیال، نیمه‌سـیال و بسـترثابت را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به مطالب بیان شده تا کنون پژوهشی در مورد خشک کردن و بهینه‌سـازی پسـته در خشـک کـن میکروویو بسترسیال انجام نشده است لذا بررسی این تحقیق می‌تواند در کاهش ضایعات خشک‌کردن پسته و کاهش مصرف انرژی که این امر باعث کاهش هزینه می‌شود کمک فراوانی باشد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته و اهمیت محصول پسـته در ایـران و محدود بودن مطالعات انجام شده بر روی خشک کردن پسته با خشک کن‌های مختلف مخصوصاً خشکن میکروویو بستر سیال، ضرورت پژوهش در مورد خشک کردن پسته به کمک این روش پیشنهاد می‌شود. با توجه به عوامل تـاثیر گـذار بـر بهینـه سـازی چروکیدگی در فرآیند خشک‌کردن پسته، روش آماری سطح پاسخ به عنوان گزینه مناسبی برای بهینه‌سازی فرآیند انتخاب شد کـه در آن تاثیر متغیرهای ورودی مختلف از قبیل سرعت هوا، توان میکروویو و دمای هوای ورودی بر روی چروکیدگی مـورد ارزیـابی واقع شد.

هدف این پژوهش عبارت است از بررسی فرایند خشک‌کردن پسته در شرایط بستر سیال به کمک میکروویو و یـافتن نقـاط بهینـه عملکرد دستگاه برای کمینه شدن چروکیدگی به کمک روش سطح پاسخ.

مواد و روش‌ها

پسته تازه رقم فندقی دامغان تهیه شد و برای انجام آزمایش‌ها در یخچال در دمای $3\pm1\ ^{\circ}C$ نگهـداری شـد. مقـدار رطوبـت اولیـه پسته با استفاده از آون بدست آمد. نمونه‌های ۱۴ گرمی در آون در دمای $103\pm1\ ^{\circ}C$ قـرار داده شـد. مقـدار رطوبـت اولیـه پسـته ۰/۵۵۷ برمبنای وزن خشک بدست آمد. برای انجام آزمایش‌های خشک کردن پسته از خشک کن بسترسیال به کمـک میکروویـو که بدین منظور طراحی و ساخته شده است، استفاده شد. این خشک کن دارای یک میکروویو شارپ با حداکثر توان ۹۰۰ وات است و نیز دارای یک دمنده برای سیال کردن دانه‌های پسته می‌باشد که سرعت این دمنده با اینورتری که متصل به موتور دمنده مـی-باشد در آزمایش‌های مختلف تغییر می‌کرد. برای هر آزمایش سرعت دمنده تا پایان آن آزمایش ثابت می‌باشد. دمای داخل محفظـه خشک‌کن و دمای محیط توسط دماسنج دیجیتال Lutron TM-903 با سنسور نوع k ساخت تایوان با دقت $\pm0/1\ ^{\circ}C$ اندازه‌گیری شد. همچنین رطوبت محیط توسط رطوبت سنج Lutron TM-903 سـاخت تـایوان و بـا دقـت $3\pm\%$ RH انـدازه‌گیـری شـد. وزن نمونه‌ها با استفاده از ترازوی AND مدل GF600 ساخت کشور ژاپن با دقت ۰/۰۱ گرم در هر یک ساعت انـدازه گیـری شـد. در

پایان هر آزمایش رطوبت نهایی محصول حاصل شد. آزمایشها در سه سطح سرعت هوا ۴/۰۱، ۲/۹۳، ۱/۲ متربرثانیه و در سه سطح توان میکروویو ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات انجام شد.

روش بهینه سازی

در این مطالعه از نرم افزار Desingn Expert ۷ جهت بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن پسته استفاده شد. تیمارهای مورد آزمایش در خشک‌کن بسترسیال به کمک میکروویو به طور کاملاً تصادفی و در قالب طرح مرکب مرکزی مرکزسطح بهینه‌سازی شدند. نقشه آزمایش بدین شکل بود که برای بهینه‌سازی می‌بایست در این خشک‌کن ۲۰ آزمایش طبق جدول تعیین شده توسط نرم‌افزار، انجام شود. متغیرها و سطوح کدبندی شده آنها برای خشک‌کن در جدول (۱) نشان داده شده است.

در این نرم افزار برای تعیین مقدیر بهینه پاسخ‌ها، ابتدا باید با توجه به نوع متغیر پاسخ، مقادیر بیشینه و کمینه دلخواه، عدد مورد نظر یا محدوده مشخص و مطلوب را مشخص کرد. با تعیین هدف برای متغیرهای پاسخ (چروکیدگی و زمان خشک‌کردن) و مستقل (دمای هوا، سرعت هوا و توان میکروویو)، نرم افزار تیمارهای پیشنهادی را همراه با تابع مطلوبیت هرتیمار ارائه می‌کند. در این پژوهش بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن پسته با توجه به کمترین مقدار چروکیدگی بدلیل حفظ کیفیت محصول برای بازار یابی دارای اهمیت بیشتر قرار گرفت و زمان در درجه اهمیت کمتری انجام شد.

جدول ۱. سطوح کدبندی شده بیشینه، متوسط و کمینه متغیرهای مستقل در خشک‌کن بسترسیال به کمک میکروویو

متغیر	نماد	سطوح کدبندی شده متغیر		
		-۱	۰	۱
دمای هوای ورودی(C)	T	۴۰	۵۵	۷۰
سرعت هوای ورودی(m/s)	V	۱/۲	۲/۹۳	۴/۰۱
توان مایکروویو(W)	W	۲۷۰	۴۵۰	۶۳۰

نقشه آزمایش‌های فرآیندخشک‌کردن پسته برای خشک‌کن بسترسیال به کمک میکروویو در جدول ۲ نشان داده شده است.

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

	مقادیر حقیقی(کد) هر متغیر مستقل (ورودی)			
شماره آزمایش	توان مایکروویو	سرعت هوا	دمای هوا(°C)	تکرار
۱	۴۵۰(۰)	۲/۹۳(۰)	۴۰(−۱)	۱
۲	۴۵۰(۰)	۱/۲(−۱)	۵۵(۰)	۱
۳	۴۵۰(۰)	۲/۹۳(۰)	۴۰ (۰)	۶
۴	۴۵۰(۰)	۲/۹۳(۰)	۷۰(۱)	۱
۵	۶۳۰(۱)	۴/۰۱ (۱)	۷۰(۱)	۱
۷	۶۳۰(۱)	۱/۲(−۱)	۴۰(−۱)	۱
۸	۶۳۰(۱)	۲/۹۳(۰)	۵۵(۰)	۱
۹	۲۷۰(−۱)	۱/۲(−۱)	۴۰(−۱)	۱
۱۰	۲۷۰(−۱)	۴/۰۱ (۱)	۴۰(−۱)	۱
۱۲	۲۷۰(−۱)	۲/۹۳(۰)	۵۵(۰)	۱
۱۴	۲۷۰(−۱)	۴/۰۱ (۱)	۷۰(۱)	۱
۱۵	۴۵۰(۰)	۴/۰۱(۱)	۵۵(۰)	۱
۱۶	۶۳۰(۱)	۴/۰۱ (۱)	۴۰(−۱)	۱
۱۸	۲۷۰(−۱)	۱/۲(−۱)	۷۰(۱)	۱
۱۹	۶۳۰(۱)	۱/۲(−۱)	۷۰(۱)	۱

میزان رطوبت

میزان رطوبت بر پایه خشک عبارت است از وزن آب درون جسم تقسیم بر وزن ماده خشک که با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (۱)$$

که در آن، M_d میزان رطوبت بر پایه خشک، W_w وزن محصول تر(کیلوگرم) و W_d وزن محصول خشک (کیلوگرم) است.

نسبت رطوبت (MR) پسته در طول فرآیند خشک کردن با استفاده از معادله زیر محاسبه شد(Chayjan et al, 2012)

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (۲)$$

که در آن MR نسبت رطوبت و بدون بعد، M رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه خشک (d.b.)، M_e رطوبت تعادلی نمونه‌ها (d.b.)، M_0 رطوبت اولیه نمونه‌ها (d.b.) می‌باشد.

قطر هندسی که برای محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت به کار می‌رود از معادله (۳) بدست آمد (Ozbek and Dadali, 2007):

$$D = (A \times B \times C)^{\frac{1}{3}} \quad (۳)$$

که در آن D قطر هندسی پسته (m)، A قطر بزرگ پسته (m)، B قطر متوسط پسته (m)، C قطر کوچک پسته (m).

چروکیدگی

برای محاسبه چروکیدگی در ابتدا مقدار قطر میانگین هندسی پسته با استفاده از فرمول ۴ محاسبه شد. حجم پسته قبل از خشک-کردن با استفاده از معادله زیر محاسبه شد.

$$V_O = \frac{4}{3}\pi(\frac{D}{2})^3 \quad (۴)$$

که در رابطه بالا V_0 حجم اولیه یا حجم قبل از خشک کردن پسته می‌باشد (m^3). درصد چروکیدگی پسته با استفاده از معادله زیر محاسبه شد .

$$S_b = (1 - \frac{V}{V_O}) \times 100 \quad (۵)$$

S_b درصد چروکیدگی پسته V حجم ثانویه پسته یعنی حجم پسته پس از فرایند خشک شدن (m^3).

نتایج و بحث

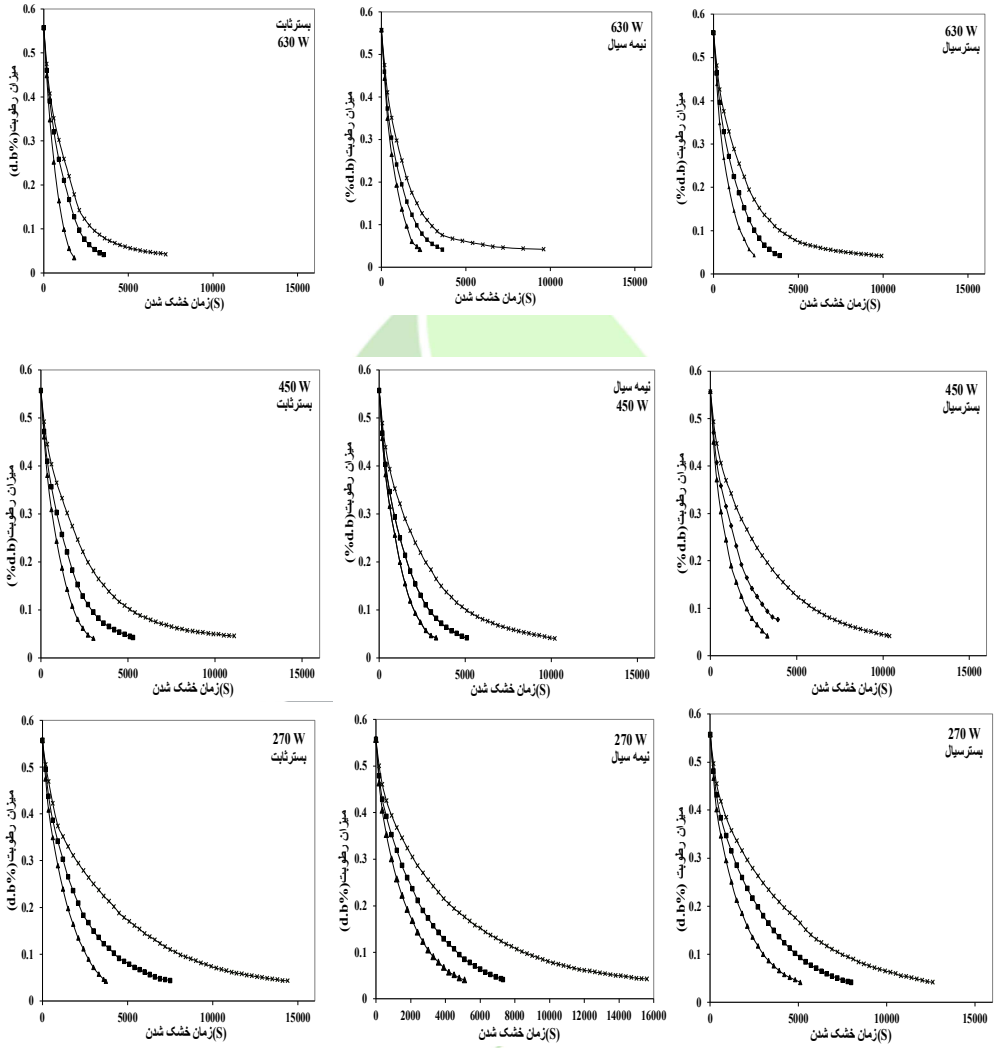
سینتیک خشک کردن

هر محصول به دلیل ترکیبات و ساختمان متفاوت آن که انتقال رطوبت و جرم را در داخل آن تحت تاثیر قرار می
سینتیک خشک شدن مخصوص به خود است. سینتیک خشک‌کردن برای تمام آزمایش ها محاسبه شد و نتایج نشان داد که با افزایش دما، خشک کردن در زمان کوتاه تری انجام می‌گیرد (شکل ۱). این نتایج در نتایج بدست آمده توسط امیری و همکاران (۲۰۱۲)، مدل سازی بعضی از مشخصه‌های خشک‌کردن پسته در شرایط بسترسیال، نیمه‌سیال و بسترثابت نیز مشاهده شد.

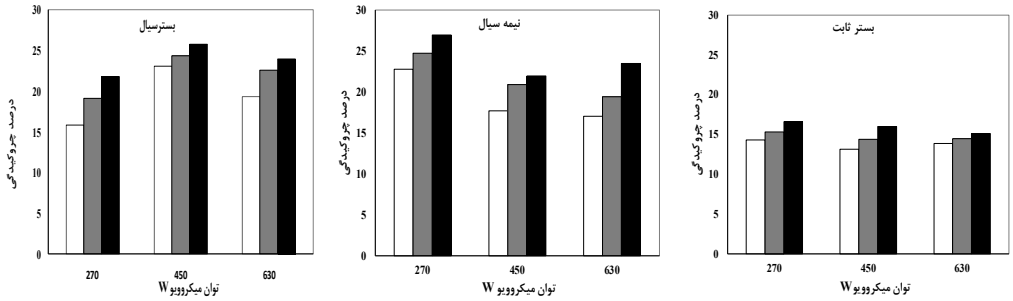
چروکیدگی

مقادیر درصد چروکیدگی(S_b) برای تمامی آزمایش‌ها با استفاده از فرمول ۶ محاسبه شد و در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهده شد که با تغییرات دمای خشک شدن از ۴۰ تا ۷۰ درجه سیلسیوس افزایش چروکیدگی در نمونه‌های پسته رخ خواهد داد. در تمامی آزمایش‌ها مشاهده شد که در دمای ۷۰ درجه سیلسیوس بیشترین مقدار چروکیدگی اتفاق خواهد افتاد. مقادیر چروکیدگی بدست آمده در آزمایشات بین ۲۶/۹۵ درصد تا ۱۳/۸۹ درصد متغیر شد. بیشترین مقدار چروکیدگی (۲۶/۹۵) در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و

سرعت هوای ۲/۹۳ متربرثانیه و کمترین مقدار چروکیدگی در دمای ۴۰ درجه سلیسیوس و سرعت هوای ۱/۲ متربرثانیه اتفاق افتاد. زیرا با افزایش دما سرعت تبخیر سریع‌تر بوده و باعث سریع خشک شدن محصول شده و در نتیجه چروکیدگی بیشتر می‌شود. به طور کلی افزایش دما منجر به افزایش چروکیدگی به علت افزایش پخش رطوبت محصول می گردد که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. سینتیک خشک‌کردن پسته در تمام سطوح آزمایشی (×۴۰ ، ■ ۵۵ و ▲ ۷۰°C)



شکل۲. مقایسه درصد چروکیدگی برای تمامی شرایط بستر مواد و سطوح دمایی (□۴۰ ، ▒ ۵۵ و ■ ۷۰°C)

بهینه سازی

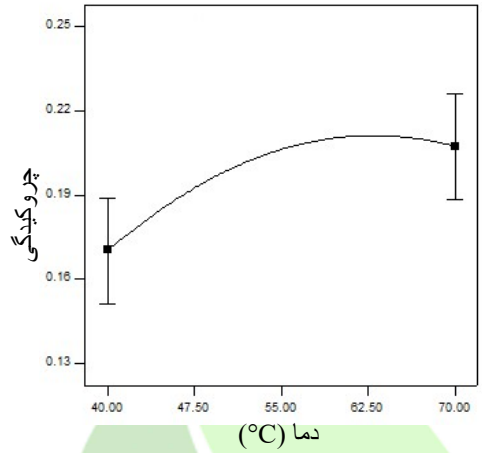
جدول ۳ نتایج حاصل از آنالیز واریانس جهت بررسی اثر دمای هوا، سرعت هوا و توان میکروویو بر چروکیدگی را در خشک‌کن بسترسیال به کمک میکروویو نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که اثر دمای هوا در سطح (۱٪) و اثر سرعت هوا در سطح (۱٪) بر میزان چروکیدگی معنی‌دار می‌باشد. توان میکروویو تاثیر معنی‌داری بر چروکیدگی نداشت. شکل۳ و ۴ به ترتیب تغییرات چروکیدگی در برابر دما و سرعت هوا بر چروکیدگی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج آنالیز واریانس برای چروکیدگی در خشک‌کن بسترسیال به کمک میکروویو

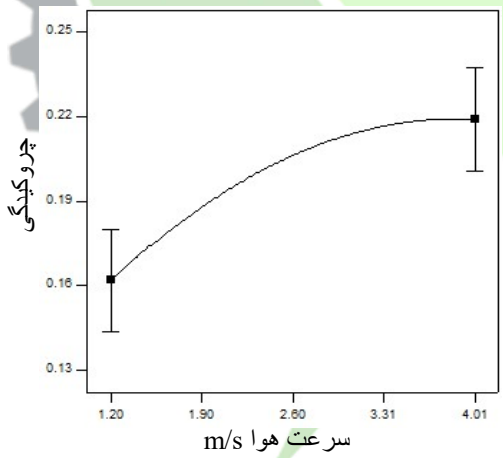
منابع تغییرات	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	p-value Prob > F
مدل	۰/۰۱۹	۲/۱۶×۱۰−۳	۷/۶۳	۰/۰۰۱۹
A(دما)	$۳/۱۶\times۱۰^{-۳}$	$۳/۱۶\times۱۰^{-۳}$	۱۱/۱۹	۰/۰۰۷۴
B (سرعت هوا)	$۷/۵\times۱۰^{-۳}$	$۷/۵\times۱۰^{-۳}$	۲۶/۵۷	۰/۰۰۰۴
C(توان میکروویو)	$۱/۰۳\times۱۰^{-۴}$	$۱/۰۳\times۱۰^{-۴}$	۰/۳۷	۰/۵۵۸۵
A×B	$۶/۳۷\times۱۰^{-۴}$	$۶/۳۷\times۱۰^{-۴}$	۲/۲۵	۰/۱۶۴۱
A×C	$۶/۸۲\times۱۰^{-۵}$	$۶/۸۲\times۱۰^{-۵}$	۰/۲۴	۰/۶۳۳۶
B×C	$۵/۰۴\times۱۰^{-۴}$	$۵/۰۴\times۱۰^{-۴}$	۱/۷۸	۰/۲۱۱۲
A^2	$۸/۵\times۱۰^{-۴}$	$۸/۵\times۱۰^{-۴}$	۳/۰۱	۰/۱۱۳۳
B^2	$۶/۱۵\times۱۰^{-۴}$	$۶/۱۵\times۱۰^{-۴}$	۲/۱۸	۰/۱۷۰۸
C^2	$۶/۴۵\times۱۰^{-۵}$	$۶/۴۵\times۱۰^{-۵}$	۰/۲۳	۰/۶۴۳
باقیمانده	$۲/۸۲\times۱۰^{-۳}$	$۲/۸۲\times۱۰^{-۴}$		
کل	۰/۲۲۰			

در خشک‌کن بسترسیال میکروویو، مهمترین متغیر تاثیر گذار 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 در نتیجه چروکیدگی بیشتر می شود. در تمامی آزمایش‌ها مشاهده شد که در دمای ۷۰ درجه سیلسیوس بیشترین مقدار چروکیدگی اتفاق خواهد افتاد. مقادیر

چروکیدگی بدست آمده در آزمایشات بین ۲۶/۹۵ درصد تا ۱۳/۸۹ درصد متغیر بود. بیشترین مقدار چروکیدگی (۲۶/۹۵) در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲/۹۳ متربرثانیه و کمترین مقدار چروکیدگی (۱۳/۸۹) در دمای ۴۰ درجه سلیسیوس و سرعت هوای ۱/۲ متربرثانیه اتفاق افتاد.



شکل۳. تاثیر دمای هوا بر چروکیدگی پسته



شکل٤. تاثیر سرعت هوا بر چروکیدگی نمونه‌های پسته

مدل ریاضی چروکیدگی

معادله چند جمله‌ای (۶) رابطه چروکیدگی و متغیرهای مستقل را در خشک‌کن میکروویو بسترسیال به کمک میکروویو نشان می‌دهد. همچنین اطلاعات آماری مربوطه 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 (۰/۸۷۲) و Adeq.pre (۹/۰۳۲) در خشک‌کن بسترسیال

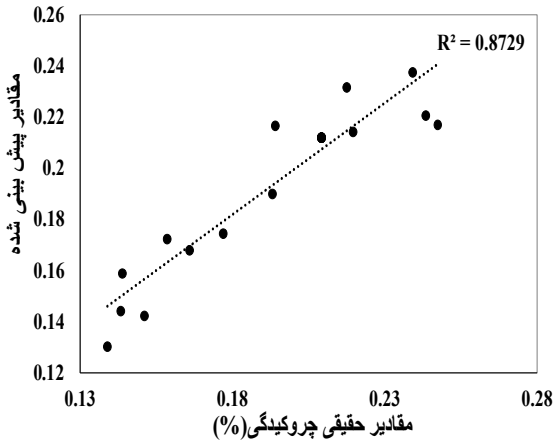
میکروویو نشان دهنده این است که معادله رفتار سیستم را به خوبی پیش‌بینی کرده و مدل ارائه شده کفایت لازم را دارد. شکل ۵ مقادیر حقیقی و پیش‌بینی شده چروکیدگی را در خشک‌کن بستریال به کمک میکروویو نشان می‌دهد.

$$\text{Shrinkage} = -0.1027 + (9.1752 \times 10^{-3} \times T) + (0.0267 \times V) \quad (۶)$$

که در رابطه بالا T دمای هوا (درجه سلیسیوس) و V سرعت هوای ورودی (m/s) می‌باشد.

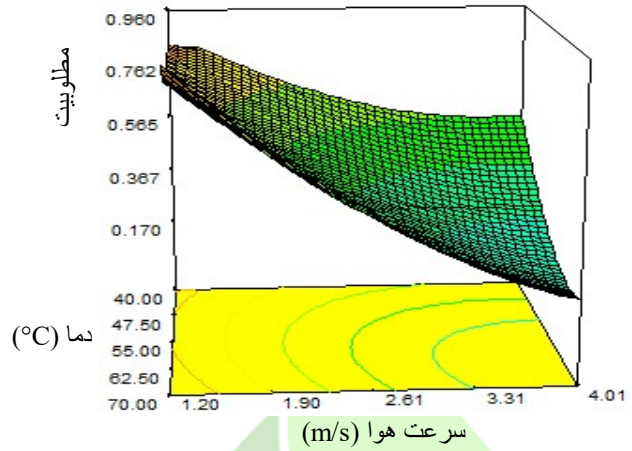
جدول٤. اطلاعات آماری مربوط به مدل تجربی چروکیدگی در خشک‌کن بسترسیال میکروویو

R^2	Adj.R^2	Adeq.pre	Std. Dev.	Mean	C.V. %
۰/۸۷۲۹	۰/۷۵۸۶	۹/۰۳۲	۰/۰۱۷	۰/۱۹	۸/۶۴



شکل۵. مقادیر حقیقی چروکیدگی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده در خشک‌کن بسترسیال میکروویو

با توجه به نتایج بدست آمده در فرآیند بهینه‌سازی، برای رسیدن به کمترین چروکیدگی و نیز کمینه زمان خشک‌شدن، ۱۰ انتخاب پیشنهاد شد که در شکل ۵ یکی از منحنی‌های مطلوبیت بر حسب متغیرهای پاسخ و مستقل در خشک‌کن بسترسیال میکروویو نشان داده شده است. همچنین در جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی و مقادیر شاخص مطلوبیت برای هر تیمار نشان داده شده است. در پایان، در میان کلیه تیمارهای انتخابی توسط نرم‌افزار، مقادیر بهینه با توجه به کمترین چروکیدگی و مقدار کمینه زمان خشک‌شدن برای رسیدن به کیفیت بالای محصول خشک شده و بازار پسندی بالا و سرعت بخشیدن به فرآیند خشک‌کردن پسته انتخاب شدند. در خشک‌کن مورد استفاده مقادیر بهینه برای چروکیدگی ۱۴/۴۱٪ در دمای ۷۰°C، سرعت هوای ۱/۲ متربرثانیه و توان میکروویو ۵۶۰ وات پیشنهاد شد که این فرآیند طبق پیش‌بینی نرم‌افزار در ۰/۹۵۷ ساعت به اتمام خواهد رسید. به دلیل تاثیر زیاد سرعت هوا بر چروکیدگی با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) ، بطوریکه کمترین مقادیر چروکیدگی در آزمایش‌های باسرعت هوای پایین اتفاق افتاد، به همین علت دما در جدول مطلوبیت در حداقل مقدار خود می‌باشد.



شکل٦. منحنی مطلوبیت (سطح بهینه) در توان ۵۶۰ وات و دما و سرعت هوای منتخب، در خشک‌کن میکروویو بسترسیال

جدول۵. نتایج بهینه‌سازی فرایند خشک‌کردن پسته در شرایط میکروویو بسترسیال

شماره آزمایش	دما (°C)	زمان (ساعت)	توان میکروویو (W)	سرعت هوا (m/s)	چروکیدگی (٪)	مطلوبیت
۱	۷۰	۰/۵۵۷	۵۶۰	۱/۲	۱۴/۴۱	۰/۹۵۷
۲	۷۰	۰/۵۶۸	۵۵۷/۰۵	۱/۲	۱۴/۴۲	۰/۹۵۶
۳	۶۹/۸۳	۰/۶۱۴	۵۶۰	۱/۲	۱۴/۴۴	۰/۹۵۴
۴	۷۰	۰/۴۹۵۲	۵۶۰	۱/۲۱	۱۴/۴۸	۰/۹۵۲
۵	۷۰	۰/۶۵۱	۵۴۵/۸۳	۱/۲	۱۴/۴۷	۰/۹۵۱
۶	۶۹/۴۹	۰/۷۴۹	۵۶۰	۱/۲	۱۴/۵۰	۰/۹۴۹
۷	۷۰	۰/۸۳۱	۵۰۶/۹۱	۱/۲	۱۴/۶۶	۰/۹۳۱
۸	۷۰	۲/۱۰۵	۴۸۰/۶۳	۱/۲	۱۴/۸۱	۰/۹۱۵
۹	۷۰	۲/۱۱۷	۴۱۷/۳۴	۱/۲	۱۵/۲۶	۰/۸۷۲
۱۰	۴۳/۵۹	۲/۱۱۸	۵۶۰	۱/۲	۱۳/۸۹	۰/۸۵۲

نتیجه‌گیری

رفتار خشک‌کردن، چروکیدگی و زمان خشک‌کردن پسته در خشک‌کن بسترسیال به کمک میکروویو در سرعت‌های جریان هوا ۱/۲، ۲/۹۳ و ۴/۰۱ متربرثانیه بررسی شد. دمای هوای خشک‌کن عامل مهمی در محاسبه زمان خشک‌شدن، و چروکیدگی بود. مقادیر چروکیدگی بدست آمده در آزمایشات بین ۲۶/۹۵درصد تا ۱۳/۸۹ درصد متغیر شد. بیشترین مقدار چروکیدگی در دمای ۷۰ درجه سلیسیوس و سرعت هوای ۲/۹۳ متربرثانیه و کم‌ترین مقدار چروکیدگی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱/۲

متربرثانیه اتفاق افتاد. نتایج بهینه‌سازی خشک‌کردن پسته در خشک‌کن مورد استفاده مقادیر بهینه برای چروکیدگی ۱۴/۴۱٪ در دمای ۷۰°C، سرعت هوای ۱/۲ متربرثانیه و توان میکروویو ۵۶۰ وات مشاهده شد.

منابع

1. Chayjan, R.A., H.H.A. Alizade, and B. Shsdidi. 2012. Modeling of some pistachio drying characteristics in fix, semi fluid and fluid bed dryer. Agric Engineering International: CIGR Journal 14(2): 143-154.
2. Corozo, O., N. Bracho, A. Vasquez, and A. Pereira. 2008. Optimization of a thin layer drying process for coroba slices. Journal of Food Engineering 85: 372-380
3. Kashaninejad, M., Y. Maghsoudlou, M. Khomeiri, and L.G. Tabil. 2010. Resistance to airflow through bulk pistachio nuts (Kalleghochi variety) as affected by moisture content, airflow rate, bed depth and fill method. Power technology 203: 359-364.
4. Kashaninejad, M. and A. Mortazavi. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. Journal of Food Engineering 78: 98–108.
5. Kouchakzadeh A., and S. Shafeei. 2010. Modeling of microwave-convective drying of pistachios. Energy Conversion and Management 51: 2012-2015
6. Mayor, L., and A. M. Sereno. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: areview. Journal of Food Engineering, 61: 373–386.
7. Ozbek, B., and G. Dadali. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. Journal of Food Engineering, 83: 541–549.

Drying kinetic and optimization of pistachio shrinkage under microwave fluidized bed

Moein Zarin nejad[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

Optimization and process modeling as one of the most important steps is the thermal efficiency of the process. Finding relationships between risk factors and the final product is very valuable for researchers. In this study a laboratory microwave assisted fluidized bed dryer has been used to dry the pistachio kernels. The primaey moisture content of pistachio kernels has been determined 0.557 (d.b.) . drying of the kernels was performed at three levels of air velocity (1.2, 2.93 and 4.01 m/s), three levels of input air tempreture (40, 55 and 70°C) and three level of microwave power (270, 450 and 630W). After drying, the samples shrinkage was computed. Maximum shrinkage percent has been occurred at air temperature of 70°C and air velocity of 2.93 m/s. Minimum shrinkage percent has been achieved at air tempreture of 40°C and air velocity of 1.2 m/s. The optimization results of the drying process used in dryer, the optimization for shrinkage percent 14.41% was occurred at air tempreture of 70˚C, air velocity of 1.2 m/s and microwave power 560 W.

Keywords: Shrinkage ،Pistachio ،Optimization ،Drying