

## مقاله پژوهشی

## تأثیر پارامترهای فیزیکی بر یکنواختی توزیع دمای محصول پسته رقم فندقی در حرارت‌دهی با مایکروویو

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

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۱۶، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۱/۱۵، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱/۲۷)

## چکیده

حرارت دهی یکی از مهم‌ترین روش‌های مرسوم به منظور دسترسی به اهداف گوناگون در فرآوری مواد غذایی است. از مشکلات اصلی تیمارهای حرارتی، وجود نقاط سرد و گرم و به عبارت دیگر عدم توزیع یکنواخت حرارت در محصول می‌باشد. هدف از پژوهش بررسی یکنواختی توزیع دما در پسته رقم فندقی تحت فرایند حرارت دهی مایکروویو در شرایط تحت بررسی است. برای این منظور آزمایش‌های تجربی بر اساس طرح پایه کاملاً تصادفی و در قالب آزمون فاکتوریل  $2 \times 6 \times 4$  صورت پذیرفت. فاکتورهای مستقل شامل شکل ظرف، موقعیت و زمان قرائت دما بود. این آزمایشات به صورت جداگانه برای توان‌های ۹۰۰ و ۶۳۰ W مایکروویو انجام و دمای محصول در چهار زمان و در شش موقعیت مختلف با سه تکرار ثبت گردید. نتایج این پژوهش بر اساس دو نوع تحلیل مقایسه میانگین دمای پایانی نمونه‌ها و تعیین شاخص غیریکنواختی نسبی حرارت در تمام مدت حرارت دهی محصول، گزارش گردید. نتایج تحلیل واریانس نشان داد تمامی اثرات اصلی در هر دو حالت توان اعمالی و برخی از اثرات متقابل در سطح ۱٪ معنی‌دار می‌باشند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد در تیمار مکعبی با توان ۶۳۰ W، در ۵ موقعیت از ۶ موقعیت، هیچ اختلاف معنی‌داری بین میانگین دماهای تحت بررسی وجود ندارد و این بدین معنی است که توزیع دما در موقعیت‌های مختلف محصول در پایان مدت زمان حرارت دهی با مایکروویو، یکنواخت بوده است. پس از آن، تیمارهای مکعبی ۹۰۰ W و استوانه‌ای ۶۳۰ W، با عدم اختلاف معنی‌دار بین ۴ موقعیت از ۶ موقعیت دارای بیشترین یکنواختی در توزیع دما بودند. با محاسبه شاخص غیریکنواختی نسبی توزیع حرارت، بیشترین یکنواختی نیز در تیمار مکعبی با توان ۶۳۰ W و پس از آن در تیمار استوانه‌ای با توان ۶۳۰ W به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: توزیع دما، شکل ظرف، یکنواختی حرارت، تیمار گرمایی، مایکروویو.

## ۱. مقدمه

پسته به دلیل دارا بودن ترکیباتی مانند پروتئین‌ها، ترکیبات فنلی، ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و مواد معدنی از ارزش غذایی بالایی برخوردار است [۱]. علاوه بر این، به دلیل محتوی بالای اسیدهای چرب غیراشباع در پایین آوردن کلسترول خون و هم‌چنین در کاهش عوارض قلبی و عروقی و مرگ و میر مفید است [۲]. اصلی‌ترین کشورهای تولیدکننده پسته به ترتیب ایران، ایالات متحده آمریکا و ترکیه هستند. محصول پسته دومین کالای صادراتی غیر نفتی ایران محسوب می‌گردد که نقش مهمی در صنعت غذا و اقتصاد ملی کشور دارد [۳] و در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی در حوزه‌های مختلف بر روی این محصول انجام شده، از جمله تأثیر محتوای رطوبت و دما بر ظرفیت گرمایی ویژه میوه و مغز پسته، طبقه بندی پسته به کمک تکنیک پردازش تصویر و هم‌چنین بررسی اثر میدان الکترواستاتیک بر ضریب اصطکاک پسته [۴-۶]. بر اساس آمار رسمی و منتشر شده فائو (FAO) پسته دارای جایگاه سوم جهانی به لحاظ رشد کمی ۸/۵٪ طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ میلادی بوده است [۷].

حرارت دهی یکی از مهم‌ترین روش‌های مرسوم به منظور دسترسی به اهداف گوناگون در فراوری مواد غذایی می‌باشد. استفاده از مایکروویو به‌عنوان روش جدیدی در صنایع غذایی مطرح شده است. یکی از مهم‌ترین اهداف در فرایندهای حرارتی مواد غذایی، کاهش افت کیفیت و افزایش ماندگاری محصول بوده که با غیرفعال نمودن آنزیم‌ها، کاهش بار میکروبی، سترون سازی، دفع و کنترل حشرات و انگل‌ها، امکان پذیر می‌باشد. در این فرایند، حرارت دهی در یک مسیر مشخص و انتخابی و بدون اتلاف حرارت در محیط اتفاق می‌افتد، یعنی همانند حرارت دهی در یک سیستم بسته می‌باشد. انرژی این امواج به ماده غذایی نفوذ کرده و حرارت داخلی تولید می‌کند، این مسئله منجر به نرخ حرارتی بیش تر و کوتاه تر شدن زمان فرایند می‌گردد [۸]. یکی از بزرگ‌ترین مشکلات و موانع در فراوری و انبارداری پسته، هجوم حشرات می‌باشد. بحران استفاده از روش‌های مبارزه شیمیایی، علاوه بر خطرات زیانبار زیستی، نفوذ این ترکیبات به درون ماده غذایی و افزایش باقی‌مانده این ترکیبات و تغییر ویژگی‌های ارگانولپتیک را به دنبال دارد [۹].

در سال‌های اخیر کاربردهای مایکروویو در صنعت غذا افزایش یافته است. به‌عنوان نمونه می‌توان به استخراج ترکیبات

آنتی‌اکسیدان [۱۰]، خشک کردن به‌عنوان روش اصلی یا کمکی [۱۵-۱۱]، استفاده پیش‌تیماری با اهداف گوناگون [۱۶، ۱۷] اشاره کرد.

توزیع غیر یکنواخت حرارت در استفاده از مایکروویو محدودیت‌هایی ایجاد می‌نماید. عدم توزیع یکنواخت حرارت احتمال زنده ماندن حشرات و یا خروج آن‌ها از نمونه تحت تیمار را افزایش می‌دهد. توزیع حرارت در راستای نگره‌داری کیفیت و به حداقل رساندن انرژی مد نظر است. محققین گزارش داده‌اند که عدم یکنواختی توزیع حرارت در ماده غذایی تحت تیمار مایکروویو موجب توسعه نقاط سرد و گرم در ماده غذایی خواهد شد [۱۸]. چرخش ماده غذایی درون مایکروویو می‌تواند در توزیع یکنواخت حرارت موثر باشد. عوامل مختلفی بر توزیع یکنواخت حرارت در مایکروویو بررسی شده است که برخی از آن‌ها عبارتند از شکل نمونه، اندازه نمونه، موقعیت نمونه در داخل مایکروویو، ویژگی‌های دی‌الکتریک نمونه، قدرت مایکروویو و چرخش نمونه داخل مایکروویو [۱۹].

پروفایل دمایی مخلوطی از ناگت مرغ و سیب زمینی له شده منجمد در درون مایکروویو بررسی گردیده است. دما به‌عنوان تابعی وابسته به ویژگی‌های دی‌الکتریک و ترمو فیزیکی مواد از ۱۰ الی ۱۱۰ °C اندازه‌گیری شد. این مدل شامل هندسه، تغییر فاز و چرخش مواد غذایی بود. اثر زاویه چرخش روی پیش بینی دما مطالعه و زاویه چرخش ۴۵ درجه مناسب تشخیص داده شد [۲۰]. هم‌چنین در پژوهش دیگری به بررسی و مدل‌سازی تغییرات دمایی در مواد غذایی گرم (سیب زمینی خشک) درون مایکروویو پرداخته شده است. این مطالعه به تغییرات دمایی در مایکروویو بر اساس مشاهدات پروفایل توزیع دما در مواد غذایی مختلف در طی فراوری پرداخت. برای بهینه سازی شبیه سازی جهت به حداقل رساندن زمان محاسبات از مدل هندسی سه بعدی و ویژگی‌های دی‌الکتریک مواد غذایی بهره برده شد [۲۱].

تأثیر پارامترهای تجربی و آزمایشگاهی روی تعیین مدل توزیع حرارت در ژل آگار استوانه‌ای شکل تحت تابش مایکروویو متناوب و مستمر بررسی شد. در این پژوهش توصیه شد که در شرایط یکسان میزان جذب انرژی، نوع آون و اندازه یکسان نمونه، برای توزیع یکنواخت، بهتر است از تابش متناوب استفاده گردد [۲۲].

در پژوهش دیگری مدل‌سازی توزیع یکنواخت دمایی مواد غذایی (سیب زمینی) در یک آون مایکروویو بر اساس معادلات ماکسول

مربوط به کنترل حشرات نشان داد که شیشه دندان دار نسبت به تیمار حرارتی مایکروویو و پس از آن خنک کردن، حساس تر از شیشه آرد می‌باشد [۲۷]. تیمار حرارتی پس از برداشت به کمک مایکروویو و فرکانس رادیویی برای میوه‌های سیب، بادام، گیلان، گریپ فروت، پرتقال و گردو جهت افزایش ماندگاری بررسی و ویژگی‌های دی‌الکتریک آن‌ها سنجش گردید. دی‌الکتریک میوه‌های تازه به صورت خطی با افزایش دما در فرکانس رادیویی ۲۷ MHz افزایش یافت، اما تقریباً در فرکانس ۹۱۵ MHz مایکروویو ثابت ماند. میزان دما بر ویژگی‌های دی‌الکتریک مغزهای آجیلی در ۲۷ MHz تأثیری نداشت [۲۸].

تأثیر گرمادهی با مایکروویو بر مرگ و میر شب پره هندی در محصول پسته نیز بررسی شد. محققان معتقدند با توجه به میزان مرگ و میر صد در صدی و نیز تغییرات قابل قبول کیفی محصول در زمان‌های مختلف قرار گرفتن در معرض امواج مایکروویو، استفاده از این روش به منظور کنترل آفت در محصول پسته توصیه می‌گردد [۲۹]. همچنین در پژوهشی پایداری انباری پسته تحت تأثیر امواج فرکانس رادیویی به عنوان تیمار ضد عفونی کردن پس از برداشت بررسی شده است. نتایج نشان داد تیمار RF می‌تواند به عنوان یک پروتکل موثر و سریع به صورت جایگزینی مناسب برای تیمارهای شیمیایی معرفی گردد [۳۰].

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای فیزیکی بر یکنواختی توزیع دما تحت تیمار حرارتی مایکروویو به منظور کاهش بار میکروبی محصول پسته رقم فندق در انبار می‌باشد. یکنواختی توزیع دما نشان دهنده عدم وجود اختلاف زیاد دما در نقاط سرد و گرم است که موجب افزایش ماندگاری و انبارمندی محصول خواهد شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. مواد مصرفی

بر اساس اطلاعات جمع آوری شده میدانی و کتابخانه‌ای، ارقام مهم صادراتی پسته ایران، به دلیل بیشترین میزان تولید، دو رقم فندق (که به اوحدی نیز مشهور است) و احمدآقایی می‌باشند. همچنین بیشترین مصرف داخلی که اصطلاحاً آجیلی بیان می‌گردد، به دو رقم اکبری و کله قوچی بدلیل داشتن ظاهری مشتری پسند، اختصاص دارد.

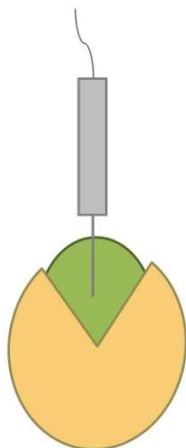
با عنایت به رویکرد اصلی در بحث تولید پسته در کشور، یعنی

در میدان الکترومغناطیس و معادلات انرژی برای گرم کردن با مایکروویو ارائه گردید. گرمای جذب شده توسط ماده غذایی تابع زاویه چرخش سینی دوار درون مایکروویو گزارش شد [۱۹].

یکی از کاربردهای مهم مایکروویو، حرارت دهی است. مطالعات نشان دادند که استفاده از مایکروویو به دلیل عدم آلودگی محیط زیست، جایگزین مناسب و بالقوه تیمارهای شیمیایی و غیرشیمیایی است [۲۳]. در بررسی کنترل *Cryptolestes ferrugineus* در گندم به وسیله تیمار حرارتی مایکروویو، تیمار مایکروویو جمعیت حشرات را به بیش از ۷۵٪ کاهش داد [۲۴].

خواص کیفی گردو تحت تیمار حرارتی مایکروویو نیز مورد بررسی قرار گرفت [۲۳]. همچنین میزان مرگ و میر و رفتار دو نوع حشره انباری مهم میوه‌ها، غلات و حبوبات و محصولات غذایی در مواجهه با دو نوع تابش مداوم و متناوب امواج مایکروویو (۲۴۵۰ MHz) به عنوان تابعی از زمان و توان بررسی شد. از این تئوری برای مدل سازی رابطه دوز- بقا استفاده گردید. هر دو گونه حشره و در تمام مراحل رشدی در دمای ۸۰ °C از بین رفتند. تابش ناپیوسته در فواصل ۱ تا ۵ min عموماً در مرگ و میر حشرات موثرتر از تابش پیوسته است. اختلاف معناداری بین نقاط داغ و سرد در فرآوری مواد توسط مایکروویو صنعتی، مشاهده نگردید [۲۵].

تأثیر امواج مایکروویو با توان‌ها و در زمان‌های مختلف بر مراحل زیستی سه گونه حشره انباری و مهم اقتصادی شامل شب پره هندی، مدیترانه ای آرد و شیشه دندان دار مطالعه شد. امواج مایکروویو با فرکانس ۲۴۵۰ MHz با توان ۱۰۰ w در زمان‌های ۳۳۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ s و با توان ۲۰۰ w در زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ s تابیده شد. در تمام آزمایش‌ها میزان مرگ و میر با افزایش زمان، افزایش یافت [۲۶]. برای بررسی میزان نفوذ امواج مایکروویو به داخل نمونه های گندم، از تابش امواج مایکروویو با فرکانس ۲۴۵۰ MHz با توان ۱۰۰ w در مدت زمان ۱۰ min به صورت پیوسته و ناپیوسته استفاده شد. نتایج نشان داد که نفوذ امواج به داخل نمونه بصورت غیر خطی بوده و معادله مربوطه از نوع درجه دوم می‌باشد. همچنین جهت بررسی تأثیر امواج مایکروویو بر درصد جوانه زنی بذور گندم، امواج در توان‌های ۱۰۰ w و ۲۰۰ w و در مدت زمان ۲، ۴، ۶ و ۱۰ min تابیده شد و معلوم گردید در توان ۲۰۰ w و در مدت زمان ۱۰ min، به شدت درصد جوانه زنی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از آزمایشات



شکل (۲) محل قرارگیری میله ترمومتر در داخل مغز پسته

Fig 2. Placement of the microwave probe thermometer inside the kernel

شامل هندسه توده محصول یا شکل ظرف (دو سطح: مکعبی و استوانه‌ای)، موقعیت دماسنج (شش سطح: ۶ نقطه از محصول در سه لایه تحتانی، میانی و فوقانی) و زمان قرائت دمای محصول (چهار سطح: ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ s) در نظر گرفته شد. این آزمایشات بصورت جداگانه برای توان ۹۰۰ w (۱۰۰٪ توان میکروویو) و ۶۳۰ w (۷۰٪ توان میکروویو) انجام و دمای محصول پسته تحت درمان حرارتی در چهار زمان و در شش موقعیت مختلف داخل محصول به‌عنوان فاکتور وابسته با سه تکرار، سنجش و ثبت گردید. توضیحات مربوط به متغیرها در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱) پارامترهای مورد مطالعه.

Table 1 Parameters studied.

متغیر Variable	سطوح متغیر Variable levels
ظرف Container	مکعبی و استوانه‌ای Cubic and cylindrical
زمان حرارت‌دهی Heating time	20, 30, 40, 50 S
موقعیت ترمومتر Thermometer position	سه لایه فوقانی، میانی و تحتانی در وسط و گوشه ظرف Three Top, middle and lower layers in the middle and corners of the container

موقعیت سنجش دمای محصول در شکل (۳) نمایش داده شده است. ظرف مکعبی با ابعاد (ارتفاع، طول و عرض به ترتیب ۸/۵، ۱۴/۵ و ۱۰ cm) و ظرف استوانه‌ای با ابعاد (ارتفاع و قطر به ترتیب ۷/۵ و ۱۲/۵ cm) در محیط میکروویو استفاده گردید. نوک میله

صادرات و ارز آوری آن به‌عنوان پایه اقتصاد مقاومتی و غیر نفتی، در این پژوهش رقم فندقی که علاوه بر بحث مزبور، به‌عنوان رقم انباری نیز شناخته می‌شود، انتخاب گردید. نمونه‌های آماری رقم فندقی، از انبارهای شهرستان رفسنجان در استان کرمان به‌عنوان مهم‌ترین مرکز تولید پسته ایران تهیه و در شرایط انباری مطابق با استاندارد ۸۶۸۹ (C)  $10 \pm 5$  و رطوبت نسبی ۶۰٪ نگهداری شد [۳۱]. وزن خشک پسته ۰/۹۷۶ g بود. طول، عرض و قطر پسته خشک به‌طور متوسط و به ترتیب ۱۸/۲۴، ۱۱/۷۳ و ۱۱/۶۶ mm اندازه‌گیری شد که تقریباً قطر و عرض پسته با هم مساوی و از این‌رو شکل پسته خشک تقریباً کروی است. مقدار پسته برای هر ظرف و برای هر تکرار آزمایش ۳۰۰ g که معادل ۳۰۰ دانه پسته می‌باشد در نظر گرفته شد. شرایط اولیه فراوری شامل رطوبت ۵٪ بر اساس وزن تر (w.b.%) و دمای اولیه  $24^{\circ}\text{C}$  (دمای محیط آزمایشگاه) ثبت شد.

## ۲.۲. تجهیزات و وسایل

جهت تابش امواج میکروویو از یک دستگاه میکروویو بوتان ساخت ایران (BUTANE – MX245) استفاده گردید (شکل ۱). سنجش دمای محصول به کمک ترمومتر تعبیه شده در محفظه میکروویو انجام شد به‌طوری که در مغز پسته سوراخی ایجاد و میله ترمومتر میکروویو در داخل آن قرار گرفت (شکل ۲).



شکل (۱) دستگاه میکروویو به همراه ترمومتر ۱- ترمومتر، ۲- نمایشگر توان، ۳- نمایشگر دما

Fig 1. Microwave oven with a probe thermometer 1. thermometer, 2. power display, 3. temperature display

## ۲.۲. روش اجرای آزمایش‌ها و مبنای تحلیل آماری

این پژوهش بر اساس طرح پایه کاملاً تصادفی و در قالب آزمایش فاکتوریل  $2 \times 6 \times 4$  صورت پذیرفت. فاکتورهای مستقل

انحراف استاندارد از طریق رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_m)^2}{n-1}} \quad (2)$$

که n تعداد مکان‌های میله ترمومتر،  $X_i$  نرخ گرمایش در موقعیت i، و  $X_m$  مقدار متوسط نرخ گرمایش در n موقعیت مختلف است. از آنجا که SD، شاخص پراکندگی یک توزیع می‌باشد (بدین نحو که هر چه انحراف استاندارد کوچک‌تر، توزیع یکنواخت‌تر خواهد بود)، از این رو RU می‌تواند به‌عنوان یک شاخص جهت تعیین یکنواختی توزیع حرارت در نمونه‌ها عمل نماید؛ به‌طوری که اگر RU کاهش یابد، بیانگر افزایش یکنواختی توزیع حرارت خواهد بود [۳۷].

#### ۱.۴.۲. اندازه گیری نرخ گرمایش

جهت تعیین انحراف استاندارد، باید نرخ گرمایش هر نمونه به‌دست آید. برای محاسبه نرخ گرمایش (HR)، ابتدا باید منحنی دما-زمان هر نمونه تهیه شود که شیب آن برابر با نرخ گرمایش خواهد بود. برای این منظور نمونه‌ها به مدت حداکثر ۵۰ s در توان‌های ۶۳۰ و ۹۰۰ w مایکروویو تحت تیمار حرارتی قرار داده شدند. بر اساس اطلاعات گزارش شده از دما، منحنی دما-زمان در موقعیت‌های مختلف قرارگیری میله ترمومتر در داخل ظروف، ثبت شد. هر آزمایش شامل سه تکرار که انحراف معیار استاندارد نرخ گرمایش حدود ۱۰٪ میانگین بود.

دماسنج بر اساس ارتفاع ظرف در وسط هر یک از سه لایه قرار گرفت به‌عنوان مثال در ظرف استوانه‌ای موقعیت  $P_3$  و  $P_6$  در ارتفاع ۱/۲ cm از کف استوانه، موقعیت  $P_2$  و  $P_5$  در ارتفاع ۲/۷ cm و موقعیت  $P_1$  و  $P_4$  از ارتفاع ۶/۲ cm از کف استوانه منظور گردید. هم‌چنین مقدار پسته تحت حرارت در هر تکرار ۳۰۰ g بود.

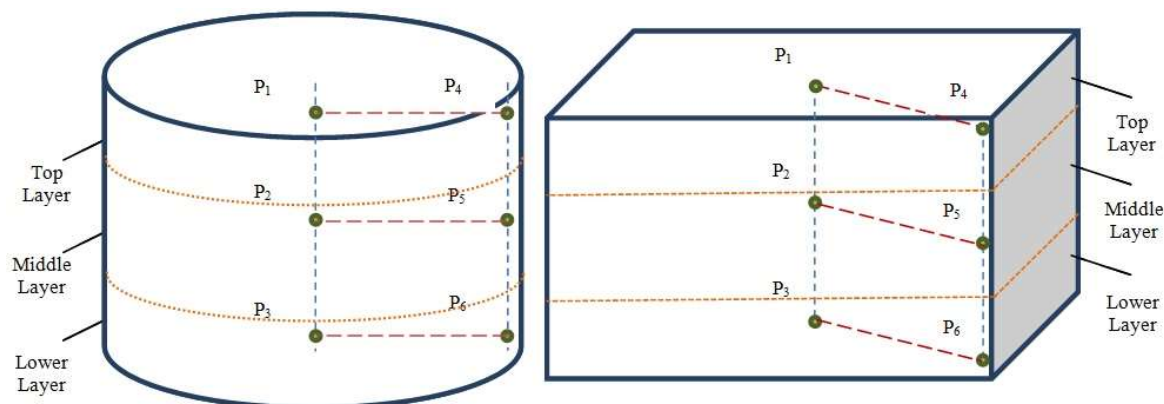
مرتب‌سازی داده‌ها در نرم افزار اکسل و تجزیه واریانس و مقایسه میانگین بین داده‌ها به کمک نرم افزار SAS 9.2 صورت پذیرفت. دمای هر موقعیت از محصول در سه تکرار با سه نمونه اندازه گیری شد.

#### ۴.۲. اندازه گیری توزیع دمای نمونه

برای نشان دادن توزیع دما (TD) در نمونه، میانگین و انحراف استاندارد دماهای اندازه گیری و ثبت شده، محاسبه می‌گردد. از آنجایی که مشخصات دمایی داخل یک نمونه تابعی از زمان و موقعیت می‌باشد، در این صورت کار برای مقایسه پروفیل‌های دما در نمونه‌های دیگر، نسبتاً دشوار خواهد بود. برای حل مشکل، پارامتری به‌عنوان شاخص غیریکنواختی نسبی (%RU) تعریف گردید. این شاخص به کمک رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد [۳۲]:

$$RU = \frac{SD}{SD_r} * 100 \quad (1)$$

که SD انحراف استاندارد نرخ گرمایش اندازه‌گیری شده در مکان‌های مختلف نمونه‌ها و  $SD_r$  انحراف استاندارد مینا می‌باشد.



شکل (۳) شش موقعیت قرارگیری پراب دماسنج مایکروویو در سه لایه فوقانی، میانی و تحتانی محصول در ظرف مکعبی و استوانه‌ای ( $P_1, P_2, \dots, P_6$ )  
**Fig 3.** Oven thermometer probe six position in a three-layer upper, middle and lower product within a cube And cylindrical ( $P_1, P_2, \dots, P_6$ )

جدول (۲) تجزیه واریانس اثرات پارامترهای مورد مطالعه (توان ۶۳۰ w مایکروویو).

Table 2 Analysis of variance of the studied parameters (microwave power 630 w).

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	مجموع مربعات sum of squares	میانگین مربعات Mean of square	F	معنی‌داری Significant
مدل Model	47	6350.94	135.13	17.20**	<0.0001
ظرف Container	1	134.17	134.17	17.08**	<0.0001
موقعیت ترمومتر Thermometer position	5	124.31	28.46	3.62**	<0.0048
زمان حرارت‌دهی Heating time	3	5496.91	1832.30	233.29**	<0.0001
ظرف × موقعیت ترمومتر	5	304.37	60.87	7.75**	<0.0001
ظرف × زمان حرارت‌دهی Container × thermometer position	3	38.69	12.89	1.64 <sup>ns</sup>	0.1848
زمان حرارت‌دهی × موقعیت ترمومتر Heating time × thermometer position	15	113.88	7.59	0.97 <sup>ns</sup>	0.4958
زمان حرارت‌دهی × موقعیت ترمومتر × ظرف Heating time × thermometer position × container	15	120.60	8.04	1.02 <sup>ns</sup>	0.4383
خطا Error	96	754.00	7.85		
کل Total	143	7104.94			

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین دمای پایانی

جدول (۲) نتایج تجزیه واریانس اثر پارامترهای تحت بررسی در توان ۶۳۰ w مایکروویو را نشان می‌دهد. تمامی اثرات اصلی شامل شکل ظرف، موقعیت دماسنج و مدت زمان حرارتی در سطح ۱٪ معنی‌دار می‌باشند. هم‌چنین در آنالیز اثرات متقابل مشخص گردید تنها اثر متقابل (موقعیت دماسنج × شکل ظرف) در سطح ۱٪ معنی‌دار است.

نتایج به‌دست آمده از جدول تجزیه واریانس اثر پارامترهای تحت بررسی در هنگام استفاده از توان ۹۰۰ w مایکروویو، (جدول ۳)، نشان داد که تمامی اثرات اصلی شامل شکل ظرف، موقعیت دماسنج و مدت زمان حرارتی در سطح ۱٪ معنی‌دار بوده‌اند. آنالیز اثرات متقابل نیز نشان می‌دهد که تمامی اثرات متقابل به غیر از (مدت حرارت‌دهی × موقعیت دماسنج × شکل ظرف) در سطح ۱٪ معنی‌دار می‌باشند.

جهت بررسی و نمایش توزیع دما در محصول تحت تیمار مایکروویو، نمودار زمان- دما تهیه گردید. برای بررسی یکنواختی توزیع حرارت در شش نقطه منتخب از محصول در طول مدت

حرارت‌دهی با مایکروویو، نمودارها بر اساس تیمارهای جداگانه ترسیم شد. این شیوه مطابق است با برخی از تحقیقات صورت گرفته [۲۲، ۳۳، ۳۴]. جدول (۴)، مقادیر دمای شش موقعیت از محصول در طول مدت حرارتی برای دو شکل مکعبی و استوانه‌ای با توان ۶۳۰ و ۹۰۰ وات مایکروویو را نشان می‌دهد. به‌طور کلی در طی مدت ۵۰ s دمای محصول از دمای اولیه (دمای محیط) به بیش از ۶۰ °C افزایش می‌یابد.

همانطور که ملاحظه می‌گردد در تمامی تیمارها روند افزایش دما با افزایش زمان متناسب و به‌صورت صعودی (تقریباً خطی) بوده و این مطلوب می‌باشد. از سوی دیگر افزایش دما با افزایش توان مایکروویو نیز همراه است. این نشان می‌دهد که تکنیک‌های اجرا شده در محیط مایکروویو اعم از نصب و موقعیت ترمومتر، حجم و شکل ظرف محصول، قرائت دما و تیمار حرارتی، به خوبی انجام شده است. این نتایج مطابق است با نتایج تحقیقات صورت گرفته از جمله تحقیقات پیتچای و همکاران در بررسی توزیع یکنواختی دما در ناگت مرغ، که نشان داد در طول مدت زمان ۹۰ ثانیه و توان ۱۲۰۰ وات مایکروویو، دمای محصول در لایه فوقانی به میزان ۸ mm از سطح محصول، از ۵- °C تا بیش از

جدول (۳) تجزیه واریانس اثرات پارامترهای مورد مطالعه (توان ۹۰۰ w مایکروویو).

Table 3 Analysis of variance of the studied parameters (microwave power 900 w).

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	مجموع مربعات sum of squares	میانگین مربعات Mean of square	F	معنی داری Significant
مدل Model	47	10008.66	212.95	33.66**	<0.0001
ظرف Container	1	222.51	222.51	35.17**	<0.0001
موقعیت ترمومتر Thermometer position	5	1237.12	247.42	39.11**	<0.0001
زمان حرارت دهی Heating time	3	7718.69	2572.89	406.69**	<0.0001
ظرف × موقعیت ترمومتر	5	356.45	71.29	11.27**	<0.0001
ظرف × زمان حرارت دهی Container × thermometer position	3	86.85	28.95	4.58**	0.0049
زمان حرارت دهی × موقعیت ترمومتر Heating time × thermometer position	15	261.35	17.42	2.75**	0.0015
زمان حرارت دهی × موقعیت ترمومتر × ظرف Heating time × thermometer position × container	15	125.69	8.38	1.32 <sup>ns</sup>	0.2029
خطا Error	96	607.33	6.33		
کل Total	143	10615.99			

جدول (۴)، در تیمار "B" (مکعبی با توان ۶۳۰ وات) در ۵ موقعیت از ۶ موقعیت، هیچ اختلاف معنی داری بین میانگین دما وجود ندارد و این بدین معنی است که توزیع دما در موقعیت‌های مختلف محصول در پایان مدت زمان حرارت دهی با مایکروویو، یکنواخت بوده است. پس از تیمار "B"، تیمارهای "A" (مکعبی با توان ۹۰۰ w) و "D" (استوانه‌ای با توان ۶۳۰ w)، با عدم اختلاف معنی دار بین ۴ موقعیت از ۶ موقعیت دماسنج دارای بیشترین یکنواختی در توزیع دما بوده اند.

به منظور بررسی بیشتر می‌توان توزیع دما در نمونه‌های مختلف را بر اساس منحنی دما-موقعیت در پایان زمان حرارت دهی نشان و توضیح داد [۱۹]. جدول (۶)، مقادیر دمای میانگین سه تکرار در ۴ تیمار مختلف اعم از نمونه‌های درون ظروف مکعبی و استوانه‌ای، در دو توان ۹۰۰ w و ۶۳۰ w، در پایان زمان حرارت دهی ۵۰ s نشان می‌دهد.

جدول (۶) نشان می‌دهد همانطور که گرمایش مایکروویو افزایش می‌یابد، این گرمایش منجر به افزایش دمای نمونه می‌شود. بر اساس این داده ها، نمودار توزیع دمایی (TD) نمونه‌های تحت حرارت مایکروویو در ظروف مکعبی، صاف تر از نمونه‌های درون ظروف استوانه‌ای مشاهده گردید، و این به معنی

۱۰۰ °C افزایش یافت [۲۰]. تحقیقات لی یو و همکاران در بررسی توزیع یکنواختی دما در محصول غذایی نشان داد که در طی مدت زمان ۶۰ s، دمای محصول پوره سیب زمینی در دو لایه فوقانی و تحتانی، از دمای محیط تا بیش از ۶۰ °C به صورت تقریباً خطی افزایش یافت [۲۱]. هم‌چنین در تحقیق دیگری نشان داده شده که دمای محصول سیب زمینی در دو لایه فوقانی و تحتانی طی مدت ۳۵ s گرمادهی با مایکروویو از دمای محیط تا بیش از ۶۰ °C به صورت تقریباً خطی صعود می‌کند [۱۹].

با عنایت به مرگ و میر ۱۰۰ درصدی حشرات در پایان مدت زمان حرارت دهی پسته یعنی ۵۰ s [۲۹]، از این رو کافی است بررسی یکنواختی توزیع دمای محصول در شش موقعیت مختلف آن، تنها در پایان مدت زمان حرارت دهی با مایکروویو یعنی زمان ۵۰ s مورد بررسی قرار گیرد. جهت مقایسه میانگین دما در پایان مدت حرارت دهی (۵۰s) در شش موقعیت دماسنج، از روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده و نتایج آن در جدول (۵) نشان داده شده است.

مطلوب آن است که در مقایسه بین میانگین‌ها اختلاف معنی دار مشاهده نگردد که در این صورت توزیع دما یکنواخت خواهد بود. بر اساس نتایج مشاهده شده از مقایسه میانگین‌ها در

جدول (۴) دمای شش موقعیت از محصول در طول مدت حرارت‌دهی (°C).

Table 4 The temperature of six positions of the product during the heating time (°C).

زمان حرارت‌دهی heating time	w630												w900												
	مکعبی Cubic						استوانه‌ای Cylindrical						مکعبی Cubic						استوانه‌ای Cylindrical						
	موقعیت ترمومتر Thermometer position												موقعیت ترمومتر Thermometer position												
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	
20	4 1	4 2	4 1	4 2	4 1	4 2	42	41	41	42	41	41	4 2	4 2	4 1	4 1	4 1	4 1	4 4	4 1	4 2	4 2	4 1	4 2	44
30	4 4	4 6	4 8	4 5	4 6	4 6	48	45	44	51	52	52	4 8	4 6	4 6	4 5	4 6	4 5	5 5	4 6	4 6	5 1	4 6	5 0	55
40	4 9	5 1	5 2	5 2	5 0	5 0	51	53	47	59	55	55	5 5	5 4	5 1	4 9	5 1	5 2	6 1	5 3	5 1	5 9	5 0	5 8	60
50	5 4	5 7	6 1	5 7	5 7	5 6	59	57	56	64	60	60	6 2	6 1	5 5	5 6	5 6	5 9	6 8	6 0	5 9	6 9	5 7	6 9	70

جدول (۵) مقایسه میانگین دمای پایانی (۵۰ s) در شش موقعیت داخل نمونه.

Table 5 Comparison of the average final temperature (50s) in six positions within the sample.

موقعیت ترمومتر Thermometer position	شکل ظرف (مکعبی) Container shape (cubic)		شکل ظرف (استوانه‌ای) Container shape (Cylindrical)	
	w900	w630	w900	w630
	(A)	(B)	(C)	(D)
P <sub>1</sub>	<sup>a</sup> 61.33	<sup>b</sup> 53.67	<sup>a</sup> 59.67	<sup>abc</sup> 58.67
P <sub>2</sub>	<sup>b</sup> 55.00	<sup>ab</sup> 56.67	<sup>a</sup> 59.00	<sup>bc</sup> 57.00
P <sub>3</sub>	<sup>b</sup> 56.00	<sup>a</sup> 61.33	<sup>b</sup> 69.33	<sup>c</sup> 56.00
P <sub>4</sub>	<sup>b</sup> 56.33	<sup>ab</sup> 57.00	<sup>a</sup> 57.33	<sup>a</sup> 63.67
P <sub>5</sub>	<sup>ab</sup> 59.00	<sup>a</sup> 57.33	<sup>b</sup> 69.00	<sup>abc</sup> 59.67
P <sub>6</sub>	<sup>c</sup> 67.67	<sup>ab</sup> 56.33	<sup>b</sup> 70.33	<sup>ab</sup> 61.67



جدول (۶) دمای میانگین نمونه در پایان زمان حرارت دهی ۵۰ s، برای دو ظرف مکعبی و استوانه‌ای در توان‌های ۶۳۰ w و ۹۰۰ w.

Table 6 The average sample temperature at the end of the heating time is 50 s, for two cubic and cylindrical container at 630 and 900 w (°C).

موقعیت ترمومتر Thermometer position P	630 w		900 w	
	مکعبی Cubic (°C)	استوانه‌ای Cylindrical (°C)	مکعبی Cubic (°C)	استوانه‌ای Cylindrical (°C)
1	54	59	61	60
2	57	57	55	59
3	61	56	56	69
4	57	64	56	57
5	57	60	59	69
6	56	62	68	70

شش موقعیت مختلف نشان می‌دهد.

شکل‌های ۴ و ۵، توزیع دما در دو شکل مکعبی و استوانه‌ای در توان ۶۳۰ w و شکل‌های ۶ و ۷ توزیع دما در دو شکل مکعبی و استوانه‌ای در توان ۹۰۰ w را نشان می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، دما بدون در نظر گرفتن موقعیت، متناسب با زمان افزایش می‌یابد، اما این میزان افزایش به نرخ گرمایش (HR) یا شیب منحنی گرمایش بستگی خواهد داشت (dT / dt). از سوی دیگر توزیع دما در نمونه‌های مکعبی یکنواخت‌تر از نمونه‌های استوانه‌ای مشاهده گردید که با نتایج پیشین نیز سازگار است. قابل توجه است تا زمانی که نرخ گرمایش (HR) در طول مدت حرارت دهی ثابت است، یکنواختی نسبی حرارت (%RU) نسبت به زمان تغییر نخواهد کرد. جهت ساده سازی، نرخ گرمایش ثابت بجای دما به‌عنوان تابعی از زمان، مبنای تحلیل زیر قرار گرفت. برای محاسبه نرخ گرمایش، نمودار دما-زمان هر یک از نقاط رسم و بر اساس رگرسیون خطی، شیب آن به‌عنوان نرخ گرمایش تعیین گردید.

شکل‌های ۸ و ۹ نرخ گرمایش شش نقطه از نمونه‌ها را در توان‌های مختلف مایکروویو نشان می‌دهد. جهت بررسی تغییرات نرخ گرمایش در نقاط مختلف محصول، اطلاعات به‌دست آمده از شکل‌های ۸ و ۹، به‌صورت نموداری در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

با مشاهده شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت نرخ گرمایش در گوشه ظرف‌های مکعبی بیشتر است؛ تغییرات نرخ گرمایش در داخل نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای، به‌صورت قابل توجه و معنی‌دار بوده و تغییرات در توان ۶۳۰ w بیشتر می‌باشد؛ هم‌چنین نرخ گرمایش در دو ظرف مکعبی و استوانه‌ای در یک توان یکسان، تقریباً روند مشابهی با هم دارند (مشابهت روند در

یکنواختی بیشتر توزیع دما خواهد بود. از سوی دیگر نمودار مربوط به ظرف مکعبی در توان ۶۳۰ w مایکروویو نیز صاف‌تر و به عبارت بهتر یکنواخت‌تر از ظرف مکعبی در توان ۹۰۰ w مایکروویو می‌باشد و این موید نتایج فوق است. جدول‌های ۷ و ۸، نشان دهنده اثرات متقابل (که در سطح ۱٪ معنی‌دار شده بودند) روی درجه حرارت می‌باشد.

جدول (۷) اثر نوع ظرف نسبت به مدت زمان حرارت دهی روی میانگین دمای نمونه در مدت زمان حرارت دهی در دو نوع ظرف و در دو توان مایکروویو نشان می‌دهد. طبق جدول همان‌طور که زمان فرایند افزایش یافته، دما نیز افزایش می‌یابد. دما در ظروف مکعبی در هر دو توان ۶۳۰ w و ۹۰۰ w، به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از دما در ظروف استوانه‌ای است و این عمده‌تاً مربوط به توان جذب شده توسط نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی است.

اثر نوع توان مایکروویو نسبت به زمان حرارت دهی روی میانگین دمای نمونه در مدت زمان حرارت دهی با دو نوع توان مایکروویو در جدول (۸) نشان داده شده است. مشابه جدول قبل همان‌طور که زمان فرایند افزایش یافته، دما نیز افزایش می‌یابد. دما در توان ۶۳۰ w در هر دو ظرف مکعبی و استوانه‌ای، پایین‌تر از دما در توان ۹۰۰ w است و این قابل انتظار است بدین منظور که توان بیشتر مایکروویو موجب افزایش بیشتر دما در محصول می‌گردد. این موضوع، صحت داده برداری و صحت نتایج آزمایشگاهی را تأیید می‌نماید.

### ۲.۳. تعیین شاخص تغییر یکنواختی نسبی حرارت

جهت محاسبه شاخص غیریکنواختی توزیع حرارت در طول فرایند حرارت‌دهی از یکنواختی نسبی (%RU) استفاده گردید. شکل‌های ۷-۴، دمای داخل نمونه را به‌عنوان تابعی از زمان در

جدول (۷) میانگین دمای نمونه در مدت زمان حرارت‌دهی در دو نوع ظرف (°C)

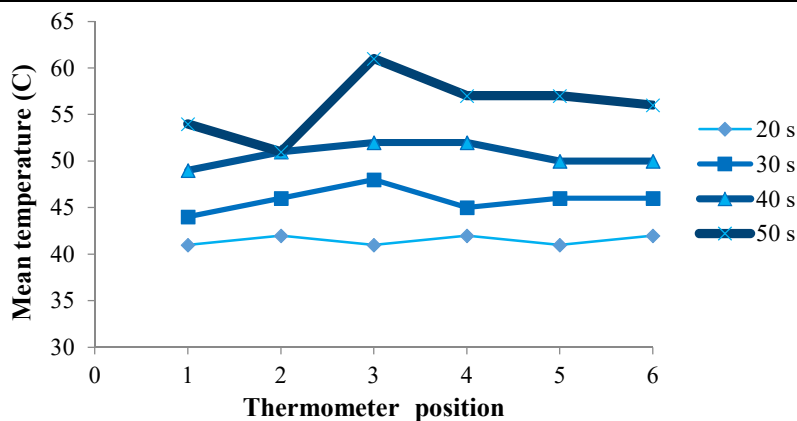
Table 7 Average sample temperature during heating time in two types of container (°C).

زمان حرارت‌دهی heating time (s)	630 w		900 w	
	مکعبی	استوانه‌ای	مکعبی	استوانه‌ای
	Cubic (°C)	Cylindrical (°C)	Cubic (°C)	Cylindrical (°C)
20	41.44	41.61	41.61	42.17
30	45.72	48.06	47.11	49.22
40	50.50	53.33	53.06	55.44
50	57.06	59.44	59.22	64.11

جدول (۸) میانگین دمای نمونه در مدت زمان حرارت‌دهی با دو نوع توان (°C).

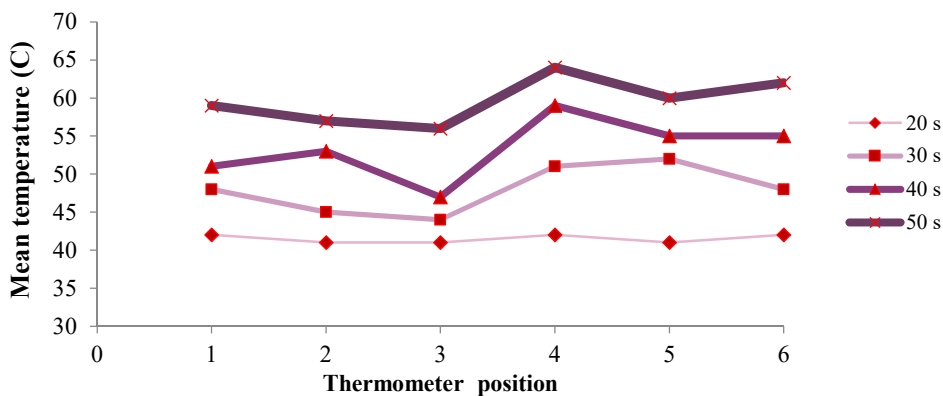
Table 8 Average sample temperature during heating time in two types of power (°C).

زمان حرارت‌دهی heating time (s)	مکعبی Cubic (°C)		استوانه‌ای Cylindrical (°C)	
	630 w	900 w	630 w	900 w
	20	41.44	41.61	41.61
30	45.72	47.11	48.06	49.22
40	50.50	53.06	53.33	55.44
50	57.06	59.22	59.44	64.11



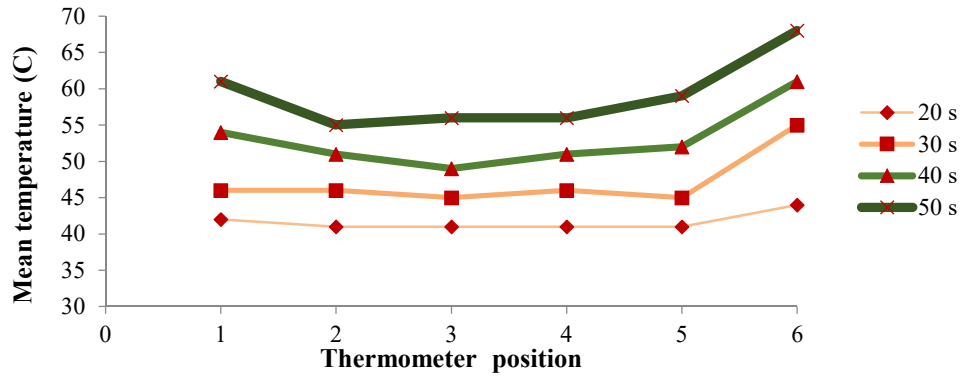
شکل (۴) توزیع دمای نمونه در ظرف مکعبی تحت حرارت‌دهی مایکروویو با توان ۶۳۰ w

Fig. 4. Temperature distribution of cubic container during 630 w microwave heating

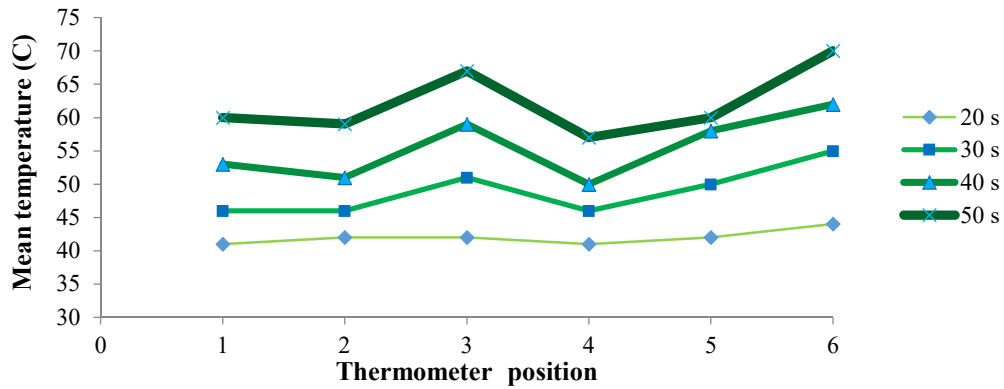


شکل (۵) توزیع دمای نمونه در ظرف استوانه‌ای تحت حرارت‌دهی مایکروویو با توان ۶۳۰ w

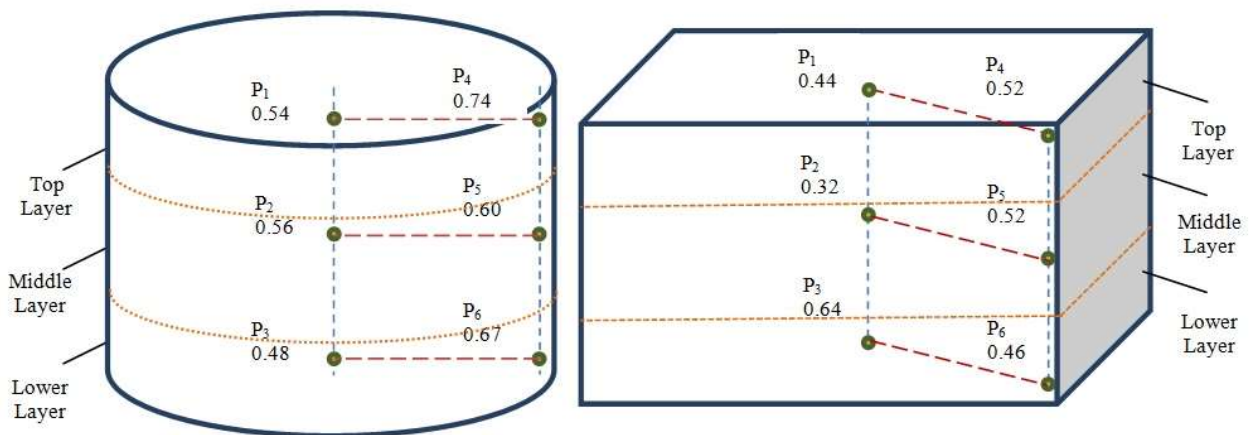
Fig. 5. Temperature distribution of cylindrical container during 630 w microwave heating



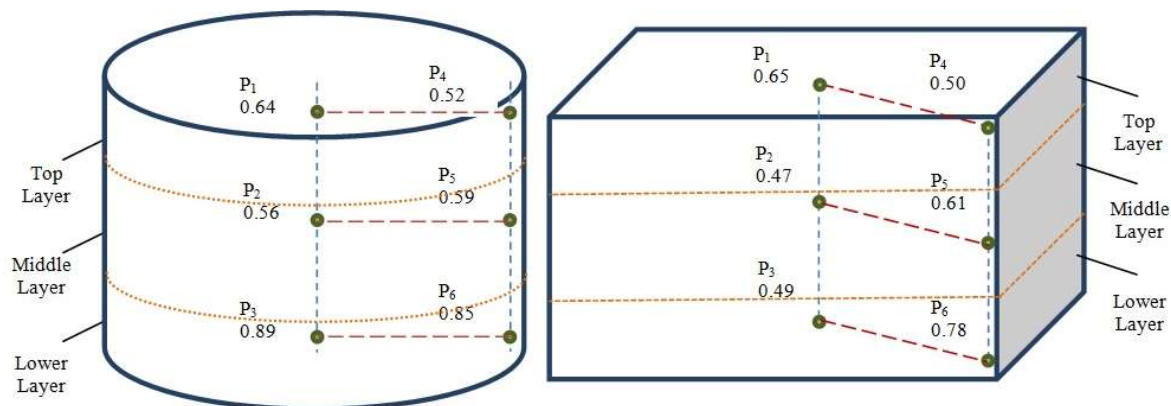
شکل (۶) توزیع دمای نمونه در ظرف مکعبی تحت حرارت دهی مایکروویو با توان ۹۰۰ w  
 Fig. 6. Temperature distribution of cubic container during 900 w microwave heating



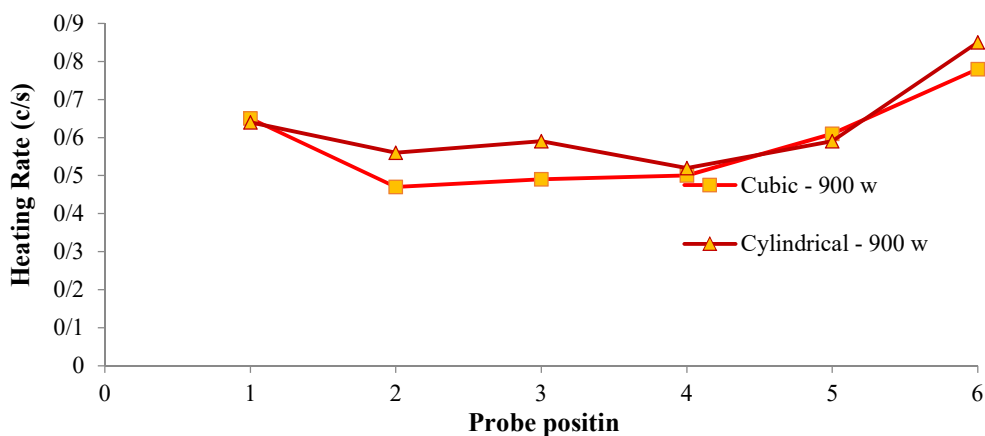
شکل (۷) توزیع دمای نمونه در ظرف استوانه‌ای تحت حرارت دهی مایکروویو با توان ۹۰۰ w  
 Fig. 7. Temperature distribution of cylindrical container during 900 w microwave heating



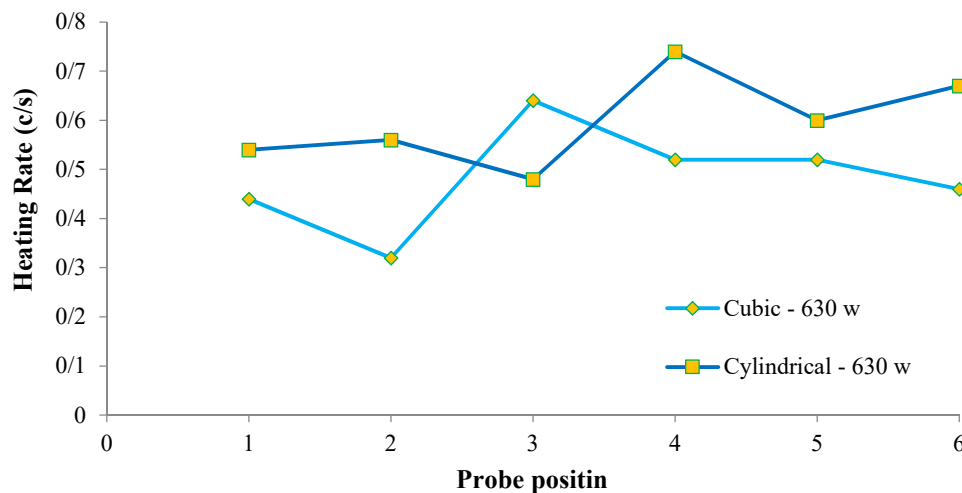
شکل (۸) نرخ گرمایش (°C/s) در موقعیت‌های مختلف ترمومتر داخل ظرف نمونه تحت حرارت دهی مایکروویو (توان ۶۳۰ w)  
 Fig. 8. Heating Rates (HR) at different probe position during microwave heating (630 w)



شکل (۹) نرخ گرمایش در موقعیت‌های مختلف ترمومتر داخل ظرف نمونه تحت حرارت دهی مایکروویو (توان ۹۰۰ w)  
**Fig. 9.** Heating Rates (HR) at different probe position during microwave heating (900 w)



شکل (۱۰) نرخ گرمایش در موقعیت‌های مختلف ترمومتر داخل ظرف نمونه تحت حرارت دهی مایکروویو (توان ۹۰۰ w)  
**Fig. 10.** Heating Rates (HR) at different probe position during microwave heating (900 w)



شکل (۱۱) نرخ گرمایش در موقعیت‌های مختلف ترمومتر داخل ظرف نمونه تحت حرارت دهی مایکروویو (توان ۶۳۰ w)  
**Fig. 11.** Heating Rates (HR) at different probe position during microwave heating (630 w)

نهایتاً نمونه استوانه‌ای با توان ۹۰۰ w کمترین یکنواختی توزیع حرارت نسبت به نمونه مینا را از خود نشان می‌دهند و این نتایج کاملاً منطبق بر نتایج فوق‌الذکر به‌دست آمده از طریق مقایسه میانگین دمای پایانی نمونه‌ها، پس از اتمام مدت زمان حرارت دهی می‌باشد که راستی آزمایی این تحلیل خواهد بود.

نتایج تمامی تحلیل‌ها نشان می‌دهد که یکنواختی توزیع حرارت در توده محصول به شکل مکعبی بیشتر از شکل استوانه‌ای بوده است. تفاوت اصلی در شکل مکعبی نسبت به استوانه‌ای، وجود گوشه (یا زاویه) در آن است. نتایج حاصله نقش حضور گوشه در شکل در توزیع حرارتی مایکروویو را نشان می‌دهند. این نتایج منطبق است با نتایج تحقیقات ارائه شده از سوی باتاچاریا و باساک [۳۵]. نتایج آن‌ها نیز نشان می‌دهد که شکل‌های گوشه دار مثل مکعب، تأثیر زیادی در توزیع حرارت مایکروویو داشته و نمونه‌های استوانه‌ای ممکن است بهترین انتخاب برای همه مواد غذایی نباشد.

از سوی دیگر توزیع حرارت در توان ۶۳۰ w (۷۰٪) توان مایکروویو، یکنواختی بیشتری نسبت به توان اعمالی ۹۰۰ w (۷۰٪) توان مایکروویو، از خود نشان می‌دهد. این موضوع مبین آن است که عدم یکنواختی توزیع حرارت در محیط مایکروویو در توان‌های بالاتر اتفاق خواهد افتاد. این نتیجه با تحقیقات بین‌هانگ و همکاران [۳۶] نیز مطابقت دارد. آن‌ها نیز نشان داده‌اند که عدم یکنواختی توزیع حرارت زمانی رخ خواهد داد که توان بالای مایکروویو مورد استفاده قرار گیرد.

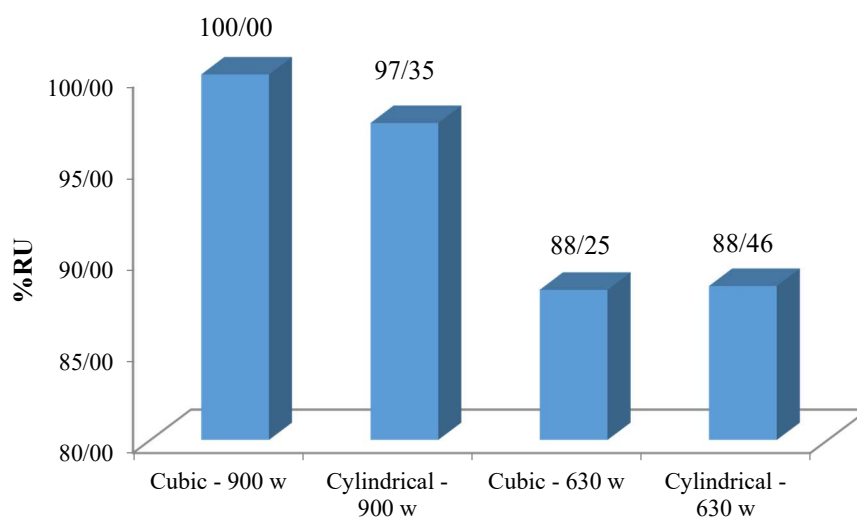
دو شکل ظرف مکعبی و استوانه‌ای در ۶۳۰ w و مشابهت روند در دو شکل ظرف مکعبی و استوانه‌ای در ۹۰۰ w).

با مشاهده شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت نرخ گرمایش در گوشه‌ی ظرف‌های مکعبی بیشتر است؛ تغییرات نرخ گرمایش در داخل نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای، بصورت قابل توجه و معنی‌دار بوده و تغییرات در توان ۶۳۰ w بیشتر می‌باشد؛ همچنین نرخ گرمایش در دو ظرف مکعبی و استوانه‌ای در یک توان یکسان، تقریباً روند مشابهی با هم دارند (مشابهت روند در دو شکل ظرف مکعبی و استوانه‌ای در ۶۳۰ w و مشابهت روند در دو شکل ظرف مکعبی و استوانه‌ای در ۹۰۰ w).

### ۱.۲.۳. تغییرات یکنواختی نسبی حرارت (%RU)

جهت محاسبه یکنواختی نسبی حرارت بر اساس رابطه (۱)، ابتدا انحراف استاندارد (SD) در شش موقعیت قرارگیری میله ترمومتر بر اساس رابطه (۲) تعیین؛ سپس انحراف استاندارد نمونه مکعبی تحت حرارت دهی با توان ۹۰۰ w به‌عنوان انحراف معیار مبنا (SD<sub>r</sub>) انتخاب و نهایتاً یکنواختی نسبی حرارت در نمونه‌ها محاسبه گردید. نتایج به‌دست آمده در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از محاسبات تعیین یکنواختی نسبی حرارت مندرج در شکل (۱۲)، نمونه مکعبی با توان ۶۳۰ w دارای بالاترین یکنواختی توزیع حرارت می‌باشد (RU کمتر)؛ پس از آن نمونه استوانه‌ای با توان ۶۳۰ w، بیشترین یکنواختی و



شکل (۱۲) یکنواختی نسبی توزیع دما در نمونه‌ها

Fig. 12. Relative Uniformity of temperature (%RU)

## ۴. نتیجه گیری

× موقعیت دماسنج «شکل ظرف» در سطح ۱٪ معنی‌دار می‌باشند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد در تیمار "B" (مکعبی با توان w ۶۳۰) در ۵ موقعیت از ۶ موقعیت، هیچ اختلاف معنی‌داری بین میانگین دما وجود ندارد و این بدین معنی است که توزیع دما در موقعیت‌های مختلف محصول در پایان مدت زمان حرارت دهی با مایکروویو، یکنواخت بوده است. این نتایج مطابقت داشت با نتایج حاصل از تعیین شاخص RU، یکنواختی نسبی توزیع حرارت در تمام مدت حرارت دهی محصول. هم‌چنین نتایج حاصله نشان می‌دهد که یکنواختی توزیع حرارت در توده محصول به شکل مکعبی بیشتر از شکل استوانه‌ای بوده است. از سوی دیگر توزیع حرارت در توان w ۶۳۰ (۷۰٪ توان مایکروویو)، یکنواختی بیشتری نسبت به توان اعمالی w ۹۰۰ (۱۰۰٪ توان مایکروویو)، از خود نشان می‌دهد. این موضوع مبین آن است که عدم یکنواختی توزیع حرارت در محیط مایکروویو در توان‌های بالاتر اتفاق خواهد افتاد.

پژوهش حاضر تأثیر پارامترهای فیزیکی بر یکنواختی توزیع دما در فرآیند حرارت دهی محصول پسته صادراتی (رقم فندق) به روش مایکروویو را مورد بررسی قرار داد. یکنواختی توزیع دما، به معنای توزیع یکدست حرارت در تمام حجم محصول و عدم وجود نقاط سرد و گرم در آن می‌باشد که در غیر این صورت اهداف حرارت دهی با مایکروویو به‌طور کامل اتفاق نخواهد افتاد. نتایج این پژوهش بر اساس دو نوع تحلیل مقایسه میانگین و تعیین شاخص RU، گزارش گردید. نتایج حاصل از تجزیه واریانس و مقایسه میانگین دمای پایانی نمونه‌ها، نشان داد که تمامی اثرات اصلی شامل شکل ظرف، موقعیت دماسنج و مدت زمان حرارتی، در هر دو حالت توان اعمالی، در سطح ۱٪ معنی‌دار می‌باشند. در زمان استفاده از توان w ۶۳۰، تنها اثر متقابل (موقعیت دماسنج «شکل ظرف») و در هنگام استفاده از توان ۹۰۰ وات، تمامی اثرات متقابل به غیر از اثر متقابل (مدت حرارت دهی

## منابع

- of electrostatic field on dynamic friction coefficient of pistachio. *Jame.*, 6(1), 126-138.
- [7] FAO Statistical Pocketbook 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2015. ISBN 978-92-5-108802-9
- [۸] بخش آبادی، ب.؛ میرزایی، ح.؛ قدسولی، ع.؛ جعفری، س. م.؛ ضیایی فر، ا.؛ بیگ بابایی، ع. (۱۳۹۶) تاثیر پیش تیمارهای میدان الکتریکی متناوب و مایکروویو بر برخی از خصوصیات روغن سیاهدانه. فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی، سال چهارم، شماره ۱۶، ص ۲۹-۲۱.
- [9] Shojaeddini, M. (2003). Pistachios, pests, diseases and deficiencies. Forouzesh Publications, Karaj. (InFarsi).
- [10] Garmsiri, E., Rezaei, M., Shaviklo, A., & Babakhani, A. (2014). Efficiency of Microwave Radiation on Antioxidant Compounds Extracted from Red Algae "Hypneahamulosa" and Optimal Extraction Conditions Using Response Surface Methodology (RSM). *IFSTRJ.*, 10 (2), 148-155. (InFarsi).
- [11] Yousefi, G., Emam-Djomeh, Z. (2015). Evaluation and optimization drying raspberries and energy consumption in the combined Fluidized bed- Microwaves drying system via response surface methodology.
- [1] Tayefeh Aliakbarkhani, S., Farajpour, M., Asadian, A. H., Aalifar, M., Ahmadi, S., & Akbari, M. (2017). Variation of nutrients and antioxidant activity in seed and exocarp layer of some Persian pistachio genotypes. *Ann. Agric. Sci.*, Available online.
- [2] West, Sh. G., Gebauer, S. K., Kay, C. D., Bagshaw, D. M., Savastano, D. M., Diefenbach, Ch., & Kris-Etherton, P. M. (2012). Diets Containing Pistachios Reduce Systolic Blood Pressure and Peripheral Vascular Responses to Stress in Adults With Dyslipidemia Novelty and Significance. *J. Hypertens.*, 60, 58-63.
- [3] Razavi, S. M. A., & Taghizadeh, M. (2007). The specific heat of pistachio nuts as affected by moisture content, temperature, and variety. *J. Food Eng.*, 79, 158-167.
- [4] Salari Kia, A. R., Aghkhani, M. H., & Abasspour-Fard, M. H. (2014). The Effect of Moisture Content and Temperature on the Specific Heat Capacity of Nut and Kernel of Two Iranian Pistachio Varieties. *Jame.*, 4(1), 30-36.
- [5] Abdollahnejad Barough, A. R., Adelinia, M., Mohamadi, M. (2016). Sorting of pistachio nuts using image processing techniques and an adaptive neural-fuzzy inference system. *Jame.*, 6(1), 60-68.
- [6] Aghkhani, M. H., Baradaran Motie, J. (2016). Effect

- Res.*, 59, 152-157.
- [24] Jian, F., Jayas, D.S., White, N. D.G., Fields, P.G., & How, N. (2015). An evaluation of insect expulsion from wheat samples by microwave treatment for disinfestations. *Biosyst Eng.*, 130, 1-12.
- [25] Shayesteh, N., & Barthakur, N.N. (1996). Mortality and Behaviour of Two Stored-product Insect Species During Microwave Irradiation. *J. Stored Prod. Res.*, 32(3), 239-246.
- [26] Sadeghi nasab, F., Shayesteh, N., Pourmirza, A.A., & Ghobadi, CH. (2004). Effect of Microwave Radiation of Different Power Levels and Exposure Times on Developmental Stages of Three Storage Pest Species. Iranian, *J. Agric. Sci.* Vol. 35, No. 2. (InFarsi).
- [27] Ghasemzadeh, S., Pourmirza, A. A., Safaralizadeh, M. H., & Ashouri, Sh.(2012). The Control,s Effect Combination of Microwave Radiation and Cold Storage on Adults *Oryzaephilus surinamensis* and *Tribolium castaneum*. *J. Plant Prot.*, (Issue 4): 391-397. (InFarsi).
- [28] Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A., Mitcham, E., Hansen, J.D., Hallman, G., Drake, S.R., & Wang, Y.(2003). Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments. *Biosyst Eng.*, 85 (2), 201-212.
- [29] Hajmohammadi, H., Sadrnia, H., & Abbaspour-Fard, M. H. (2013). Effect of Microwave Heating Treatment on Mortality of Indian Meal Moth (*Plodia interpunctella*) in Pistachio. *J. Plant Prot.*, 27(1),18-25. (InFarsi).
- [30] Ling, B., Hou, L., Li, R., & Wang, S.(2015). Storage stability of pistachios as influenced by radio frequency treatments for postharvest disinfestations. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*,33, 357-364.
- [31] Standard organization of Iran, 8689. brains tree - health procedures. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. First Edition. (InFarsi).
- [32] Ho, Y.C., & Yam, K.L. (1992). Effect of metal shielding on microwave heating uniformity of a cylindrical food model. *J. Food Process. Preserv.*,16, 337-359.
- [33] Virtanen, A.J., Goedeken, D.L., & Tong, C.H. (1997). Microwave Assisted Thawing of Model Frozen Foods Using Feed-back Temperature Control and Surface Cooling. *J. Food Sci.*, 62(1), 150-154.
- [34] Pitchai, K., Birla, S.L., Subbiah, J., Jones, D., & Thippareddi, H. (2012). Coupled electromagnetic and heat transfer model for microwave heating in domestic ovens. *J. Food Eng.*,112, 100-111.
- [35] Bhattacharya, M. & Basak, T. (2016). A comprehensive analysis onthe effect of shape on the microwave heating dynamics of food materials. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 39, 247-266.
- [36] Yinhong, L., Junqing, L., Chun, Zh., Tao, H., Yang, Y., Kama, H.andHuacheng, Zh.(2016).A Phase-Shifting Method for Improving the Heating Uniformity of Microwave Processing. *Materials.Mater.*, 9(5). 309-316.
- IFSTRJ.*,10(4), 327-336. (InFarsi).
- [12] Dehbooreh, R., Esmaili, M, (2009), Evaluation of Microwave and Convective Finish Drying Parameters and Drying Effects on Color of Dried Grapes. *IFSTRJ.*,5(2), 108 – 122. (InFarsi).
- [۱۳] کلانتری، د.؛ جعفری، ح. (۱۳۹۵) مقایسه پارامترهای خشک شدن و خصوصیات کیفی شلتوک طارم هاشمی با استفاده از مایکروویو جریان مداوم و مایکروویو خانگی. فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی، سال سوم، شماره ۱۲، ص ۸۸-۷۷.
- [۱۴] شریفیان، ز.؛ حسینی قابوس، س. ح. (۱۳۹۶) ویژگی های فیزیکوشیمیایی کدو حلوائی خشک شده به روش ترکیبی آبیگری اسمز-مایکروویو. فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی، سال چهارم، شماره ۱۵، ص ۱۵۰-۱۳۳.
- [۱۵] جعفری، ح.؛ کلانتری، د.؛ آزادبخت، م. (۱۳۹۴) بررسی نرخ تغییر رطوبت و درصد شکستگی دانه های شلتوک با استفاده از خشک کن مایکروویو. فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی، سال دوم، شماره ۸، ص ۷۴ - ۶۳.
- [16] Dehghannya, J., Bagheri-Darvish-Mohammad, H., & Ghanbarzadeh, B.(2016). Moisture Loss Kinetics Modeling during Deep-Fat Frying of Potato Strips Pretreated with Ultrasound and Microwave. *IFSTRJ.*,12(1), 109-126. (InFarsi).
- [17] Barmour, M., Dehghannya, J., & 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. (InFarsi).
- [18] Ohlsson, T., & Risman, P.O. (1978). Temperature distribution of microwave-heating – spheres and cylinders. *J. Microwave Power.*, 13(4), 303-309.
- [19] Geedipalli, S.S.R., Rakesh, V., & Datta, A.K. (2007). Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. *J. Food Eng.*,82, 359-368.
- [20] Pitchai, K., Chen, J., Birla, S., Gonzalez, R., Jones, D., & 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.
- [21] Liu, S., Ogiwara, Y., Fukuoka, M., & Sakai, N. (2014). Investigation and modeling of temperature changes in food heated in a flatbed microwave oven. *J. Food Eng.*,131, 142-153.
- [22] Gunasekaran, S., & Yang, H., (2007). Effect of experimental parameters on temperature distribution during continuous and pulsed microwave heating. *J. Food Eng.*,78, 1452-1456.
- [23] Das, I., Shah, N. G., & Kumar, G. (2014). Properties of walnut influenced by short time microwave treatment for disinfestation of insect infestation. *J. Stored Prod.*

*Research Article***Effect of physical parameters on uniformity of temperature profile of Pistachio (Fandoghi cv.) during microwave heating****Amin Rostami<sup>1</sup>, Hassan Sadrnia<sup>2\*</sup>, Mehdi Khojastehpour<sup>3</sup>**

1. Ph.D. Student, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
2. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
3. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

**Abstract**

Heating is one of the most commonly used methods to achieve different goals in the food process. The main problems with microwave heating are the possibility of cold and hot spots. The aim of this study was to investigate the uniformity of temperature distribution in Fandoghi Pistachio microwave thermal treatment. Independent factors included the shape of product geometry, the position of the thermometer and the heating time. This research was based on a completely randomized design based on a factorial experiment of  $2 \times 6 \times 4$ . Independent factors included the shape of product geometry, the position of the thermometer and the heating time. These experiments were performed separately for 900 and 630 w microwave power, and the temperature of the pistachio product was measured and recorded during the four-time heat treatment at six different positions of the product as an associated factor. The results of this study were based on two types of analysis of the comparison of the mean temperature of the samples and the determination of the relative non-uniformity index. The results showed that all the main effects were significant at 1% level in both applied power states. When using a power of 630 w, only the interactive effect (thermometer position  $\times$  container) is significant at 1% level. When using the power of 900 w, all interactive effects other than (heating time  $\times$  thermometer position  $\times$  container) are significant at 1% level. Comparison of means showed that in treatment "B" (cubic - 630 w) in 5 positions of 6 positions, there is no significant difference between the mean temperatures. This means that the temperature distribution at different product positions at the end of the microwave heating period has been quite uniform. By calculating the relative non-uniformity index, the highest uniformity was obtained in cubic - 630 w.

**Keywords:** Temperature distribution, Container shape, Heat uniformity, Heat treatment, Microwave.

---

\* Corresponding author: hassan.sadrnia@um.ac.ir