



## مدل‌سازی و تعیین شرایط بهینه فرایند حرارتی پسته رقم احمدآقایی با مایکروویو به روش سطح پاسخ

امین رستمی<sup>۱</sup>، حسن صدرنیا<sup>۲\*</sup>، مهدی خجسته پور<sup>۲</sup>

۱. مربی، گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۲۱، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۵/۲۱، تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۶)

### چکیده

عدم یکنواختی توزیع دما در تمام حجم محصول یکی از مشکلات اصلی فرایندهای حرارتی می‌باشد. این پژوهش با روش سطح پاسخ به منظور مدل‌سازی فرایند حرارتی پسته رقم احمدآقایی با مایکروویو و تعیین شرایط بهینه یکنواختی بیش‌تر توزیع دما در محصول انجام شد. متغیرهای مستقل کمی شامل زمان حرارت‌دهی بین ۲۰-۵۰s و توان مایکروویو بین ۶۳۰ تا ۹۰۰w و متغیر مستقل کیفی شامل موقعیت قرارگیری میله دماسنج در شش نقطه داخل ظرف حاوی پسته و متغیر وابسته (پاسخ) دمای محصول تحت حرارت‌دهی مایکروویو بود. این آزمایشات به صورت جداگانه برای دو نوع شکل ظرف حاوی محصول شامل مکعبی و استوانه‌ای انجام شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد تمامی اثرات اصلی شامل زمان حرارت‌دهی، توان مایکروویو و موقعیت دماسنج؛ در هر دو نوع ظرف مکعبی و استوانه‌ای و همچنین اثرات متقابل در سطح ۱٪، معنی‌دار می‌باشند. بر اساس نتایج به دست آمده یکنواختی توزیع دما در توده محصول به شکل مکعبی بیشتر از شکل استوانه‌ای بود. از سوی دیگر توزیع دما در توان حداقل ۶۳۰w یکنواختی بیشتری نسبت به توان حداکثر ۹۰۰w از خود نشان داد. شرایط بهینه جهت ایجاد یکنواختی بیشتر دما با اعمال فرآیند حرارت‌دهی در مدت زمان ۴۴s تا ۴۵s و با توان ۷۲۰ تا ۷۵۰w برای ظروف استوانه‌ای و مدت زمان ۴۵s تا ۴۷s و با توان ۶۳۰ تا ۶۷۰w برای ظروف مکعبی تعیین گردید. بررسی صحت مدل به دست آمده جهت پیش‌بینی پاسخ، از طریق محاسبه ریشه مربعات میانگین خطا انجام شد. مقدار پایین آن در تمام شش موقعیت از محصول، نشان دهنده نزدیکی مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده است و صحت مدل را تأیید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: پسته، سطح پاسخ، بهینه‌سازی، حرارت‌دهی، مایکروویو.

## ۱. مقدمه

طبق آمار سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، فائو، پسته، *Pistacia vera L.*، بعد از لوبیای بامبارا و گردو، با ۸/۵٪ افزایش تولید از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ میلادی، سریع‌ترین رشد تولید را در جهان داراست [۱]. تولید جهانی پسته در سال ۲۰۱۰ میلادی ۹۵۴۰۸۲ ton بوده است. پسته عمدتاً در خاورمیانه تولید می‌گردد. طبق گزارش فائو در سال ۲۰۱۰ میلادی، پسته در منطقه خاورمیانه به ویژه در ایران و سوریه به ترتیب ۴۴۶۶۴۷ و ۵۷۴۷۱ تن، در برخی از کشورهای مدیترانه از جمله در ترکیه، ایتالیا، یونان، به ترتیب ۱۲۸۰۰۰، ۹۱۷۰ و ۸۹۹۸ تن، در ایالات متحده آمریکا و چین نیز به میزان ۲۳۶۷۷۵ و ۵۸۰۰۰ تن تولید شده است [۲]. از سوی دیگر میزان صادرات پسته ایران در سال ۲۰۱۶ میلادی، ۱۰۶۴۹۳ تن گزارش شده است [۳].

اصلی‌ترین مشکل در ذخیره‌سازی و فروش میوه‌های خشک و محصولات آجیلی از جمله پسته، آلودگی به شب پره هندی است که باعث شکایت‌های مصرف‌کننده [۵] و هم‌چنین موجب کاهش راندمان و کیفیت محصول شده است. تدخین شیمیایی با استفاده از متیل بروماید و فسفین یک روش معمول برای کنترل آفات در میوه‌های خشک و مغزهای خوراکی درختی می‌باشد. با این حال، استفاده از آن‌ها از سال ۲۰۱۵ به دلیل تاثیر منفی بر سلامت انسان و محیط زیست در کشورهای در حال توسعه کاهش داشته است. بنابراین استراتژی‌های توسعه فناوری‌های پس از برداشت برای کنترل آفات جهت حفظ محیط زیست و کیفیت غذایی پسته، از اهمیت زیادی برخوردار است [۴]. راهکارهای غیر-شیمیایی متعددی برای سترون سازی از جمله تابش اشعه یونیزان، ذخیره‌سازی سرد، اتمسفر کنترل شده و فرایندهای حرارتی پیشنهاد شده است [۶-۸].

فرایندهای حرارتی نوین مانند میکروویو با حرارت دهی حجمی موجب کاهش زمان حرارت‌دهی و یا به عبارت دیگر افزایش نرخ حرارت‌دهی می‌گردند. میکروویو در فراوری مواد غذایی به‌عنوان یک منبع حرارتی از دهه ۱۹۴۰ مورد توجه بوده است [۹].

کاربردهای حرارت‌دهی میکروویو در صنعت غذا شامل فرایندهایی مانند خشک کردن، پاستوریزاسیون، استریلیزاسیون، انجماد، خنک کردن و پختن مواد غذایی می‌گردد. گرمایش میکروویو در فراوری مواد غذایی به دلیل توانایی آن در دستیابی

به نرخ حرارت‌دهی بالا، کاهش قابل توجه در زمان پخت، یکنواختی بیش‌تر در گرمایش، کارکرد ایمن، سهولت عملکرد و نگهداری آسان، مورد توجه قرار گرفته است. میکروویو متعلق به امواج الکترومغناطیس است که دامنه فرکانس آن بین ۳۰۰ MHz تا ۳۰۰ GHz متغیر است. فرکانس دستگاه میکروویو خانگی ۲۴۵۰ MHz تعیین شده و این در حالی است که در صنعت فرکانس ۹۱۵-۲۴۵۰ MHz کاربرد دارد. گرمایش میکروویو در مواد غذایی به علت چرخش دوقطبی و یا قطبش یونی رخ می‌دهد. هنگامی که یک میدان الکتریکی متغیر بر روی مولکول‌های آب اعمال می‌شود، مولکول‌های دو قطبی شروع به چرخش نموده و در اثر اصطکاک با محیط تولید گرما می‌نمایند [۱۰]. نفوذ مستقیم میکروویو به مواد غذایی موجب سرعت بیش‌تر گرمایش نسبت به سایر روش‌های حرارت‌دهی متعارف مثل فرهای خانگی می‌گردد [۱۱].

کاهش تغییرات کیفی و افزایش ماندگاری محصولات کشاورزی- غذایی، در فرایندهای حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است. این مهم با کاهش بار میکروبی و غیرفعال سازی آنزیم‌ها از یک سو و یا کنترل حشرات و انگل‌ها از سوی دیگر، ممکن خواهد بود. فرایند حرارتی میکروویو، منجر به نرخ حرارتی بیش‌تر و زمان فرایند کوتاه‌تر می‌گردد [۱۲]. در صنایع غذایی حرارت می‌تواند به طرق مختلف از جمله آتش، آب داغ، هوای گرم، بخار گرم، هوای کنترل شده با دمای بالا، میدان‌های الکتریکی و انرژی الکترومغناطیسی تولید و استفاده شود. طبق بررسی‌های متعدد، استفاده از انرژی الکترومغناطیس برای حرارت‌دهی روی محصولات غذایی و کشاورزی مانند محصولات دانه‌ای و آجیلی، در مقایسه با سایر روش‌ها سریع‌تر است و موجب گرمای داخلی می‌گردد [۱۳]. در سال‌های اخیر کاربردهای میکروویو در صنعت غذا افزایش یافته است. به‌عنوان نمونه می‌توان به تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی [۱۴]، خشک کردن به‌عنوان روش اصلی یا کمکی [۱۵-۱۸]، تف دادن مغزجات مثل پسته [۱۹]، استخراج ترکیبات مختلف از جمله آنتی-اکسیدان [۲۰]، استفاده پیش‌تیماری با اهداف گوناگون [۲۱]، [۲۲] اشاره کرد.

کاربرد امواج الکترومغناطیس در ضدعفونی کردن پسته پس از برداشت بررسی شد. تنها ۵/۱۶ و ۵/۵ min زمان لازم بود تا به ترتیب دمای مرکزی ۱/۸ و ۲ Kg پسته با پوست و بدون پوست

داشت [۲۹]. مدل‌سازی توزیع دما در ژل آگار تحت حرارتی‌دهی مایکروویو بررسی گردید. آزمایشات با سطوح مختلف زمان حرارت‌دهی، نوع تابش مایکروویو (مستمر و غیرمستمر) و اندازه نمونه انجام شد. جهت دستیابی به بالاترین سطح یکنواختی توزیع دما، تابش مستمر امواج مایکروویو در شرایط برابر آزمایش، از جمله مقدار جذب انرژی، نوع آون و اندازه نمونه، پیشنهاد شد [۳۰]. مدل‌سازی نفوذ امواج مایکروویو به داخل محصول گندم نیز بررسی شد. نفوذ امواج به داخل محصول غیرخطی و معادله آن درجه دوم گزارش گردید [۳۱].

هدف از انجام این پژوهش مدل‌سازی و تعیین شرایط بهینه فرایند حرارت‌دهی پسته رقم احمدآقایی با مایکروویو به روش سطح پاسخ می‌باشد. بررسی منابع نشان داد پارامترهای تجربی و آزمایشگاهی از جمله مدت زمان حرارت‌دهی، توان مایکروویو، شکل و نوع محصول در چگونگی توزیع دما داخل محصول، می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد. یکنواختی توزیع دما پس از اتمام فرایند حرارت‌دهی مایکروویو، از عدم وجود اختلاف زیاد دما در نقاط سرد و گرم داخل محصول حکایت دارد. این مهم نشان دهنده کاربرد مفید مایکروویو در صنایع غذایی و نهایتاً موجب افزایش انبارمانی و یا ماندگاری محصول در بسته بندی خواهد شد.

## ۱. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. مواد مصرفی

یکی از ارقام مهم صادراتی پسته ایران، به دلیل بیشترین میزان تولید، بعد از رقم فندق، رقم احمدآقایی است. با عنایت به اهمیت موضوع صادرات و ارزآوری به‌عنوان یکی از اصول اقتصاد مقاومتی و غیر نفتی، در این پژوهش رقم احمدآقایی که به‌عنوان رقم انباری نیز شناخته می‌شود، انتخاب گردید. نمونه‌های آماری از انبارهای شهرستان رفسنجان در استان کرمان به‌عنوان مهمترین مرکز تولید پسته ایران تهیه و در شرایط انباری مطابق با استاندارد ۸۶۸۹ یعنی در دمای  $5 \pm 10^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۶۰٪ نگهداری شد [۳۲]. وزن خشک هر دانه پسته  $0.122 \pm 0.002$  g بود. طول و عرض پسته خشک با پوست به‌طور متوسط و به ترتیب  $20/48$  و  $12/62$  mm اندازه‌گیری شد که تقریباً به شکل مستطیلی کشیده است. مقدار پسته برای هر ظرف و برای هر تکرار آزمایش  $300$  g که حدوداً معادل  $300$  دانه پسته می‌باشد

به  $55^{\circ}\text{C}$  برسد. این در حالی است که برای رسیدن به همین دما با هوای گرم به ترتیب به  $82$  و  $117$  min زمان لازم است. یکنواختی توزیع دما با ترکیب امواج الکترومغناطیس و هوای داغ حاصل گردید. نتایج نشان داد استفاده از امواج الکترومغناطیس می‌تواند به‌عنوان یک راه حل سریع و مناسب جایگزین روش‌های شیمیایی گردد [۲۳]. تأثیر پارامترهای خشک کردن بر شاخص‌های کیفی پسته و تعیین ضرایب نفوذ موثر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین شرایط بهینه فرایند تعیین شد. از میان سطوح مورد مطالعه، دمای  $70^{\circ}\text{C}$ ، سرعت جابه‌جایی هوای خشک کردن  $1$  m/s و ضخامت بستر  $5$  cm به‌عنوان شرایط بهینه پیشنهاد گردید [۲۴].

اثر حرارت‌دهی مایکروویو بر مراحل رشد شب‌پره هندی در پسته در طول دوره نگه‌داری بدون تأثیر معنی‌داری بر کیفیت محصول، مرگ و میر صد در صدی شب‌پره‌ها را به دنبال داشته است [۲۵].

تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه مدل‌سازی توزیع دمایی در فراورده‌های مختلف غذایی صورت گرفته است. توزیع دمایی مواد غذایی مرکب از مرغ و سیب زمینی تحت حرارت‌دهی مایکروویو مطالعه و با سنجش دمای محصول طی فرایند حرارتی، مدل پیش‌بینی توزیع دمایی متناسب با خواص گرمایی و دی‌الکتریک، پیشنهاد شد. مدل بر اساس هندسه محصول، چرخش و تغییر فاز مواد غذایی ارائه شد [۲۶]. مدل‌سازی توزیع دما درون سیب زمینی تحت حرارت‌دهی مایکروویو انجام شد. مدل محاسباتی جهت پیش‌بینی توزیع دما به‌صورت سه بعدی گزارش گردید. برای بهینه‌سازی شرایط شبیه‌سازی از جمله کاهش زمان فرایند، هندسه مدل و ویژگی‌های دی‌الکتریک ماده مدنظر قرار گرفت [۲۷]. همچنین جهت شبیه‌سازی توزیع یکنواخت دما درون سیب زمینی داخل آون مایکروویو، مدلی بر پایه معادلات ماکسول ارائه گردید. تأثیر زاویه چرخش صفحه دوار داخل مایکروفر بر حرارت جذب شده توسط سیب زمینی، معنادار گزارش شد [۲۸]. در تحقیق دیگری تأثیر توان و زمان‌های مختلف فرایند حرارتی مایکروویو بر ویژگی‌های کیفی گردو به‌منظور کنترل آفت مطالعه شد. استفاده نادرست از مایکروویو می‌تواند باعث تغییرات برگشت‌ناپذیر در کیفیت محصول نهایی شود. نتایج نشان داد سطوح مختلف توان و زمان حرارت‌دهی بر تغییرات رنگ و افزایش دمای محصول، در سطح ۵٪ تأثیر معنادار

تعدادی از متغیرها تحت تاثیر قرار می‌گیرد. با کمک این طرح آماری، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و کلیه ضرایب مدل رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل فاکتورها، قابل برآورد هستند [۳۳]. مهم‌ترین مسئله این تحقیق بررسی آثار اصلی و متقابل فاکتورها بود، از این رو طرح آماری سطح پاسخ انتخاب شد.

در روش سطح پاسخ برای هر متغیر وابسته مدلی تعریف می‌شود که آثار اصلی و متقابل فاکتورها را بر روی هر متغیر جداگانه بیان می‌نماید، مدل چند متغیره به صورت معادله (۱) می‌باشد.

$$y_k = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

که در معادله فوق  $y_k$ ، پاسخ‌های پیش بینی شده،  $x_i$  متغیرهای کد شده متغیرهای طبیعی (مستقل)،  $k$  تعداد متغیرها،  $\beta_0$  ثابت مدل،  $\beta_j$  ضرایب متغیرها،  $\beta_{jj}$  ضرایب پارامتر درجه دوم،  $\beta_{ij}$  ضرایب اثرات متقابل متغیرها می‌باشند [۳۴].

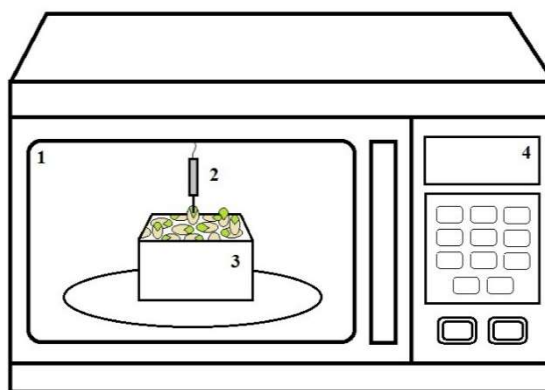
ضرایب از طریق انجام آزمایش و نهایتاً رگرسیون به دست آمدند. برازش سطوح پاسخ و بهینه سازی فرایند حرارت‌دهی با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت انجام شد؛ همچنین تجزیه واریانس بر روی ضرایب مدل درجه دوم با این نرم افزار صورت گرفت.

فاکتورها یا متغیرهای مستقل کمی شامل زمان حرارت‌دهی ۵۰-۲۰ s و توان مایکروویو ۹۰۰-۶۳۰ w و فاکتور یا متغیر مستقل کیفی شامل موقعیت قرارگیری میله دماسنج در ظرف حاوی پسته در شش نقطه از محصول و در سه لایه فوقانی، میانی و تحتانی در وسط و گوشه ظرف و همچنین پاسخ یا متغیر وابسته، دمای محصول تحت حرارت‌دهی مایکروویو بود. آزمایش‌ها به ترتیب برای ظروف مکعبی و استوانه‌ای از جنس پلی پروپیلن ساخت شرکت طب پلاستیک ایران، که هر ظرف حاوی ۳۰۰ g پسته برای هر نمونه بود، به طور جداگانه انجام شد. ظرف مکعبی دارای ارتفاع، طول و عرض به ترتیب ۸/۵، ۱۴/۵ و ۱۰ cm و ظرف استوانه‌ای دارای ارتفاع و قطر به ترتیب ۷/۵ و ۱۲/۵ cm بود. سنجش دمای محصول به کمک میله دماسنج در سه لایه مختلف صورت گرفت. تعیین موقعیت شش نقطه در سه لایه، بر اساس ارتفاع از کف ظرف انجام شد. عنوان مثال در ظرف استوانه‌ای، لایه تحتانی در ارتفاع ۱/۲ cm، لایه میانی در ارتفاع

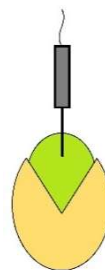
در نظر گرفته شد. شرایط اولیه فرآوری شامل درصد رطوبت ۵٪ بر اساس وزن تر و دمای اولیه ۲۴ °C که همان دمای محیط آزمایشگاه بود، ثبت شد.

## ۲.۲. تجهیزات و وسایل

تابش امواج مایکروویو توسط یک دستگاه مایکروویو بوتان ساخت ایران مدل BUTANE – MX245، با ظرفیت ۲۸ L، انجام شد. دستگاه مایکروویو در شکل (۱) نشان داده شده است. سنجش دمای محصول به کمک یک دماسنج NTC، مدل APT-1,5T، تعبیه شده در محفظه مایکروویو صورت گرفت. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد در مغز پسته سوراخی ایجاد و میله دماسنج مایکروویو در داخل آن قرار گرفت (شکل ۲).



شکل (۱) دستگاه مایکروویو به همراه دماسنج: ۱. محفظه مایکروویو، ۲. دماسنج، ۳. ظرف حاوی پسته، ۴. نمایشگر زمان و دمای سنجش شده  
Fig. 1. Microwave oven with a thermometer: 1. Oven Cavity, 2. Thermometer, 3. Container, 4. Time & Temperature display



شکل (۲) محل قرارگیری میله دماسنج در داخل مغز محصول  
Fig. 2. Placement of the microwave probe thermometer inside the kernel

## ۲.۲. روش اجرای آزمایش‌ها و مبنای تحلیل آماری

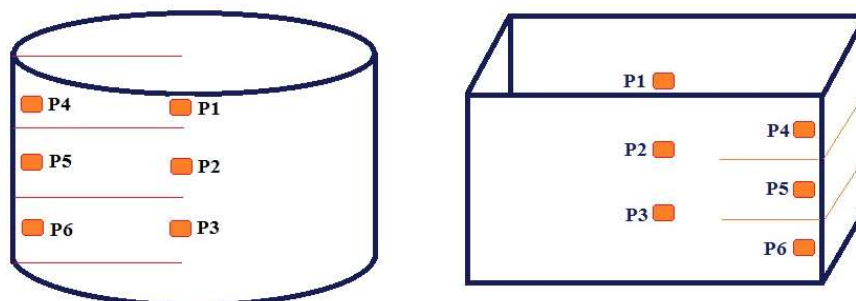
روش سطح پاسخ یکی از روش‌های آماری است که در بهینه‌سازی فرایندهایی به کار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط

گرفتند. با استفاده از الگوریتم مذکور، جملات مدل که از نظر آماری در سطح ۹۵٪ معنی‌دار نبودند، و طبق مدل درجه دوم کاسته شده، حذف شدند. نتایج حاصل از تجزیه واریانس در جدول (۲) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده از جدول فوق، مدل درجه دوم کاسته شده، از نظر آماری در سطح ۹۹٪ معنی‌دار بوده و آزمون عدم برازش آن در سطح ۹۵٪ معنی‌دار نیست، که نشان دهنده مناسب بودن مدل پس از کاهش دادن تعداد جملات غیر معنی‌دار آن است. پارامترهای معنی‌دار مدل شامل اثرات اصلی زمان حرارت‌دهی  $X_1$ ، توان مایکروویو  $X_2$ ، موقعیت دماسنج  $X_3$ ؛ و همچنین اثرات متقابل زمان حرارت‌دهی و توان مایکروویو  $X_1X_2$ ، زمان حرارت‌دهی و موقعیت دماسنج  $X_1X_3$ ، توان مایکروویو و موقعیت دماسنج  $X_2X_3$  و اثر توان دوم زمان حرارت‌دهی  $X_1^2$  می‌باشد. از سوی دیگر مقادیر بالای  $R^2$  و  $R^2_{adj}$  به ترتیب ۰/۹۷۰۰ و ۰/۹۶۳۹، قدرت بالای مدل در پیش بینی فرآیند را تأیید می‌کنند. مدل به دست آمده بر اساس مقادیر ضرایب کد نشده در جدول (۳) نشان داده شده است.

### ۲.۱.۳. ظرف مکعبی شکل

همانند قبل برازش داده‌های حاصل از طرح آزمایش مورد استفاده، بر اساس مدل چند جمله‌ای درجه دوم انجام شد. پس از آن، با استفاده از الگوریتم stepwise، جملات مدل که از نظر آماری در سطح ۹۵٪ معنی‌دار نبودند، و طبق مدل درجه دوم کاسته شده، حذف شدند. جدول (۴) نتایج حاصل از تجزیه واریانس را نشان می‌دهد.



شکل (۳) موقعیت قرارگیری میله دماسنج در شش موقعیت در داخل ظروف مکعبی و استوانه‌ای در محفظه مایکروویو ( $P_1, P_2, \dots, P_6$ )

Fig. 3. The position of the thermometer in six points inside the cubic and cylindrical containers in the microwave oven ( $P_1, P_2, \dots, P_6$ )

۲/۷ cm و لایه فوقانی در ارتفاع ۶/۲ cm از کف ظرف تعیین گردید. در جدول (۱) متغیرهای مستقل فرایند و مقادیر آن‌ها نشان داده شده است.

جدول (۱) متغیرهای فرایند حرارت‌دهی با مایکروویو و سطوح آن‌ها.

Table 1 The variables of the microwave heating process and their levels.

سطوح متغیر Variable levels			نماد Symbol	متغیر variable
-1	0	+1		
20	35	50	$x_1: t$	زمان حرارت‌دهی Heating time (s)
630	765	900	$x_2: P$	توان مایکروویو Microwave power (w)

موقعیت سنجش دمای محصول در ۶ موقعیت در شکل (۳) نمایش داده شده است.

صحت و شایستگی مدل با پارامترهای متعددی سنجیده می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از  $R^2$ ،  $R^2_{adj}$  و عدم برازش. بالا بودن مقدار  $R^2$  همیشه دلالت بر مناسب بودن مدل نمی‌کند، بنابراین ترجیحا از  $R^2_{adj}$  برای ارزیابی شایستگی مدل استفاده می‌شود که باید بالاتر از ۰/۸۵ باشد. همچنین معنی‌دار نبودن عدم برازش، دلیل دیگری بر شایستگی مدل خواهد بود [۳۹-۳۵].

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. تجزیه واریانس (ANOVA)

##### ۱.۱.۳. ظرف استوانه‌ای شکل

برازش داده‌های حاصل از طرح آزمایش مورد استفاده، بر اساس مدل چند جمله‌ای درجه دوم صورت گرفت. پس از برازش مدل، رابطه‌های به دست آمده در معرض الگوریتم stepwise قرار

جدول (۲) تجزیه واریانس مدل چندجمله‌ای درجه دوم برای متغیر پاسخ (ظرف استوانه‌ای).

Table 2 Analysis of the variance of quadratic polynomials for the response variable (cylindrical container).

ارزش P P Value	ارزش F F Value	میانگین مربعات Mean of squares	درجه آزادی Degrees of freedom	مجموع مربعات The sum of squares	منبع Source
< 0.0001**	160.12	494.93	24	11878.40	مدل Model
< 0.0001**	3208.11	9916.09	1	9916.09	X <sub>1</sub> (زمان) Time
< 0.0001**	110.73	342.25	1	342.25	X <sub>2</sub> (توان) Power
< 0.0001**	31.12	96.19	5	480.97	X <sub>3</sub> (موقعیت دماسنج) Position
< 0.0001**	16.22	50.14	1	50.14	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>
0.0006**	4.68	14.46	5	72.29	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>
< 0.0001**	50.64	156.53	5	782.67	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>
0.0090**	7.05	21.78	1	21.78	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>
		3.09	119	367.82	باقیمانده Residual
0.3391 <sup>ns</sup>	1.12	3.38	23	77.82	عدم برازش Lack of Fit
		3.02	96	290.00	خطا Error
			143	12246.22	کل Total
				0.9700	R <sup>2</sup>
				0.9639	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
				3.31	ضریب تغییرات C.V. %

\*\*معنی‌دار در سطح ۱٪، ns: عدم معنی‌داری

\*\* : Significant at level 1%, ns: Non-significant, R<sup>2</sup>: R-Squared, R<sup>2</sup><sub>adj</sub>: Adj R-Squared

جدول (۳) مدل به‌دست آمده برای پیش‌بینی دمای محصول داخل ظرف استوانه‌ای.

Table 3 Model of product temperature prediction inside cylindrical container.

موقعیت Position	مدل Model
P <sub>1</sub>	Temperature = +43.72222 -0.47778* T -0.01604* P +1.17284E-003 * T * P +3.88889E-003* T <sup>2</sup>
P <sub>2</sub>	Temperature = +18.27778 +1.1333* T +0.018148 * P -9.50617E-004 * T * P +3.88889E-003 * T <sup>2</sup>
P <sub>3</sub>	Temperature = +39.51111 -0.35111 * T -0.012593* P +1.13580E-003 * T * P +3.88889E-003 * T <sup>2</sup>
P <sub>4</sub>	Temperature = +40.42222 -0.38667 * T -0.010864 * P +1.08642E-003 * T * P +3.88889E-003 * T <sup>2</sup>
P <sub>5</sub>	Temperature = +33.10000 +0.59556 * T -1.72840E-003* P -1.97531E-004 * T * P +3.88889E-003 * T <sup>2</sup>
P <sub>6</sub>	Temperature = +23.82222 +0.51222* T +9.50617E-003* P +9.87654E-005 * T * P +3.88889E-003* T <sup>2</sup>

T: Time , P: Power

نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد مدل درجه دوم کاسته شده، از نظر آماری در سطح ۹۹٪ معنی‌دار می‌باشد. آزمون عدم برازش در سطح ۹۵٪ معنی‌دار نیست، و این مناسب بودن مدل را نشان می‌دهد. اثرات اصلی زمان حرارت‌دهی X<sub>1</sub>، توان مایکروویو X<sub>2</sub>، موقعیت دماسنج X<sub>3</sub>؛ و هم‌چنین اثرات متقابل زمان حرارت‌دهی و توان مایکروویو X<sub>1</sub>X<sub>2</sub> و موقعیت دماسنج و توان مایکروویو X<sub>2</sub>X<sub>3</sub> معنی‌دار می‌باشند. مقادیر بالای R<sup>2</sup> و R<sup>2</sup><sub>adj</sub> به‌ترتیب ۰/۹۵۲۷ و ۰/۹۵۲۹، نیز نشان دهنده قدرت بالای مدل در پیش‌بینی فرایند می‌باشد. مدل به‌دست آمده برای شش موقعیت مختلف دماسنج بر اساس مقادیر ضرایب کد نشده در جدول (۵) نشان داده شده است.

نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد مدل درجه دوم کاسته شده، از نظر آماری در سطح ۹۹٪ معنی‌دار می‌باشد. آزمون عدم برازش در سطح ۹۵٪ معنی‌دار نیست، و این مناسب بودن مدل را نشان می‌دهد. اثرات اصلی زمان حرارت‌دهی X<sub>1</sub>، توان مایکروویو X<sub>2</sub>، موقعیت دماسنج X<sub>3</sub>؛ و هم‌چنین اثرات متقابل زمان حرارت‌دهی و توان مایکروویو X<sub>1</sub>X<sub>2</sub> و موقعیت دماسنج و توان مایکروویو X<sub>2</sub>X<sub>3</sub> معنی‌دار می‌باشند. مقادیر بالای R<sup>2</sup> و R<sup>2</sup><sub>adj</sub> به‌ترتیب ۰/۹۵۲۷ و ۰/۹۵۲۹، نیز نشان دهنده قدرت بالای مدل در پیش‌بینی فرایند می‌باشد. مدل به‌دست آمده برای شش موقعیت مختلف دماسنج بر اساس مقادیر ضرایب کد نشده در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول (۴) تجزیه واریانس مدل چندجمله‌ای درجه دوم برای متغیر پاسخ (ظرف مکعبی)

Table 4 Analysis of the variance of quadratic polynomials for the response variable (cubic container)

ارزش P	ارزش F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع
P Value	F Value	Mean of squares	Degrees of freedom	The sum of squares	Source
< 0.0001**	223.63	898.29	13	11677.79	مدل Model
< 0.0001**	2599.70	10442.45	1	10442.45	X <sub>1</sub> (زمان) Time
< 0.0001**	164.01	658.78	1	658.78	X <sub>2</sub> (توان) Power
0.0169**	2.88	11.56	5	57.81	X <sub>3</sub> (موقعیت دماسنج) Position
< 0.0001**	57.56	231.20	1	231.20	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>
< 0.0001**	14.32	57.51	5	287.56	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>
		4.02	130	522.18	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>
0.4968 <sup>ns</sup>	0.99	3.99	34	135.52	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>
		4.03	96	386.67	باقیمانده Residual
			143	12199.97	عدم برازش Lack of Fit
				0.9572	خطا Error
				0.9529	کل Total
				3.78	R <sup>2</sup>

\*\*معنی‌دار در سطح ۱٪، ns: عدم معنی‌داری

\*\* : Significant at level 1%, ns: Non-significant, R<sup>2</sup>: R-Squared, R<sup>2</sup><sub>adj</sub>: Adj R-Squared

جدول (۵) مدل به‌دست آمده برای پیش‌بینی دمای محصول داخل ظرف مکعبی.

Table 5. Model of product temperature prediction inside cubic container.

موقعیت	مدل
Position	Model
P <sub>1</sub>	Temperature = +50.59722 + 0.11944 * T - 0.032469 * P + 8.39506E-004 * T * P
P <sub>2</sub>	Temperature = +41.09722 + 0.11944 * T - 0.017654 * P + 8.39506E-00 * T * P
P <sub>3</sub>	Temperature = +25.51389 + 0.1194 * T + 8.64198E-004 * P + 8.39506E-004 * T * P
P <sub>4</sub>	Temperature = +37.79167 + 0.11944 * T - 0.015185 * P + 8.39506E-004 * T * P
P <sub>5</sub>	Temperature = +35.45833 + 0.11944 * T - 0.011481 * P + 8.39506E-004 * T * P
P <sub>6</sub>	Temperature = +29.81944 + 0.11944 * T - 5.30864E-003 * P + 8.39506E-004 * T * P

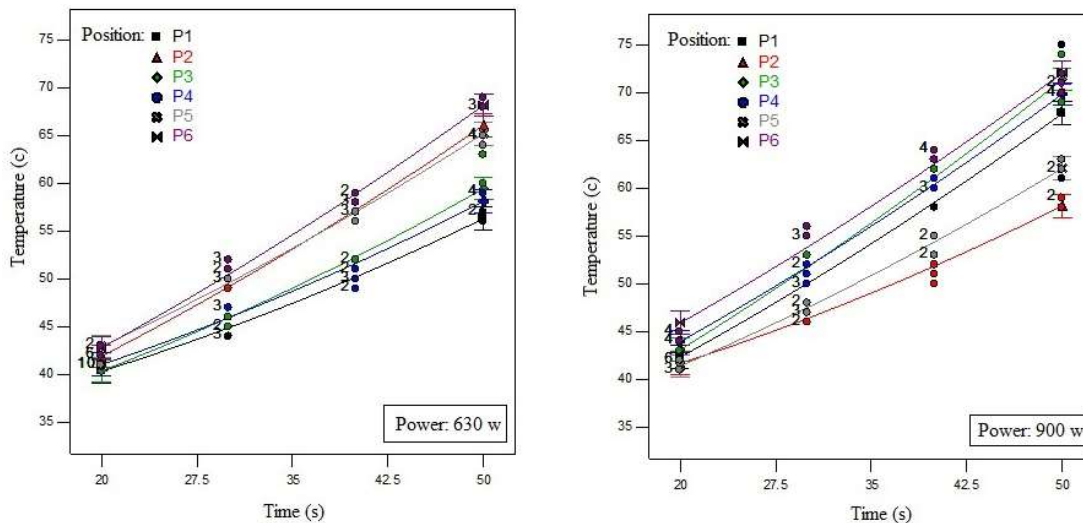
T: Time , P: Power

### ۲.۳. تأثیر متغیرهای مستقل بر پاسخ

توان مایکروویو، و توان مایکروویو و موقعیت دماسنج معنی‌دار می‌باشند. شکل‌های ۴ و ۵، نمودار اثر زمان حرارت‌دهی بر دمای محصول را به ترتیب برای دو نوع ظرف استوانه‌ای و مکعبی در توان حداقل ۶۳۰w و توان حداکثر ۹۰۰w برای شش نقطه از محصول نشان می‌دهد.

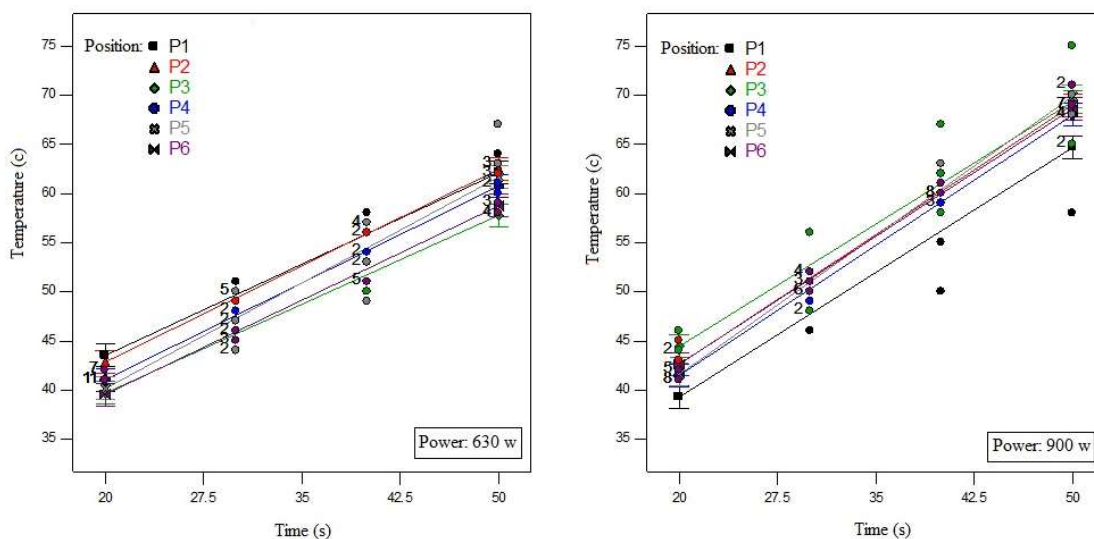
جهت بررسی یکنواختی توزیع دما در شش موقعیت دماسنج در طول مدت حرارت‌دهی با مایکروویو، نمودارها بر اساس تیمارهای جداگانه ترسیم شد. این شیوه با تحلیل برخی از

همان‌طور که در جدول (۲) مشخص است، برای ظرف استوانه‌ای شکل، اثرات اصلی زمان حرارت‌دهی، توان مایکروویو، موقعیت دماسنج و اثرات متقابل زمان حرارت‌دهی و توان مایکروویو، زمان حرارت‌دهی و موقعیت دماسنج، توان مایکروویو و موقعیت دماسنج معنی‌دار می‌باشند. از جدول (۴) نیز مشخص شد برای ظرف مکعبی شکل، اثرات اصلی زمان حرارت‌دهی، توان مایکروویو، موقعیت دماسنج و اثرات متقابل زمان حرارت‌دهی و



شکل (۴) نمودار اثر زمان حرارت‌دهی بر دمای محصول برای ظرف استوانه‌ای در توان حداقل (۶۳۰w) و توان حداکثر (۹۰۰w) برای شش نقطه از محصول ( $P_1, P_2, \dots, P_6$ )

**Fig. 4.** The effect of heating time on the product temperature for a cylindrical container at a minimum (630w) and maximum power (900w) of six points of the product ( $P_1, P_2, \dots, P_6$ )



شکل (۵) نمودار اثر زمان حرارت‌دهی بر دمای محصول برای ظرف مکعبی در توان حداقل (۶۳۰w) و توان حداکثر (۹۰۰w) برای شش نقطه از محصول ( $P_1, P_2, \dots, P_6$ )

**Fig. 5.** The effect of heating time on the product temperature for a cubic container at a minimum (630w) and maximum power (900w) of six points of the product ( $P_1, P_2, \dots, P_6$ )

این مطلوب می‌باشد. از سوی دیگر افزایش دما با افزایش توان میکروویو نیز همراه است. این نشان می‌دهد که روش‌های اجرا شده در محیط میکروویو اعم از نصب و موقعیت داماسنج، حجم و شکل ظرف محصول، قرائت دما و تیمار حرارتی، به خوبی انجام شده است. این نتایج مطابق است با نتایج برخی تحقیقات دیگر از جمله این که رستمی و همکاران در بررسی تأثیر پارامترهای

تحقیقات مطابق است [۳۴، ۴۰ و ۴۱]. نمودارها نشان داد در طی مدت ۵۰ ثانیه زمان حرارت‌دهی، دمای محصول از دمای اولیه یعنی دمای محیط به بیش از  $60^{\circ}\text{C}$  افزایش یافت. همانطور که گرمایش میکروویو افزایش می‌یابد، این گرمایش منجر به افزایش دمای نمونه می‌شود. در تمامی تیمارها روند افزایش دما با افزایش زمان متناسب و به صورت صعودی بوده و



محصول در شش موقعیت مختلف آن، به‌منظور ارائه مدلی کاربردی جهت کاربردهای آتی در راستای دفع حشرات و افزایش انبارمانی محصول، تنها پایان مدت زمان حرارت‌دهی با مایکروویو یعنی ۵۰ s را، مد نظر قرار داد. شکل‌های ۶ و ۷ به‌ترتیب نمودار توزیع دما در پایان زمان حرارت‌دهی بر حسب موقعیت دماسنج برای دو شکل استوانه‌ای و مکعبی و در دو توان حداقل و حداکثر نشان می‌دهد.

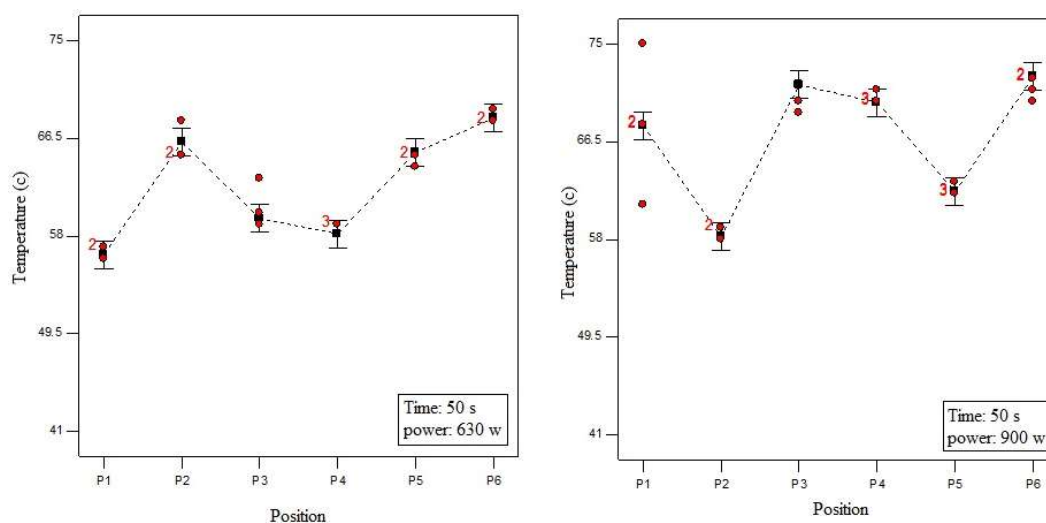
شکل‌های ۶ و ۷ نشان داد که با افزایش توان مایکروویو، دمای محصول پس از اتمام حرارت‌دهی افزایش خواهد یافت. نمودار توزیع دمای نمونه‌های تحت حرارت‌دهی مایکروویو در ظروف مکعبی، صاف‌تر از نمونه‌های درون ظروف استوانه‌ای مشاهده گردید، و این به معنی یکنواختی بیش‌تر توزیع دما خواهد بود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت در پایان مدت حرارت‌دهی مایکروویو، گرمایش یکنواخت‌تر با کم‌ترین اختلاف بین نقاط سرد و گرم برای محصول درون ظروف مکعبی رخ خواهد داد. این نتیجه با نتایج تحقیقات رستمی و همکاران منطبق است [۴۲].

نمودار سطحی اثر متقابل زمان حرارت‌دهی و توان مایکروویو در موقعیت‌های مختلف دماسنج درون محصول داخل ظرف استوانه‌ای و مکعبی به‌ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

مشاهده می‌گردد همانطور که زمان فرایند افزایش یافت، دمای محصول نیز افزایش می‌یابد. دما در توان حداقل ۶۳۰ w در هر دو

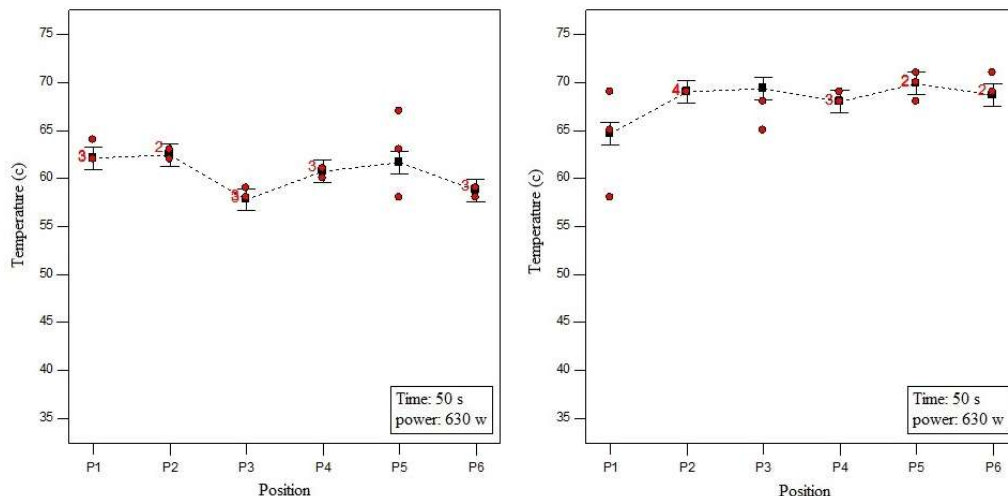
فیزیکی بر یکنواختی توزیع دمای محصول پسته رقم فندقی در حرارت‌دهی با مایکروویو نشان داد دمای محصول در طی مدت ۵۰ s از دمای ۲۰ به بیش از ۶۰°C افزایش داشت [۴۲]. پیتچای و همکاران در بررسی توزیع یکنواختی دما در فرایند انجمادزدایی از ناگت مرغ نشان داد در طول مدت زمان حرارت‌دهی ۹۰ s و توان ۱۲۰۰ w مایکروویو، دمای محصول در لایه فوقانی که ۸ mm از سطح محصول فاصله داشت، از ۵- تا بیش از ۱۰۰°C افزایش یافت [۳۲]. تحقیقات لی یو و همکاران در بررسی توزیع یکنواختی دما در پوره سیب زمینی نشان داد که در طی مدت زمان ۶۰ s، دمای محصول در دو لایه فوقانی و تحتانی، از دمای محیط تا بیش از ۶۰°C به صورت تقریباً خطی افزایش یافت [۳۳]. همچنین پژوهش دیگری نشان داد دمای سیب زمینی در دو لایه فوقانی و تحتانی طی مدت ۳۵ s گرمادهی با مایکروویو از دمای محیط تا بیش از ۶۰°C بصورت تقریباً خطی افزایش یافت [۳۱]. نمودار شکل‌های ۴ و ۵، نشان می‌دهد دمای نقاط مختلف محصول در ظرف مکعبی از همگرایی بیشتری نسبت به ظرف استوانه‌ای برخوردار است.

در پژوهش‌هایی با هدف افزایش ماندگاری محصول پسته از طریق دفع و کنترل حشرات، از حرارت‌دهی با مایکروویو استفاده گردید. با توجه به مرگ و میر صد درصدی حشرات پسته انباری به کمک حرارت‌دهی با مایکروویو با توان ۹۰۰ w در مدت زمان ۵۰ s [۲۵، ۴۳]، می‌توان در بررسی یکنواختی توزیع دمای



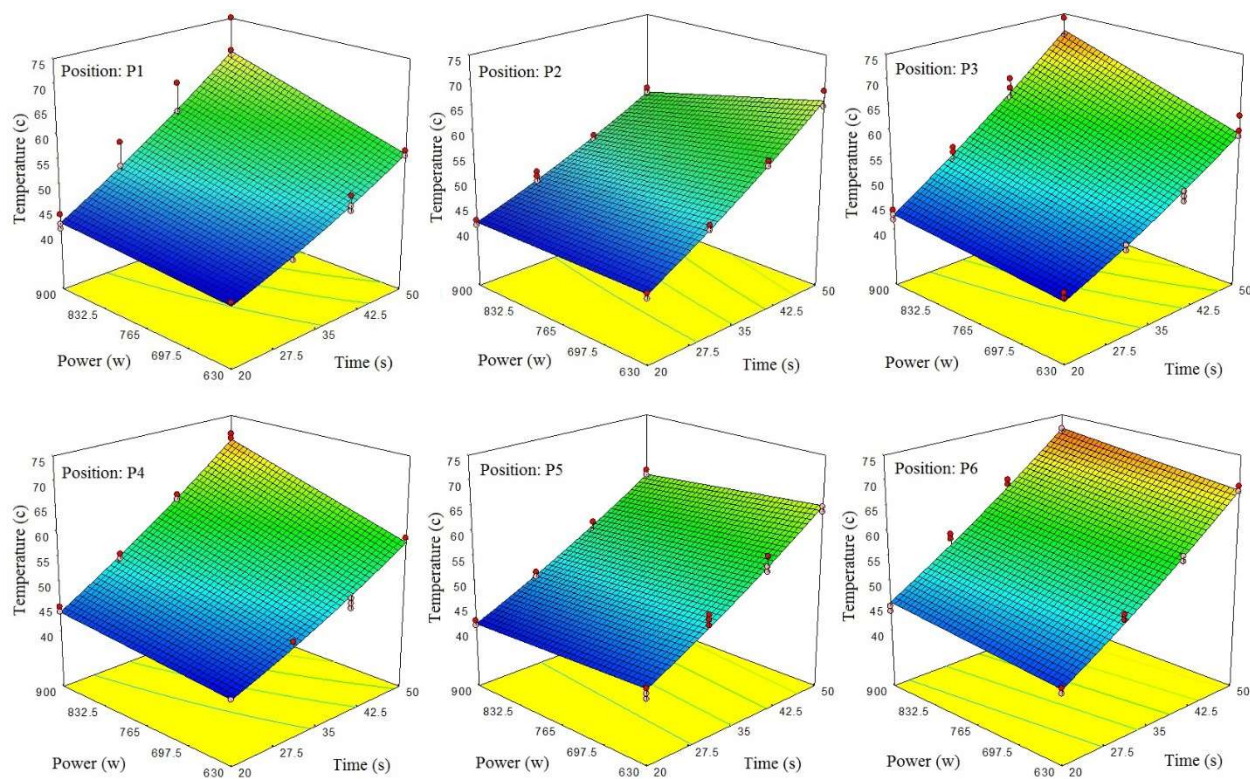
شکل (۶) نمودار توزیع دما در پایان زمان حرارت‌دهی بر حسب موقعیت دماسنج در دو توان حداقل و حداکثر (ظرف استوانه‌ای)

Fig. 6. Distribution of temperature at the end of the heating time according to the position of the thermometer at both minimum and maximum power (cylindrical container)



شکل (۷) نمودار توزیع دما در پایان زمان حرارت‌دهی بر حسب موقعیت دماسنج در دو توان حداقل و حداکثر (ظرف مکعبی)

Fig.7. Distribution of temperature at the end of the heating time according to the position of the thermometer at both minimum and maximum power (cubic container)

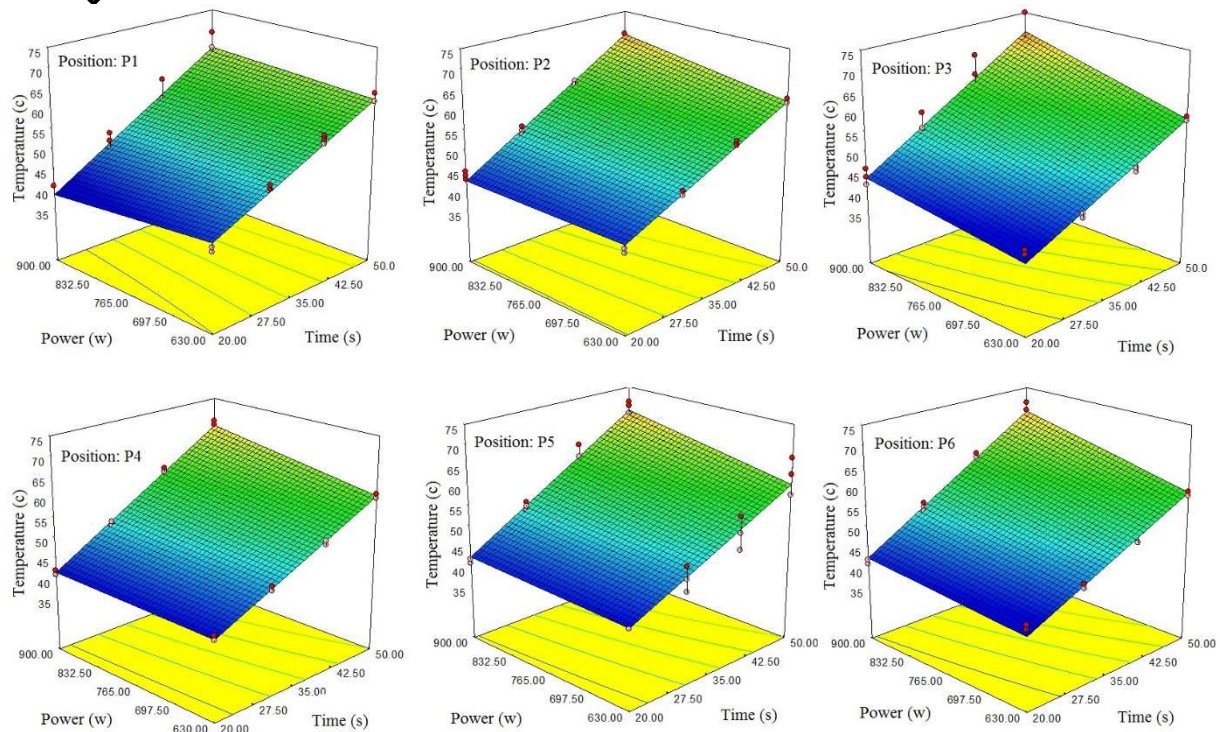


شکل (۸) نمودار سطحی اثر متقابل زمان حرارت‌دهی و توان مایکروویو بر موقعیت‌های مختلف دماسنج درون محصول (ظرف استوانه‌ای)

Fig.8. The interaction between the heating time and the power in different positions of the thermometer inside the product (cylindrical container)

محصول می‌گردد. این موضوع، صحت داده برداری و صحت نتایج آزمایشگاهی را تأیید می‌نماید. از سوی دیگر در فرآیند حرارت‌دهی، دمای محصول داخل ظروف مکعبی پائین تر دمای محصول داخل ظروف استوانه‌ای است.

ظرف مکعبی و استوانه‌ای، پایین‌تر از دما در توان حداکثر ۹۰۰ w است و این مربوط به توان جذب شده توسط نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی است. البته این نتیجه قابل انتظار می‌باشد بدین منظور که توان بیشتر مایکروویو موجب افزایش بیشتر دما در



شکل (۹) نمودار سطحی اثر متقابل زمان حرارت‌دهی و توان میکروویو در موقعیت‌های مختلف دماسنج درون محصول (ظرف مکعبی)  
 Fig.9. The interaction between the heating time and the power in different positions of the thermometer inside the product (cubic container)

میکروویو بود، داشت. این موضوع بیان می‌کند که عدم یکنواختی توزیع دما در محیط میکروویو در توان‌های بالاتر، بیشتر رخ خواهد داد. این نتیجه نیز با تحقیقات لیائو ین‌هانگ و همکاران مطابقت دارد. نتایج آن‌ها نشان داد در توان بالای میکروویو، عدم یکنواختی توزیع دما بیشتر اتفاق خواهد افتاد. این پدیده بخاطر آن است که با افزایش توان، نقاط داغ که گرادیان درجه حرارت بالا در یک مکان خاص است، افزایش و فرار حرارتی یعنی افزایش درجه حرارت غیرقابل کنترل به علت اتلاف دی‌الکتریک بالا و بازخورد مثبت دما از مواد، رخ خواهد داد که موجب افزایش غیریکنواختی توزیع دما می‌گردد [۴۵].

### ۳.۳. بهینه‌یابی

بهینه‌یابی در این پژوهش با هدف پیشنهاد شرایط بهینه یک مدل کاربردی با بالاترین سطح یکنواختی توزیع دما در فرایند حرارت‌دهی میکروویو صورت پذیرفت. با دانستن مدل و شرایط بهینه آن، می‌توان فرآیند حرارت‌دهی میکروویو با شرایط مطلوب یعنی داشتن بیشترین یکنواختی در توزیع دما در داخل محصول را به‌عنوان یک کاربرد مهم در راستای دفع حشرات و افزایش

تمامی تحلیل‌ها نشان داد یکنواختی توزیع دما در توده محصول به شکل مکعبی بیشتر از شکل استوانه‌ای بود. تفاوت اصلی در ظرف مکعبی نسبت به ظرف استوانه‌ای، وجود گوشه یا زاویه در آن است. نتایج حاصله نقش گوشه‌ها در شکل در توزیع دمای میکروویو را نشان می‌دهند. یافته‌های این پژوهش با نتایج تحقیقات ارائه شده از سوی رستمی و همکاران [۴۲] و باتاچاریا و باساک [۴۴] منطبق است. نتایج آنها نیز نشان می‌دهد که شکل‌های گوشه دار مثل مکعب، تأثیر زیادی در یکنواختی توزیع دما میکروویو داشته و نمونه‌های استوانه‌ای ممکن است بهترین انتخاب برای همه مواد غذایی نباشد. تمرکز امواج میکروویو در گوشه‌ها برای حفظ یکنواختی توزیع دما مفید است، بدین معنی که در حرارت‌دهی با میکروویو، در مرحله اول حرارت از مرکز ماده رخ می‌دهد و سپس در مرحله دوم بخاطر شکل‌گیری مناطق جذب توان در گوشه‌ها به علت تمرکز میکروویو در آنجا، تقریباً تمام سطح ماده گرم شده و افزایش یکنواختی دما نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای اتفاق خواهد داد [۴۴].

توزیع دما در توان حداقل ۶۳۰ w یعنی ۷۰٪ توان میکروویو، یکنواختی بیشتری نسبت به توان حداکثر ۹۰۰ w که ۱۰۰٪ توان

انبارمانی مواد غذایی، پیشنهاد نمود. شرایط عملیاتی بهینه برای فرایند حرارت‌دهی پسته رقم احمدآقایی با مایکروویو، با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی عددی به روش تابع مطلوبیت با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت ۷ جستجو شد. جهت تعیین شاخص‌ها و اهداف این نکته قابل توجه است که شرایط بهینه در این مطالعه، برابر است با همگرایی و یکنواختی بیش‌تر دمای محصول در موقعیت‌های مختلف دماسنج در فرایند حرارت‌دهی مایکروویو. از این رو مهم‌ترین هدف بهینه‌یابی قرارگیری تمامی نقاط محصول در محدوده دمایی بین ۵۵ تا ۶۰ °C است تا هدف نهایی از فرایند حرارت‌دهی یعنی از بین بردن حشرات انباری فراهم گردد. انتخاب این محدوده گرمایی به این دلیل است که نتایج تحقیقات نشان می‌دهد آستانه حرارتی حشرات انباری مواد غذایی آجیلی و دانه‌ای حداکثر ۶۰ °C می‌باشد. البته هرچه توان مورد نیاز مایکروویو پائین‌تر باشد نیز مطلوب‌تر است. شاخص‌ها و اهداف بهینه‌سازی برای هر یک از متغیرها و پاسخ فرایند در جدول (۶) نشان شده‌اند.

با اعمال تابع مطلوبیت با شرایط تعیین شده جهت بهینه‌یابی، برای هر موقعیت دماسنج، ۱۰ راه حل جداگانه با میزان مطلوبیت ۱۰۰٪، توسط مدل پیشنهاد گردید. به‌منظور کاهش تعداد راه حل‌ها و تصمیم‌گیری راحت‌تر و مناسب‌تر، دو فاکتور بر اساس تکنیک‌های فرایند سترون‌سازی حرارتی در صنعت غذایی ملاک انتخاب قرار گرفت. شرایط بهینه فرایند حرارتی برای هر موقعیت دماسنج، بر اساس دو فاکتور زمان کم-توان بالا و زمان بالا-توان کم، انتخاب و به‌ترتیب در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. با توجه به داده‌های جدول‌های ۷ و ۸، محدوده زمان، توان و دما در شرایط بهینه فرایند حرارت‌دهی مایکروویو استخراج و در جدول ۹ نشان داده شده است. جهت دست‌یابی به محدوده دمایی ۵۵ تا ۶۰ °C به منظور کمترین اختلاف دمایی در نقاط مختلف محصول و ایجاد یکنواختی بیشتر دما در سطح آن، اعمال فرایند حرارت‌دهی در مدت زمان ۴۴ تا ۴۵ s و با توان ۷۲۰ تا ۷۵۰ w برای ظروف استوانه‌ای و مدت زمان ۴۵ تا ۴۷ s و با توان ۶۳۰ تا ۶۷۰ w برای ظروف مکعبی به‌عنوان شرایط بهینه ارائه گردید.

جدول (۶) شاخص‌ها و اهداف بهینه‌سازی برای هر یک از متغیرها و پاسخ فرایند.

Table 6 Optimization goals for each variables and process response.

متغیرها / پاسخ Variables response	هدف goal	حد پایین Low limit	حد بالا High limit	درجه اهمیت Importance
زمان حرارت‌دهی Heating time	داخل محدوده is in range	20	50	3
توان مایکروویو Microwave power	داخل محدوده is in range	630	900	3
موقعیت دماسنج Thermometer position	داخل محدوده is in range	P <sub>1</sub>	P <sub>6</sub>	3
دما Temperature	داخل محدوده کاهش داده شده the reduced range is in	55	60	3

جدول (۷) شرایط بهینه فرایند حرارتی برای هر موقعیت دماسنج، بر اساس زمان کم - توان بالا.

Table 7 Optimum thermal conditions for each thermometer position (low time - high power).

مطلوبیت Desirability	دما (°C) Temperature	توان بالا (w) high Power	زمان کم (s) low time	موقعیت دماسنج Position	شکل ظرف Container
1.00	56.42	860	39	P <sub>1</sub>	استوانه‌ای Cylindrical
1.00	55.44	844	43	P <sub>2</sub>	
1.00	57.52	863	39	P <sub>3</sub>	
1.00	57.28	869	40	P <sub>4</sub>	
1.00	56.54	845	43	P <sub>5</sub>	
1.00	55.48	865	42	P <sub>6</sub>	
1.00	57.53	757	41	P <sub>1</sub>	مکعبی Cubic
1.00	57.50	747	39	P <sub>2</sub>	
1.00	55.32	752	38	P <sub>3</sub>	
1.00	56.41	745	40	P <sub>4</sub>	
1.00	56.52	742	39	P <sub>5</sub>	
1.00	56.46	751	40	P <sub>6</sub>	

جدول (۸) شرایط بهینه فرایند حرارتی برای هر موقعیت دماسنج، بر اساس زمان بالا- توان کم.

Table 8 Optimum thermal conditions for each thermometer position (high time - low power).

مطلوبیت	دما (°C)	توان کم (w)	زمان بالا (s)	موقعیت دماسنج	شکل ظرف
Desirability	Temperature	low power	high time	Position	Container
1.00	57.97	749	45	P <sub>1</sub>	استوانه‌ای Cylindrical
1.00	58.21	734	44	P <sub>2</sub>	
1.00	59.79	729	45	P <sub>3</sub>	
1.00	58.70	723	45	P <sub>4</sub>	
1.00	59.77	734	44	P <sub>5</sub>	
1.00	59.19	723	45	P <sub>6</sub>	
1.00	59.42	632	45	P <sub>1</sub>	مکعبی Cubic
1.00	59.83	652	45	P <sub>2</sub>	
1.00	56.61	657	45	P <sub>3</sub>	
1.00	58.77	660	46	P <sub>4</sub>	
1.00	58.54	650	45	P <sub>5</sub>	
1.00	58.06	666	47	P <sub>6</sub>	

جدول (۹) محدوده زمان، توان و دما در شرایط بهینه فرایند حرارت‌دهی مایکروویو.

Table 9 Optimum conditions of the microwave heating process (Time, Power & Temperature).

دما (°C)	توان کم (w)	زمان بالا (s)	دما (°C)	توان بالا (w)	زمان کم (s)	شکل ظرف
Temperature	low power	high time	Temperature	high Power	low time	Container
58 -60	720 -750	44 -45	55 -58	840 -870	39 -43	استوانه‌ای Cylindrical
58 -60	630 -670	45 -47	55 -57	740 -760	38 -41	مکعبی Cubic

خشک کردن در دمای هوای ۴۵°C، توان مادون قرمز w ۱۳۱۶ و توان مایکروویو w ۴۷۱ تعیین گردید [۴۷].

### ۴.۳. آزمون صحت مدل

بررسی صحت مدل به دست آمده جهت پیش بینی پاسخ، از طریق محاسبه ریشه مربعات میانگین خطا RMSE انجام شد. مقادیر پیش بینی شده توسط مدل با مقادیر آزمایشگاهی در ۶ نقطه از محصول مقایسه می‌شوند. رابطه (۲)، معادله ریاضی RMSE را نشان می‌دهد [۴۸].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_s - T_e)^2} \quad (2)$$

$T_e$  و  $T_s$  به ترتیب مقادیر پیش بینی شده و آزمایشگاهی و  $n$  تعداد مقادیر به دست آمده در هر نقطه می‌باشد. این آزمون بین مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه و مقادیر به دست آمده از مدل اجرا و نتایج آن در جدول (۱۰) ارائه شده است. در برخی نقاط مقدار RMSE بیش‌تر از بقیه نقاط است که ممکن است به موقعیت قرارگیری دماسنج نسبت داده شود. دشوار است که میله دماسنج را ثابت نگه داشت طوری که در حین حرارت‌دهی همچنان ثابت بماند و جابه‌جا نشود در حالی که صفحه مایکروویو

در پژوهش‌های مختلفی فرایند حرارتی به کمک روش سطح پاسخ مدل‌سازی و بهینه‌یابی شده‌اند. تعیین شرایط بهینه خشک کردن پسته از جمله توان مایکروویو، دمای هوای ورودی و سرعت هوای ورودی بر روی زمان خشک شدن، چروکیدگی و انرژی مصرفی کل پسته در خشک کن مایکروویو بستر سیال مطالعه شد. مقادیر بهینه خشک کردن به کمک روش سطح پاسخ، در توان مایکروویو ۴۴۰ وات، دمای هوای ورودی ۳۸/۴۸ °C و سرعت هوای ورودی ۱/۱۶ m/s به دست آمد [۴۶].

در پژوهشی مدل‌سازی و بهینه‌سازی شرایط فرایند خشک کردن بستر سیال - مایکروویو و تأثیر آن بر ویژگی‌های کیفی تمشک سیاه بررسی شد. تعیین شرایط بهینه شامل توان مایکروویو، دمای هوای ورودی، سرعت جریان هوا، زمان شروع مایکروویو و مقدار ماده، با روش سطح پاسخ و با هدف دستیابی به حداکثر میزان ظرفیت بازجذب آب و حداقل افت محتوای آنتوسیانینی طی فرایند آبیگری مجدد، انجام شد. بین مدل ارائه شده (چند جمله‌ای درجه دوم) و یافته‌های تجربی تطابق خوبی وجود داشت [۳۶]. بهینه‌سازی خشک کردن مغز فندق در خشک کن مادون قرمز با پیش تیمار مایکروویو با استفاده از روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. دمای هوا، توان مادون قرمز و توان مایکروویو به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شد. شرایط بهینه

جدول (۱۰) مقدار RMSE بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش بینی شده توسط مدل.

Table 10 RMSE value between laboratory data and predicted by model.

مکعبی Cubic		استوانه‌ای Cylindrical		موقعیت دماسنج Thermometer position
RMSE (%)		RMSE (%)		
900 w	630 w	900 w	630 w	
3.35	1.47	0.95	1.31	P <sub>1</sub>
1.05	0.86	1.25	0.87	P <sub>2</sub>
3.42	1.24	1.09	1.08	P <sub>3</sub>
0.65	0.62	1.03	3.14	P <sub>4</sub>
1.10	2.93	1.04	3.18	P <sub>5</sub>
1.03	1.20	0.91	0.66	P <sub>6</sub>

اصلی شامل زمان حرارت‌دهی، توان مایکروویو و موقعیت دماسنج؛ در هر دو نوع ظرف مکعبی و استوانه‌ای معنی‌دار است. هم‌چنین اثرات متقابل زمان حرارت‌دهی و توان مایکروویو، زمان حرارت‌دهی و موقعیت دماسنج، توان مایکروویو و موقعیت دماسنج برای ظرف استوانه‌ای و اثرات متقابل زمان حرارت‌دهی و توان مایکروویو، توان مایکروویو و موقعیت دماسنج برای ظرف مکعبی معنی‌دار شد. نتایج نشان داد یکنواختی توزیع دما در توده محصول به شکل مکعبی بیشتر از شکل استوانه‌ای بود. از سوی دیگر توزیع دما در توان حداقل ۶۳۰w یکنواختی بیشتری نسبت به توان حداکثر ۹۰۰w از خود نشان داد. شرایط بهینه جهت ایجاد یکنواختی بیشتر دما با اعمال فرآیند حرارت‌دهی در مدت زمان ۴۴ s تا ۴۵ w و با توان ۷۲۰w تا ۷۵۰ برای ظروف استوانه‌ای و مدت زمان ۴۵s تا ۴۷ w و با توان ۶۳۰ تا ۶۷۰ برای ظروف مکعبی تعیین گردید.

می‌چرخد. علاوه بر این، حفظ همان موقعیت قرارگیری دماسنج در هر تکرار آزمایش نیز یک چالش است و هنوز هم بزرگ‌ترین مشکل در اعتبار سنجی مدل مایکروویو به شمار می‌آید [۴۹]. مقدار پائین RMSE در تمام ۶ موقعیت از محصول، نشان دهنده نزدیکی مقادیر آزمایشگاهی و پیش بینی شده است و صحت مدل را تأیید می‌نماید.

#### ۴. نتیجه گیری

یکی از مشکلات اصلی فرایندهای حرارت‌دهی عدم یکنواختی توزیع دما در تمام حجم محصول و ایجاد نقاط سرد و گرم در آن می‌باشد. این پژوهش با روش سطح پاسخ به منظور مدل‌سازی فرایند حرارت‌دهی با مایکروویو بر پسته رقم احمدآقایی و تعیین شرایط بهینه به منظور یکنواختی بیشتر توزیع دما در محصول انجام شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد تمامی اثرات

#### مراجع

*Food Sci. Emerging Technol.*, 33, 357–364.

[5] Johnson, J., Wang, S., and Tang, J. (2003). Thermal death kinetics of fifth-instar plodia interpunctella (Lepidoptera: Pyralidae). *J. Econ. Entomol.*, 96(2), 519–524.

[6] Hoa, T.T., Clark, C.J., Waddell, B.C., and Woolf, A.B. (2006). Postharvest quality of dragon fruit (*Hylocereus undatus*) following disinfecting hot air treatments. *Postharvest Biol. Technol.*, 41(1), 62–69.

[7] Jiao, S., Johnson, J., Tang, J., Mattinson, D., Fellman, J., Davenport, T., and Wang, S. (2013). Tolerance of codling moth, and apple quality associated with low

[1] FAO Statistical Pocketbook. (2015). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

[2] Arena, E., Ballistreri, G., Fallico, B. (2013). Effect of postharvest storage temperatures on the quality parameters of pistachio nuts. *Czech J. Food Sci.*, 31, 467–473.

[3] Crops and Livestock Products. Pistachios. URL. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/tp>. Accessed 10.04.16.

[4] Ling, B., Hou, L., Li, R., and Wang, S. (2016). Storage stability of pistachios as influenced by radio frequency treatments for postharvest disinfestations. *Innovative*

- properties of pistachio (*Pistacia vera* L.). *Food Sci. Biotechnol.*, 24(6), 136-143.
- [20] Garmsiri, E., Rezaei, M., Shaviklo, A., and Babakhani, A. (2014). Efficiency of microwave radiation on antioxidant compounds extracted from red algae "Hypnea hamulosa" and optimal extraction conditions using response surface methodology (RSM). *IFSTRJ.*, 10(2), 148-155. (in farsi).
- [21] Dehghannya, J., Bagheri-Darvish-Mohammad, H., and Ghanbarzadeh, B. (2016). Moisture loss kinetics modeling during deep-fat frying of potato strips pretreated with ultrasound and microwave. *IFSTRJ.*, 12(1), 109-126. (in farsi).
- [22] Barmour, M., Dehghannya, J., and Ghanbarzadeh, B. (2015). Modeling oil uptake of potato strips pretreated with ultrasound, microwave and osmotic dehydration during deep-fat frying process. *IFSTRJ.*, 10(4), 349-362. (In Farsi).
- [23] Ling, B., Hou, L., Li, R., and Wang, S. (2016). Storage stability of pistachios as influenced by radio frequency treatments for postharvest disinfestations. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 33, 357-364.
- [24] توکلی پور، ح.، کلباسی اشتری، ا.؛ و بصیری، ع. (۱۳۸۷) اثر پارامترهای خشک کردن بر شاخص های کیفی پسته دامغان و تعیین ضرایب نفوذ موثر در شرایط بهینه این فرآیند. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، دوره ۵، شماره ۴، ص ۴۷-۵۶.
- [25] Hajmohammadi, H., Sadrnia, H., and Abbaspour-Fard, M. H. (2013). Effect of microwave heating treatment on mortality of indian meal moth (*Plodia interpunctella*) in pistachio. *Jpp.*, 27(1), 18-25. (in farsi).
- [26] Pitchai, K., Chen, J., Birla, S., Gonzalez, R., Jones, D., and Subbiah, J. (2014). A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: Development and validation. *J. Food Eng.*, 128, 60-71.
- [27] Liu, S., Ogiwara, Y., Fukuoka, M., and Sakai, N. (2014). Investigation and modeling of temperature changes in food heated in a flatbed microwave oven. *J. Food Eng.*, 131, 142-153.
- [28] Geedipalli, S.S.R., Rakesh, V., and Datta, A.K. (2007). Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. *J. Food Eng.*, 82, 359-368
- [29] Das, I., Shah, N. G., and Kumar, G. (2014). Properties of walnut influenced by short T microwave treatment for disinfestation of insect infestation. *J. Stored Prod. Res.*, 59, 152-157.
- [30] Gunasekaran, S., and Yang, H. (2007). Effect of experimental parameters on temperature distribution during continuous and pulsed microwave heating. *J. Food Eng.*, 78, 1452-1456.
- pressure/low temperature treatments. *Postharvest Biol. Technol.*, 85, 136-140.
- [8] Mexis, S.F., and Kontominas, M.G. (2009). Effect of  $\gamma$ -irradiation on the physicochemical and sensory properties of hazelnuts (*Corylus avellana* L.). *Radiat. Phys. Chem.*, 78(6), 407-413.
- [9] Oliveira, M.E.C., Franca, A.S. (2002). Microwave heating of foodstuffs. *J. Food Eng.*, 53, 347-359.
- [10] Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., and Basak, T. (2013). Microwave food processing - A review. *Food Res. Int.*, 52, 243-261.
- [11] Lorence, M.W. and Pesheck, P.S. (2009). Development of packaging and products for use in microwave ovens. CHAPTER 1: Electromagnetic basis of microwave heating. ISBN: 978-1-84569-420-3.
- [۱۲] بخش آبادی، ب.؛ میرزایی، ح.؛ قدس ولی، ع.؛ جعفری، س. م.؛ ضیایی فر، ا.؛ و بیگ بابایی، ع. (۱۳۹۶) تاثیر پیش تیمارهای میدان الکتریکی متناوب و مایکروویو بر برخی از خصوصیات روغن سیاه دانه. *فصلنامه فناوری های نوین غذایی*، سال چهارم، شماره ۱۶، ص ۲۱-۲۹.
- [13] Hansena, J.D. Johnsonb, J.A. and Winter, D.A. (2011). History and use of heat in pest control: a review. *Int. J. Pest Manage.*, 57(4), 267-289.
- [۱۴] سیدآبادی، م.م.؛ آقاجان زاده، س.، کاشانی نژاد، م.؛ و ضیایی فر، ا. (۱۳۹۶) بررسی امواج مایکروویو بر برخی از خصوصیات فیزیوشیمیایی آب نارنج. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، شماره ۶۲، دوره ۱۴، ص ۴۵-۵۶.
- [15] Yousefi, G. and Emam-Djomeh, Z. (2015). Evaluation and optimization drying raspberries and energy consumption in the combined Fluidized bed- Microwaves drying system via response surface methodology. *IFSTRJ.*, 10(4), 327-336. (In Farsi).
- [16] Dehbooreh, R. and Esmaili, M. (2009). Evaluation of microwave and convective finish drying parameters and drying effects on color of dried grapes. *IFSTRJ.*, 5(2), 108 - 122. (in farsi).
- [۱۷] کلانتری، د.؛ و جعفری، ح. (۱۳۹۵) مقایسه پارامترهای خشک شدن و خصوصیات کیفی شلتوک طارم هاشمی با استفاده از مایکروویو جریان مداوم و مایکروویو خانگی. *فصلنامه فناوری های نوین غذایی*، سال سوم، شماره ۱۲، ص ۷۷-۸۸.
- [۱۸] شریفیان، ز.؛ و حسینی قابوس، س. ح. (۱۳۹۶) ویژگیهای فیزیوشیمیایی کدو حلوائی خشک شده به روش ترکیبی آبیگری اسمز-مایکروویو. *فصلنامه فناوری های نوین غذایی*، سال چهارم، شماره ۱۵، ص ۱۳۳-۱۵۰.
- [19] Hojjati, M., Noguera-Artiaga, L., Wojdyło, A., and Antonio Carbonell-Barrachina, A. (2015). Effect of microwaves roasting on physicochemical

foods using feed-back temperature control and surface cooling. *Journal of Food Science.*, 62(1), 150-154.

[41] Pitchai, K., Birla, S.L., Subbiah, J., Jones, D., and Thippareddi, H. (2012). Coupled electromagnetic and heat transfer model for microwave heating in domestic ovens. *Int. J. Food Sci.*, 112, 100-111.

[۴۲] رستمی، ا.، صدرنیا، ح.؛ و خجسته پور، م. (۱۳۹۷) تأثیر پارامترهای فیزیکی بر یکنواختی توزیع دمای محصول پسته رقم فندق در حرارت‌دهی با مایکروویو. *مجله فناوری‌های نوین غذایی*، انتشار آنلاین از تاریخ ۲۷ فروردین ۱۳۹۷، شناسه دیجیتال: 10.22104/jift.2018.2762.1660 (DOI)

[43] El-Naggar, S.M. and Mikhael, A.A. (2011). Disinfection of stored wheat grain and flour using gamma rays and microwave heating. *J. Stored Prod. Res.*, 47(3), 191-196.

[44] Bhattacharya, M. and Basak, T. (2016). A comprehensive analysis on the effect of shape on the microwave heating dynamics of food materials. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 39, 247-266.

[45] Liao, Y., Junqing, L., Chun, Zh., Tao, H., Yang, Y., Kama, H. and Huacheng, Zh. (2016). A phase-shifting method for improving the heating uniformity of microwave processing materials. *Materials* 2016., 9(5), 309, 201-213.

[۴۶] زرین نژاد، م.؛ و امیری چایجان، ر. (۱۳۹۵) تعیین شرایط بهینه خشک کردن پسته در خشک کن مایکروویو بستر سیال. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، شماره ۵۷، دوره ۱۳، ص ۱۳-۲۴.

[۴۷] احمدی قویدلان، م.؛ و امیری چایجان، ر. (۱۳۹۶) بهینه‌سازی خشک کردن مغز فندق در خشک کن مادون قرمز با پیش‌تیمار مایکروویو با استفاده از روش سطح پاسخ. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، شماره ۶۴، دوره ۱۴، ص ۲۱۲-۲۱۹.

[48] Chen, J., Pitchai, K., Jones, D. and Subbiah, J. (2015). Effect of decoupling electromagnetics from heat transfer analysis on prediction accuracy and computation time in modeling microwave heating of frozen and fresh mashed potato. *J. Food Eng.*, 144, 45-57.

[49] Liu, S., Fukuoka, M. Sakai, N. (2013). A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating. *J. Food Eng.*, 115, 49-62.

[31] Ghasemzadeh, S., Pourmirza, A. A., Safaralizadeh, M. H., and Ashouri, Sh. (2012). The control's effect combination of microwave radiation and cold storage on adults *oryzaephilus surinamensis* and *tribolium castaneum*. *Jpp.*, 4, 391-397. (in farsi).

[32] Standard organization of Iran, 8689. brains tree - health procedures. Institute of standards and industrial research of iran. first edition. 36-37. (in farsi).

[۳۳] یوسفی، ق.؛ و امام جمعه، ز. (۱۳۹۳) بررسی و بهینه‌یابی خشک کردن تمشک و انرژوی مصرفی آن در روش خشک کردن ترکیبی بسترسیال - مایکروویو با کمک روش سطح پاسخ. *نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران*، جلد ۱۰، شماره ۴، ص ۳۳۶-۳۲۷.

[۳۴] احمدی قویدلان، م.؛ و امیری چایجان، ر. (۱۳۹۵) استفاده از روش سطح پاسخ جهت بهینه‌سازی خشک کردن فندق در بسترسیال مادون قرمز. *نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی*، جلد ۲۶، شماره ۴، ص ۶۳۹-۶۵۷.

[۳۵] احمدی راد، م.؛ امام جمعه، ز. و اسدی، ح. (۱۳۹۵) بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن پاششی آب زغال اخته با استفاده از روش سطح پاسخ. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، شماره ۵۰، دوره ۱۳، ص ۶۷-۷۸.

[۳۶] یوسفی، ق.؛ امام جمعه، ز.؛ و کرمی، ز. (۱۳۹۵) مدل‌سازی و بهینه‌سازی عوامل موثر در خشک کردن بر خصوصیات کیفی تمشک سیاه با روش سطح پاسخ. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، شماره ۵۰، دوره ۱۳، ص ۵۳-۶۵.

[۳۷] امیری پور، م.؛ حبیبی نجفی، م. ب.؛ محبی، م.؛ و عمادی، ب. (۱۳۹۶) بهینه‌سازی خشک کردن اسمز-هوای داغ گلابی با استفاده از روش سطح پاسخ. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، شماره ۶۲، دوره ۱۴، ص ۵۷-۶۵.

[۳۸] شهیدی، ف.؛ وریدی، م.؛ محبی، م.؛ نوشاد، م.؛ و خلیلیان موحد، م. (۱۳۹۳) بهینه‌یابی شرایط خشک کردن پاششی آب انار با استفاده از روش سطح-پاسخ. *نشریه پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی*، جلد ۳، شماره ۲، ص ۱۲۹-۱۴۲.

[۳۹] شعبانی، ج.؛ میرزایی، ح.؛ دیلمه، م.؛ و جعفری، س.م. (۱۳۹۳) تأثیر روغن گیاهی، دما و زمان پخت بر خصوصیات فیزیکی‌شیمیایی پنیر پروسس آنالوگ گسترده. *فصلنامه علوم و فناوری‌های نوین غذایی*، سال اول، شماره ۴، ص ۸۹-۱۰۳.

[40] Virtanen, A.J., Goedeken, D.L., and Tong, C.H. (2006). Microwave assisted thawing of model frozen