

*Research Article***The effect of infrared on some physical and sensory properties of popcorn****Mahdi Shavandi¹, Majid Javanmard^{2*}, Alireza Bassiri²**

1. PhD Student, Food Technologies Group, Department of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST)
2. Associate Professor, Food Technologies Group, Department of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST)

(Received 09 May 2022, Received in revised form 12 June 2022, Accepted 30 July 2022)

Abstract

The main objective of this study, the effect of infrared (IR) on popcorn produced at IR power 550, 450 and 350 W and sample distance from the radiation source of 10, 20 and 30 cm on changing some physical and sensory properties of popcorn (popping properties, sensory evaluation, surface morphology (SEM) and temperature profile) was investigated. It was observed that typically with increasing IR power and decreasing the distance of the samples from the infrared radiation source, the popping yield, volume expansion rate and popping percentage increased significantly ($P < 0.05$), and the beginning of popping commencement, expansion residue and the bulk density decreased significantly ($P < 0.05$). In SEM analysis, the texture of popcorn produced by IR, after increasing the volume and changing the starch structure of the samples, turned into a honeycomb, and this factor increased the starch volume of the samples and naturally increased the total volume of samples after the popcorn production process by IR has occurred. It was found that the valley of popcorn produced by IR increases the size of pores by reducing the sample distance from the IR source and increasing the power of the IR lamp, or in other words, the number of holes per unit area decreases. The highest heat generated in IR-produced popcorns was measured at IR power 550 W and a distance of 10 cm at 274 C°. The highest sensory evaluation score given by sensory panels was assessed in IR-produced popcorns at IR power 550 W and distance of 10 cm. According to the results, the IR popping process has a high efficiency to produce popcorn.

Keywords: Corn, Infrared, Popcorn, Popping, SEM analysis.**How to cite this article:**

Shavandi M., Javanmard M., Bassiri A. (2022). The effect of infrared on some physical and sensory properties of popcorn. *Innov. Food Technol.*, 10(1), 1-13.

* Corresponding author E-mail: javanmard@irost.ir

مقاله پژوهشی

بررسی اثر مادون‌قرمز بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و حسی پاپکورن

مهدی شوندی^۱، مجید جوانمرد^{۲*}، علیرضا بصیری^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه صنایع غذایی و تبدیلی، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

۲. دانشیار، گروه صنایع غذایی و تبدیلی، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۲/۱۹، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸)

چکیده

هدف اصلی این مطالعه بررسی اثر پرتودهی مادون‌قرمز (IR) بر فرآیند تولید پاپکورن در سه سطح توان ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ و سه سطح فاصله نمونه‌ها از منبع تابشی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ cm بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و حسی پاپکورن (خواص پاپینگ، ارزیابی حسی، مورفولوژی سطحی (SEM)، و پروفایل دمایی) بود. مشاهده شد که با افزایش توان IR و کاهش فاصله نمونه‌ها از منبع تابش مادون‌قرمز، میزان بارده پاپینگ، نرخ انبساط حجم و درصد پاپینگ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ($P < 0.05$)، و آغاز پاپینگ، باقی‌مانده حجیم‌شده‌ها و دانسیته حجمی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ($P < 0.05$). در آنالیز SEM، بافت پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR پس از افزایش حجم و تغییر در ساختار نشاسته نمونه‌ها، به شکل لانه زنبوری تبدیل شده و همین عامل باعث افزایش حجم نشاسته نمونه‌ها شده و به طبع افزایش حجم کلی نمونه‌ها پس از انجام فرآیند تولید پاپکورن توسط IR رخ داده است. مشخص شد که در پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR با کاهش فاصله نمونه از منبع و افزایش توان IR، اندازه حفره‌ها افزایش می‌یابد یا به عبارت دیگر تعداد حفره‌ها در هر واحد سطح کاهش می‌یابد. بالاترین دما در نمونه‌های تولیدشده در توان IR ۵۵۰ W و فاصله ۱۰ cm به میزان 274°C اندازه‌گیری شد. بیشترین امتیاز ارزیابی حسی متعلق به نمونه‌های تولیدشده در توان IR ۵۵۰ W و فاصله ۱۰ cm بود. طبق نتایج به‌دست‌آمده، فرآیند پاپینگ با فناوری IR دارای کارایی بالا به‌منظور تولید پاپکورن است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز SEM، پاپکورن، پاپینگ، پرتو مادون‌قرمز، ذرت.

۱. مقدمه

ذرت یکی از با ارزش ترین گیاهانی است که در دنیا کشت می شود. این گیاه به عنوان «سلطان» غلات معروف است. ذرت با نام علمی (*Zea mays L.*) و نام انگلیسی Corn و Maize پس از گندم و برنج مهم ترین منبع غذا برای جمعیت در حال افزایش جهان می باشد. ذرت یکی از گیاهان مهم تیره غلات و از جنس *Zea* و دارای گونه های زیادی است که مهم ترین آن ها *mays* با $n=20$ کروموزوم می باشد. امروزه در جهان ذرت به علت اهمیت فوق العاده زیادی که در تأمین غذای دام ها، پرندگان و مصارف دارویی و صنعتی دارد نسبت به افزایش سطح زیر کشت و همچنین بهبود تکنیک زراعت آن اقدامات اساسی به عمل آمده و می آید [۱].

در استراتژی رژیم غذایی جهانی برای مردم، مصرف غلات کامل توصیه شده است [۲]. اثرات مفید غلات کامل بر سلامتی جامعه به دلیل دارا بودن فیبر، ریزمغذی ها و مواد شیمیایی گیاهی موجود در لایه خارجی و مغز دانه ها است [۳] و همچنین غلات کامل منبع مهمی از آنتی اکسیدان ها هستند [۴].

یک روش برای افزایش مصرف غلات کامل، فرآوری آنها با استفاده از فناوری حجیم سازی (پاپینگ و پافینگ) که روشی سنتی، ساده، ارزان و سریع است، می باشد. پاپینگ به معنای ترکاندن، یک فرآیند همزمان ژلاتینه شدن و منبسط شدن نشاسته است که طی آن دانه ها در مدت زمان کوتاه در معرض حرارت بالا قرار می گیرند. در طی این فرآیند، بخارهای فوق داغ داخل دانه ها با گرم شدن سریع نمونه ها تولید می شوند و همین امر باعث پختن دانه ها، انبساط ناگهانی آندوسپرم و شکستن پوسته خارجی می شود [۵].

طی مطالعه ای گزارش شد که فرآیند تولید پاپکورن در دمای حدود 177°C اتفاق می افتد، که معادل فشار ۱۳۵ psi در داخل هسته دانه های ذرت است. بیشتر آب داخل دانه های ذرت در لحظه تولید پاپکورن به آب فوق داغ^۱ تبدیل می شود و پس از پارگی پریکارپ، نیروی محرکه لازم برای گسترش دانه (افزایش حجم نشاسته و محتویات داخلی دانه ها) را فراهم می کند. در دمای کمتر از ۱۷۷ درجه سانتی گراد،

تعداد ذرت هایی که به پاپکورن تبدیل شده اند به طور قابل توجهی کاهش می یابد. همچنین رطوبت بهینه در دانه های ذرت به منظور تولید پاپکورن بین ۱۰ تا ۱۵٪ گزارش شد [۶]. خواص اولیه فیزیکی شیمیایی و ساختاری نشاسته های مختلف نیز تأثیر زیادی روی ویژگی های محصولات تولیدی مانند بافت، دانسیته و رنگ دارد [۷]. حجم پاپکورن تحت تأثیر فاکتورهای زیادی از جمله میزان رطوبت دانه، ژنوتیپ، خواص فیزیکی دانه و شرایط برداشت و حمل و نقل می باشد. در بین این فاکتورها، میزان رطوبت تأثیر بیشتری بر حجم دارد چون در میزان فشار ایجاد شده در داخل دانه مؤثر است [۶]؛ بنابراین تحقیقات زیادی در زمینه میزان رطوبت دانه و تأثیر آن بر حجم پاپکورن انجام شده است. مطالعات نشان داده است که بیشترین افزایش حجم در دامنه رطوبتی ۱۱ تا ۱۵/۵٪ بر پایه وزن مرطوب حاصل می شود. با افزایش بیشتر رطوبت، حجم کاهش می یابد [۸، ۹].

فرآیندهای مختلفی مانند گرمایش ماکروویو (پاپ کورن سفید) [۱۰]، پانل آهنی حاوی شن و ماسه (برنج قهوه ای) [۱۱]، پلاسمای فرکانس رادیویی اتمسفر (برنجک) [۱۲]، پاپ کورن ساز آلومینیومی (پاپ کورن) [۶] و بستر سیال (سورگوم) [۱۳] در فرآیند حجیم سازی غلات استفاده شده است. در مطالعه ای، اثر بی کربنات سدیم (۰/۰ تا ۰/۸٪)، روغن گیاهی (۱ تا ۱۳٪)، کره (۱ تا ۱۳٪) و کلرید سدیم (۰/۵ تا ۰/۲۵٪) بر ویژگی های پاپکورن های تولیدی مورد بررسی قرار گرفت [۱۴]. اثرات روش حجیم کردن (بدون و با روغن) و رطوبت (۸ تا ۱۶٪) بر روی ویژگی های حسی پاپ کورن سفید مورد بررسی قرار گرفت. گزارش شد که ۱۰،۲۱٪ (با روغن) و ۱۱،۳۹٪ (بدون روغن)، رطوبت بهینه فرآیند برای تولید پاپ کورن بود [۱۰].

اخیراً مطالعات جامعی بر کاربردهای حرارت مادون قرمز برای فرآوری مواد غذایی انجام شده است. طی گزارش محققین کارآمد بودن پرتو مادون قرمز ضمن حفظ کیفیت نمونه ها در فرآوری مواد غذایی پیشنهاد شده است. بررسی پرتو دهی مادون قرمز از نظر جنبه اقتصادی برای توسعه فرآیندهای فرآوری مواد غذایی و برآورد هزینه انرژی مصرفی توسط این تابش قطعاً یکی از مهم ترین عوامل برای تبدیل شدن تابش

1. Superheated water

۲. مواد و روش

۱.۲. تهیه نمونه

ذرت (*Zea mays Everta*) واریته ذرت پاپکورن برداشت شده در کرج (استان البرز، ایران)، در سال زراعی ۱۳۹۹ تهیه شد. دانه‌ها پاکسازی و سپس الک شده و در بسته‌های پلاستیکی در دمای 25°C نگهداری شدند. میزان رطوبت اولیه دانه‌ها به روش آون گذاری (به مدت ۳ h در دمای 140°C) تعیین شد [۲۳].

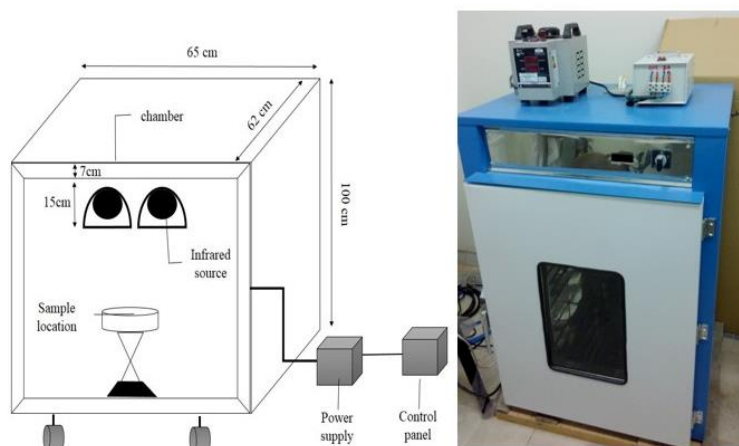
محتوای رطوبت نمونه ذرت، ۱۴٪ تنظیم شد. ۱۵ g از نمونه‌ها و ۳ ml روغن (۲۰٪ روغن با استفاده از پیش تیمارهای انجام‌شده انتخاب شد) ترکیب‌شده و در یک پتری دیش پیرکس (قطر ۱۵۰ mm) در داخل محفظه IR قرار داده شد. روغن به‌طور یکنواخت به دانه‌ها اضافه‌شده و هم زده شدند، به‌طوری که روی سطح کاملاً پوشانده شد. نمک به میزان ثابت (۱٪ نمک) با توجه به استاندارد ایران انتخاب شد) به نمونه اضافه شد [۲۴].

۲.۲. سیستم تولید پاپکورن توسط پرتو IR

در این مطالعه، یک پایلوت ناپیوسته IR آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد [۲۵]. سیستم طراحی‌شده IR با اندازه $65 \times 62 \times 100$ cm دارای ۲ منبع تابش مادون قرمز (W) 350 و 450 است (شکل ۱).

مادون‌قرمز به یک فرایند سودآور و کاربردی شدن آن در صنایع غذایی است [۱۵-۲۰].

مادون‌قرمز با محدوده طول‌موج بین $0.76 \mu\text{m}$ تا $1000 \mu\text{m}$ یک‌بخشی از طیف الکترومغناطیسی بین فرابنفش و ماکروویو را تشکیل می‌دهد. تابش مادون قرمز به سه ناحیه مادون‌قرمز نزدیک ($0.76-2 \mu\text{m}$)، مادون‌قرمز متوسط ($2-4 \mu\text{m}$) و مادون‌قرمز دور ($4-1000 \mu\text{m}$) تقسیم‌بندی می‌شود. تأثیر تابش مادون‌قرمز به خود اشعه (انعکاس، جذب، عبور، تفرق اشعه، عمق نفوذ و طول‌موج مادون‌قرمز) و نوع ماده غذایی (ترکیب ماده غذایی، فعالیت آبی و ضخامت محصول) بستگی دارد [۲۱]. این درحالی‌ست که عموماً تابش مادون‌قرمز دور برای فرآوری مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا بیشتر مواد غذایی در این محدوده دارای جذب هستند [۲۲]. فرآیند مادون‌قرمز برای تولید فرآورده‌های حجیم‌شده غلات یک فرآیند نوظهور است برای اولین بار معرفی و بررسی شده است. با توجه به کارآمد بودن پرتو مادون‌قرمز از نظر یکنواختی تابش، انرژی مصرفی پایین، حفظ کیفیت نمونه‌ها و راندمان بالا، به‌منظور تولید پاپکورن انتخاب شد. هدف اصلی این مطالعه بررسی اثر پرتو دهی IR بر فرآیند تولید پاپکورن در سه سطح توان 350 ، 450 و 550 W و سه سطح فاصله نمونه‌ها از منبع تابشی 10 ، 20 و 30 cm بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و حسی پاپکورن (خواص پاپینگ، ارزیابی حسی، مورفولوژی سطحی (SEM)، و پروفایل دمایی) بود.



شکل (۱) سیستم مادون قرمز
Fig 1. Infrared system

N_p : تعداد دانه‌های حجیم‌شده

N : تعداد دانه‌های کل

۴.۳.۲. آغاز پاپینگ

با تعیین مدت زمان شروع فرآیند تا لحظه اولین ترکیدن، آغاز پاپینگ گزارش شد [۲۶].

۵.۳.۲. باقیمانده حجیم‌شده‌ها^۳

درصد دانه‌های حجیم نشده توسط معادله (۴) محاسبه شد [۱۰].

$$\text{Expansion residue (\%)} = \frac{N_{up}}{N} \times 100 \quad (4)$$

N_{up} : تعداد دانه‌های حجیم نشده

N : تعداد دانه‌های کل

۶.۳.۲. دانسیته حجمی^۴

دانسیته حجمی نمونه‌ها با استفاده از یک سیلندر ۵۰۰ mL توسط معادله ۵ تعیین شد [۲۴].

$$\text{Bulk density} = \frac{\text{mass (mg)}}{\text{volume (mL)}} \quad (5)$$

Mass: وزن نمونه در هوا

Volume: حجم توده‌ای نمونه

۴.۲. ارزیابی حسی

ارزیابی حسی نمونه‌های پاپکورن توسط پانل‌های حسی متشکل از ۱۲ نفر از دانشجویان و اعضای هیئت علمی دانشکده صنایع غذایی، که به‌خوبی به تکنیک‌های ارزیابی حسی آشنایی دارند، انجام شد. نمونه‌ها با استفاده از اعداد سه رقمی تصادفی کدگذاری شده تا در نظر پانل‌های حسی هیچ‌گونه تأثیری نداشته باشد. پانل‌های حسی فرآورده‌های حجیم‌شده غلات را از نظر عطر، طعم، رنگ، بافت و مقبولیت کلی بر اساس مقیاس هدونیک ۵ نقطه‌ای ارزیابی کردند [۲۷].

توان‌های تابشی اعمال‌شده به سامانه مادون قرمز توسط منبع تغذیه تغییر یافته و با توجه به نمایشگر منبع تغذیه توان‌ها تنظیم شدند. صحت توان‌های ورودی سامانه مادون قرمز توسط دستگاه توان سنج^۱ تعیین شدند.

اثر مادون قرمز بر پاپکورن‌های تولیدی در سه سطح توان W ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ و سه سطح فاصله نمونه‌ها از منبع تابشی ۱۰ cm، ۲۰ و ۳۰ در نمک ۱٪، رطوبت ۱۴٪ و روغن ۲۰٪ مورد بررسی قرار گرفت.

۳.۲. تعیین خواص پاپینگ

۱.۳.۲. میزان بازده پاپینگ^۲

میزان بازده پاپینگ با اندازه‌گیری وزن دانه‌های اولیه و دانه‌های حجیم‌شده مشخص شده و به‌صورت درصد بیان شد (معادله ۱) [۲۴].

$$\text{Popping yield (\%)} = \frac{(W_{fpg} + W_{spg})}{W} \quad (1)$$

W_{fpg} : وزن دانه‌های حجیم‌شده

W_{spg} : وزن دانه‌های نیمه حجیم‌شده

W_{upg} : وزن دانه‌های حجیم نشده

W : وزن کل دانه‌ها بعد از حجیم شدن: $W_{upg} + W_{spg} + W_{fpg}$

۲.۳.۲. نرخ انبساط حجم

انبساط حجمی در یک سیلندر ۵۰۰ mL اندازه‌گیری شد (معادله ۲) [۲۴].

$$\text{Volume expansion ratio} = \frac{V_f}{V_i} \quad (2)$$

V_f : حجم نهایی دانه‌های حجیم‌شده

V_i : حجم اولیه دانه

۳.۳.۲. درصد پاپینگ

درصد پاپینگ توسط معادله (۳) محاسبه شد [۲۶].

$$\text{Popping percentage (\%)} = \frac{N_p}{N} \times 100 \quad (3)$$

3. Expansion residue

4. Bulk density

1. Power meter

2. Popping yield



۵.۲. پروفایل دمایی

دمای نمونه‌ها در طول فرآیند هر یک ثانیه توسط یک ترمومتر لوترون، ترموکوپل نوع K و یک کامپیوتر برای ثبت لحظه‌ای دمای اندازه‌گیری شد [۲۸].

دانکن و به کمک نرم افزار SAS نسخه ۹/۳ (SAS Institute Inc) صورت گرفت.

۳. نتایج و بحث

۶.۲. میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱

ساختار نمونه‌ها در تیمارهای مختلف توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM، Tescan Mira)، تحت شرایط خلأ بالا (۱۰-۴ PA)، شتاب ۱۵ kV و بزرگنمایی ۲۰۰× در طول ریزنگاری بررسی شد (میر و همکاران، ۲۰۱۶). دانه‌های کامل پاپکورن بدون برش مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور تولید تصاویر با وضوح بالا، نمونه‌ها بر روی ستون‌های آلومینیومی نصب شدند و لایه ۸ nm طلا بر روی نمونه‌ها برای تولید یک لایه رسانا اسپری شدند.

۱.۳. تعیین خواص پاپینگ

اثر IR بر خواص پاپینگ در پاپکورن‌های تولیدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از میزان بازده پاپینگ، نرخ انبساط حجم، درصد پاپینگ، آغاز پاپینگ، باقیمانده حجیم‌شده‌ها و دانسیته حجمی در جدول (۱) آورده شده است. با توجه آنالیز واریانس نمونه‌ها، میزان بازده پاپینگ، نرخ انبساط حجم، درصد پاپینگ، آغاز پاپینگ، باقیمانده حجیم‌شده‌ها و دانسیته حجمی در پاپکورن‌ها تغییر معنی‌داری در تیمارهای تحت بررسی داشته است ($P < 0.05$).

۷.۲. آنالیز آماری

نتایج آزمایش‌ها تحت پارامترهای عملیاتی IR، سه سطح توان ۳۵۰ W، ۴۵۰ و ۵۵۰ W، و سه سطح فاصله نمونه‌ها از منبع تابشی ۱۰ cm، ۲۰ و ۳۰ به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل گردید. تمام مقایسه میانگین‌ها در سطح ۵٪ با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای

مشاهده شد با افزایش توان IR و کاهش در فاصله نمونه‌ها از منبع تابش مادون قرمز، میزان بازده پاپینگ، نرخ انبساط حجم و درصد پاپینگ به طور معنی‌داری افزایش یافت ($P < 0.05$)، و آغاز پاپینگ، باقیمانده حجیم‌شده‌ها و دانسیته حجمی به طور معنی‌داری کاهش یافت ($P < 0.05$).

جدول (۱) خواص پاپینگ پاپکورن‌های تولیدشده توسط مادون قرمز

Table 1. Popping properties of expanded popcorn through IR

توان Power (W)	فاصله Distance (cm)	بازده پاپینگ Popping yield (%)	درصد پاپینگ Popping percentage (%)	حجم حجیم شدن Volume expansion	شروع پاپینگ Popping commencement (Min)	باقیمانده حجیم شده‌ها Expansion residue (%)	چگالی حجمی Bulk density (g/cm ³)
550	10	100.00±0.00A	100.00±0.00A	22.50±1.01A	1.58±0.08I	0.00±0.00H	0.03±0.01H
	20	67.82±1.67C	71.60±1.33D	9.27±1.93D	8.12±0.00F	28.40±0.67E	0.07±0.01F
	30	71.62±2.33B	73.33±1.33C	8.00±1.65E	22.37±0.00C	26.67±1.67F	0.09±0.02E
450	10	100.00±0.00A	100.00±0.00A	20.50±2.03B	2.07±0.11H	0.00±0.00H	0.03±0.02H
	20	66.07±1.33D	65.43±0.67E	6.67±2.22F	10.58±0.00E	34.57±1.93D	0.10±0.02D
	30	48.25±1.67F	54.43±3.33G	5.50±1.67H	24.53±0.00B	45.57±2.33B	0.13±0.01B
350	10	99.69±0.25A	86.42±2.67B	14.15±0.88C	6.15±0.20G	13.58±1.53G	0.04±0.01G
	20	57.66±0.67E	62.03±1.52F	6.00±1.53G	18.31±0.00D	37.97±1.33C	0.11±0.02C
	30	33.04±2.33G	31.25±1.41H	3.81±1.71I	27.32±0.00A	68.75±1.71A	0.18±0.02A

سطحی در پاپکورن تولیدشده توسط تیمارهای مختلف IR، در شکل (۲) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۲)، در پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR حفره‌های متعددی (لانه زنبوری) مشاهده شد. بافت پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR پس از افزایش حجم و تغییر در ساختار نشاسته نمونه‌ها، به شکل لانه زنبوری تبدیل شده و همین عامل باعث افزایش حجم نشاسته نمونه‌ها شده و به طبع افزایش حجم کلی نمونه‌ها پس از انجام فرآیند تولید پاپکورن توسط IR رخ داده است.

مشخص شد که در پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR با کاهش فاصله نمونه از منبع IR و افزایش توان لامپ IR، اندازه حفره‌ها افزایش می‌یابد یا به عبارت دیگر تعداد حفره‌ها در هر واحد سطح کاهش می‌یابد.

حداکثر افزایش اندازه حفره (کاهش تعداد حفره‌ها در هر واحد سطح) پاپکورن‌های تولیدشده در توان IR ۵۵۰ W و فاصله ۱۰ cm مشاهده شد.

افزایش اندازه حفره‌ها به معنی افزایش حجم نمونه‌ها است و کارایی فرآیند حجیم شدن پاپکورن‌ها توسط فرآیند IR را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از خواص پاپینگ توسط IR (جدول ۱) با نتایج تجزیه و تحلیل آنالیز SEM (شکل ۲) مطابقت دارد، به طوری که با افزایش میزان بازده پاپینگ، نرخ انبساط حجم و درصد پاپینگ، اندازه حفره‌ها افزایش یافته است.

در شکل (۳) مقایسه بین پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR و آن نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳) پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR دارای حجم و کیفیت بیشتری نسبت به پاپکورن‌های تولیدشده توسط آن دارند و کارایی سیستم مادون قرمز مشاهده شده است.

با توجه به مطالعات محققان گزارش شد که بافت پاپکورن‌های حجیم‌شده، مربوط به خواص پاپینگ است [۳۱]. همچنین در مقاله‌ای گزارش شد که نرمی بافت پاپکورن، بهبود خواص طعم و احساس دهانی بهتر، ممکن است مربوط به نرخ انبساط حجم بالاتر باشد [۳۲]. در یک مطالعه، اثر فرآیند پاپینگ تغنگی بر گندم دودانه‌ای^۱، گندم

بالاترین میزان بازده پاپینگ در پاپکورن تولیدشده توسط پرتو IR در توان ۵۵۰ W، فاصله ۱۰ cm و توان ۴۵۰ W، فاصله ۱۰ cm مشاهده شد. بالاترین درصد پاپینگ در پاپکورن تولیدشده توسط پرتو IR در توان ۵۵۰ W، فاصله ۱۰ cm و توان ۴۵۰ W، فاصله ۱۰ cm مشاهده شد. بالاترین میزان نرخ انبساط حجم ($1/0.1 \pm 22/50$ mL) در پاپکورن تولیدشده توسط پرتو IR در توان ۵۵۰ W، فاصله ۱۰ cm به دست آمد. کمترین مقدار آغاز پاپینگ (min) در پاپکورن تولیدشده توسط پرتو IR در توان ۵۵۰ W، فاصله ۱۰ cm بود. کمترین میزان باقیمانده حجیم‌شده‌ها (۰.۰۰٪) در پاپکورن تولیدشده توسط پرتو IR در توان ۵۵۰ W، فاصله ۱۰ cm و توان ۴۵۰ W، فاصله ۱۰ cm مشاهده شده بود. کمترین دانسیته حجمی (g/cm^3) در پاپکورن تولیدشده توسط پرتو IR در توان ۵۵۰ W، فاصله ۱۰ cm و توان ۴۵۰ W، فاصله ۱۰ cm به دست آمد. با توجه به نتایج جدول (۱)، تیمار بهینه در پاپکورن تولیدشده توسط پرتو IR در توان ۵۵۰ W، فاصله ۱۰ cm بود. تیمار توان IR ۵۵۰ W، فاصله ۱۰ cm در مقایسه با تیمار توان IR ۴۵۰ W، فاصله ۱۰ cm، نرخ انبساط حجم بیشتر و آغاز پاپینگ (زمان شروع فرآیند) کمتری داشت.

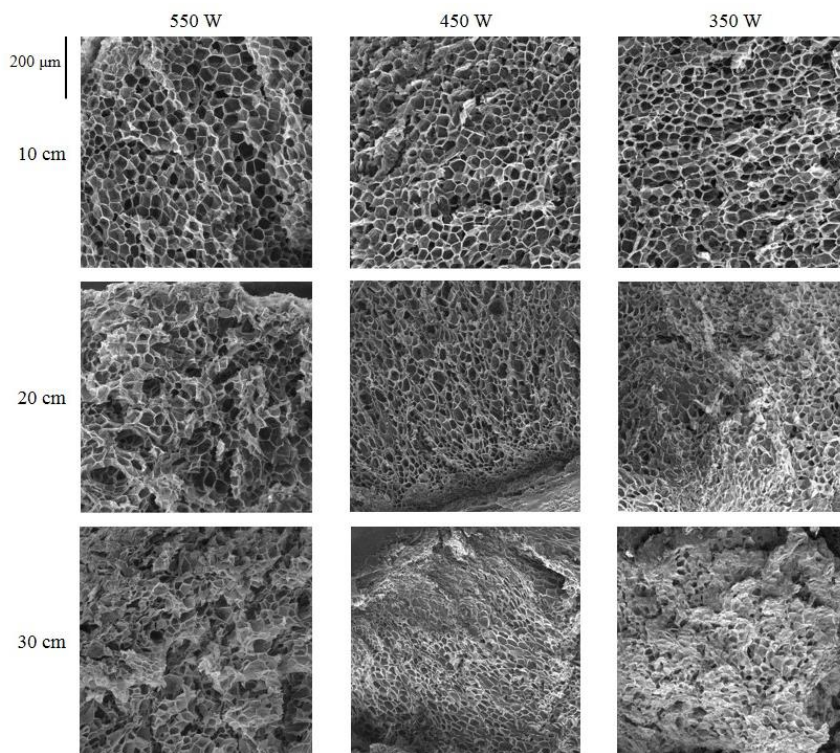
حجم انبساط می‌تواند تحت تأثیر نوع فرآیند حجیم کردن، ژنوتیپ نمونه‌ها، رطوبت نمونه‌ها، و ویژگی‌های فیزیکی دانه (تراکم و ابعاد) قرار گیرد [۸، ۲۹]. در مطالعات متعدد گزارش شده است که حداکثر حجم انبساط در محدوده رطوبت از ۱۵/۵٪ تا ۱۱/۰٪ اتفاق افتاد است [۸، ۹، ۲۹]. گزارش شده است که دانسیته حجمی دانه‌های غلات به شدت پس از فرآیند حجیم شدن دانه‌ها کاهش می‌یابد [۳۰].

۲.۳. مورفولوژی سطح پاپکورن‌ها توسط میکروسکوپ

الکترونی روبشی

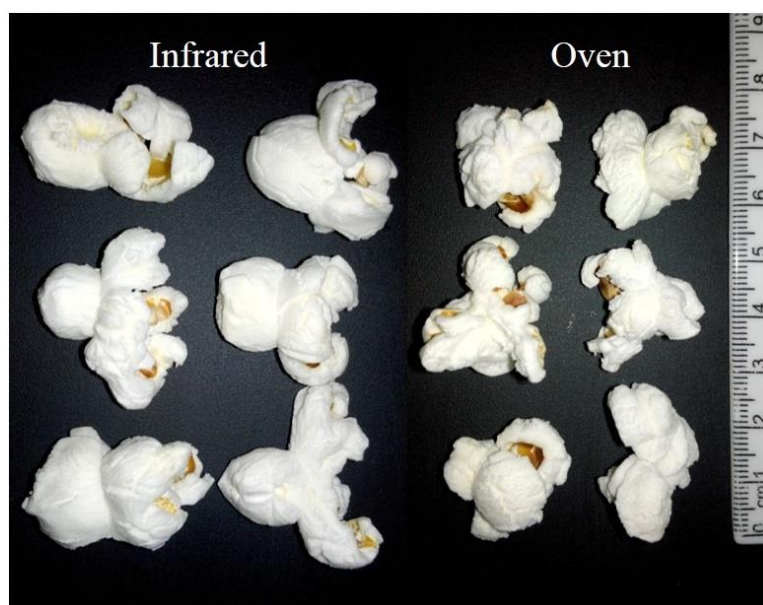
آنالیز SEM برای بررسی تغییرات ساختاری در سطح پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR استفاده شد. تغییرات

معمولی، برنج، گندم سیاه، چاودار و جو مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه توسط آنالیز SEM گزارش شده است که پافینگ باعث تغییر قابل توجهی در ویژگی‌های فیزیکی و ساختار نمونه‌ها می‌شود [۳۱]، که با نتایج مطالعه ما ارتباط داشت.



شکل (۲) آنالیز SEM پاپکورن‌های تولید شده توسط مادون قرمز

Fig 2. SEM analysis of expanded popcorn through IR



شکل (۳) مقایسه پاپکورن‌های تولید شده توسط مادون قرمز (توان مادون قرمز ۵۵۰ W و فاصله ۱۰ cm) و آون

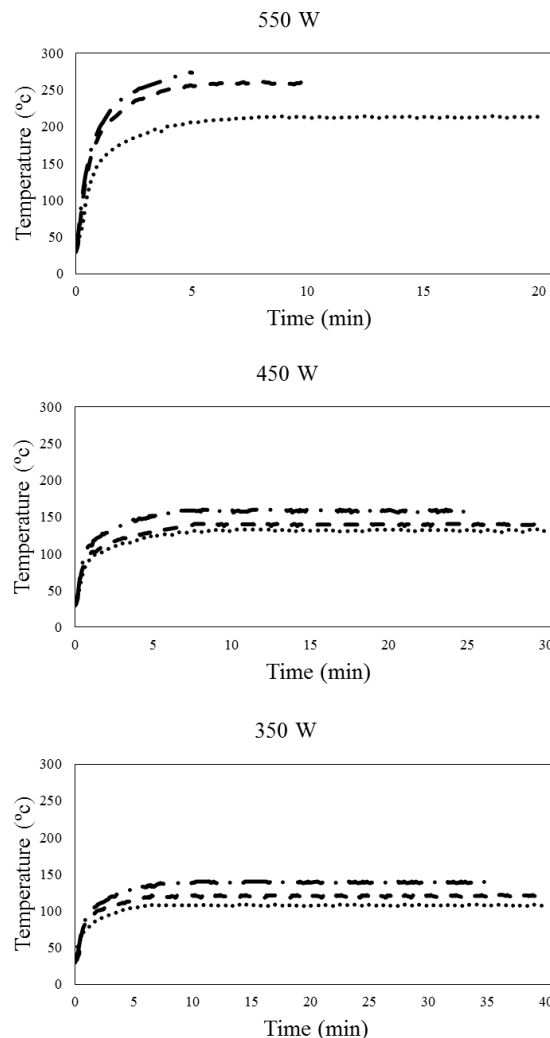
Fig 3. Comparison of expanded popcorn through IR (infrared power 550 W and distance 10 cm) and oven

قیمت انرژی مصرفی به میزان ۵۴/۵٪ در مقایسه با سیستم حرارتی اجاق گاز مایع (LP) دارای برتری بود [۳۴].

۳.۳. پروفایل دمایی

پروفایل‌های دمایی تعیین شده در توان‌های مختلف تابش IR و فاصله‌های مختلف نمونه از لامپ مادون قرمز در پاپکورن‌های تولید شده توسط IR در شکل (۴) نشان داده شده است. حرارت سریع و بالای تولید شده توسط اشعه مادون قرمز باعث فرآیند پاپینگ شد. این عمل احتمالاً به علت جذب بالای گرما بر روی سطح و هدایت حرارتی از سطح دانه‌های ذرت به مرکز این دانه‌ها صورت پذیرفته است.

مقایسه فرآیند حرارتی مادون قرمز و سیستم حرارت معمولی برای خشک کردن ماکارونی نشان داد که مصرف انرژی فرآیند حرارتی مادون قرمز تقریباً نصف میزان انرژی مصرفی توسط سیستم حرارت معمولی بود و همچنین دارای مزایای بیشتری از چند جنبه دیگر مانند کاهش تعداد کارگران، کاهش زمان فرایند و همچنین کاهش فضای تجهیزات مورد استفاده بود [۳۳]. ساکای و هانزاوا (۱۹۹۴)، عملکرد سیستم حرارتی تابش مادون قرمز دور را با سیستم حرارتی معمولی برای پختن کیک برنج و کباب کردن ماهی مورد مقایسه قرار دادند. بر اساس نتایج گزارش شده مشخص گردید که سیستم حرارتی تابش مادون قرمز دور در کاهش مصرف انرژی به میزان ۲۶/۷٪، کاهش زمان پخت به میزان ۶۶/۷٪ و کاهش



شکل (۴) پروفایل دمایی پاپکورن‌های تولید شده توسط مادون قرمز در 10 cm (---□---)، 20 cm (.....□.....) و 30 cm (.....□.....).

Fig 4. Temperature profile of expanded popcorn through IR in 10 cm (---□---), 20 cm (.....□.....) and 30 cm (.....□.....).

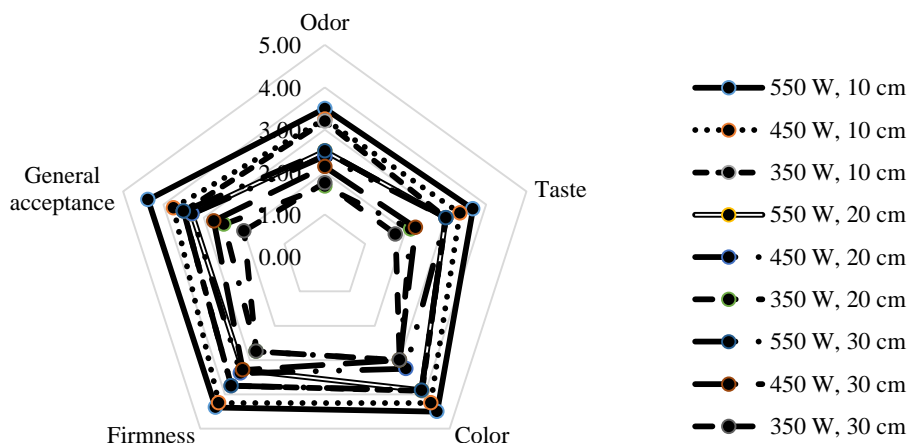
تیمار شده با IR اندازه‌گیری شد. بالاترین دما $127/8^{\circ}\text{C}$ در توان IR 200 W ، فاصله 5 cm و 1 min گزارش شد [۱۶].

۴.۳. ارزیابی حسی

ارزیابی حسی (عطر، طعم، رنگ، بافت و مقبولیت کلی) پاپکورن‌های تولید شده توسط IR در توان‌های مختلف تابش IR و فاصله‌های مختلف نمونه از لامپ مادون‌قرمز در شکل (۵) نشان داده شده است.

بیشترین امتیاز ارزیابی حسی داده‌شده توسط پانل‌های حسی در پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR در تیمار توان 550 W و 550 cm فاصله 10 cm ارزیابی شد. همچنین کمترین امتیاز ارزیابی حسی داده‌شده توسط پانل‌های حسی در پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR در تیمار توان 350 W و فاصله 30 cm بود.

به‌طور کلی امتیازهای ارزیابی‌شده توسط پانل‌های حسی، بین کمترین $1/75$ تا بیشترین $4/50$ متغیر بود.



شکل (۵) خواص حسی پاپکورن‌های تولیدشده توسط مادون‌قرمز

Fig 5. Sensory analysis of expanded popcorn through IR

ویژگی‌های عملکردی و حسی مطلوب در غذاها با فرآوری، منجر به افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان می‌شود. فرآیندهای حجیم کردن غلات با توجه به تغییر خواص دانه‌ها و افزایش خواص حسی مطلوب منجر به افزایش پذیرش و مصرف آن‌ها می‌شود [۳۶]. در پاپکورن، خواص پاپینگ مهم‌ترین ویژگی‌ها به این منظور هستند یا به عبارت دیگر با انجام فرآیند

بیشترین حرارت تولیدشده در پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR در تیمار توان 550 W و فاصله 10 cm به میزان 274°C اندازه‌گیری شد. با توجه به شکل (۴)، مشاهده شد که در تیمار توان 550 W و فاصله 10 cm همچنان دمای محصول در حال افزایش است و در زمان بیشتر به دمای بالاتری خواهد رسید اما با توجه به پایان فرآیند پاپینگ و کفایت فرآیند تولید پاپکورن توسط IR از ادامه فرآیند جلوگیری شد.

کمترین حرارت تولیدشده در پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR در تیمار توان 350 W و فاصله 30 cm به میزان $108/3^{\circ}\text{C}$ اندازه‌گیری شد.

در یک تحقیق، پروفایل دمایی دانه‌های هل تیمار شده با IR اندازه‌گیری شد. بالاترین دما $187/8^{\circ}\text{C}$ در توان IR 300 W ، فاصله 5 cm و $2/5\text{ min}$ گزارش شده است [۲۸]. در یک مطالعه مشابه، مشخصات دمایی پودر فلفل قرمز

پاپکورن به‌عنوان یکی از محبوب‌ترین میان‌وعده‌ها در جهان به‌ویژه برای مصرف انسان‌ها توصیه شده است. پاپکورن پس از حجیم شدن دارای خواص عملکردی و غذایی مناسبی است و به‌شدت به‌عنوان میان‌وعده توصیه شده است [۳۵]. خواص حجیم شدن مستقیماً با پذیرش مصرف‌کنندگان و خواص حسی مرتبط است. تغییر در

که در پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR با کاهش فاصله نمونه از منبع IR و افزایش توان لامپ IR، اندازه حفره‌ها افزایش می‌یابد یا به عبارت دیگر تعداد حفره‌ها در هر واحد سطح کاهش می‌یابد. بیشترین حرارت تولیدشده در پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR در تیمار توان IR ۵۵۰ W و فاصله ۱۰ cm به میزان 274°C اندازه‌گیری شد. بیشترین امتیاز ارزیابی حسی داده‌شده توسط پانل‌های حسی در پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR در تیمار توان IR ۵۵۰ W و فاصله ۱۰ cm ارزیابی شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، فرآیند پاپینگ IR دارای کارایی بالا به‌منظور تولید پاپکورن است. درنهایت، می‌توان پیشنهاد کرد که IR روشی کارآمد در تولید پاپکورن بوده است. همچنین می‌توان از آن برای انجام فرآیند پاپینگ در سایر غلات استفاده کرد زیرا توانایی بالقوه تولید فرآورده‌های حجیم‌شده غلات را دارا می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران و در قالب رساله دکتری انجام شده است.

پاپینگ و تولید پاپکورن خواص حسی دانه ذرت تغییر کرده و مصرف پاپکورن افزایش می‌یابد [۳۷].

۴. نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مطالعه بررسی اثر مادون قرمز (IR) بر پاپکورن‌های تولیدی در سه سطح توان ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ W و سه سطح فاصله نمونه‌ها از منبع تابشی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ cm بر تغییر برخی ویژگی‌های فیزیکی و حسی پاپکورن (خواص پاپینگ، ارزیابی حسی، مورفولوژی سطحی (SEM)، و پروفایل دمایی) بود. مشاهده شد که به‌طور معمول با افزایش قدرت IR و کاهش در فاصله نمونه‌ها از منبع تابش مادون قرمز، میزان بازده پاپینگ، نرخ انبساط حجم و درصد پاپینگ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ($P < 0.05$)، و آغاز پاپینگ، باقیمانده حجیم‌شده‌ها و دانسیته حجمی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ($P < 0.05$). در آنالیز SEM، بافت پاپکورن‌های تولیدشده توسط IR پس از افزایش حجم و تغییر در ساختار نشاسته نمونه‌ها، به شکل لانه زنبوری تبدیل شده و همین عامل باعث افزایش حجم نشاسته نمونه‌ها شده و به طبع افزایش حجم کلی نمونه‌ها پس از انجام فرآیند تولید پاپکورن توسط IR رخ داده است. مشخص شد

منابع

- [1] Kuchaki, A. (1388). Agriculture in arid regions: cereals, industrial plants and forage plants. Academic Center for Education, Culture and Research (Ferdowsi University Mashhad). [In Persian]
- [2] CODEX. (2006). Draft action plan for implementation of the global Strategy on diet. *J Phys Act Health*, 3. CL 2006/44-CAC.
- [3] Raninen, K., Lappi, J., Mykkanen, H., & Poutanen, K. (2011). Dietary fiber type reflects physiological functionality, comparison of grain fiber, inulin, and polydextrose. *Nutr. Rev.*, 69(1), 9e21.
- [4] Miller, H. E., Rigelhof, F., Marquart, L., Prakash, A., & Kanter, M. (2000). Antioxidant content of whole grain breakfast cereals, fruits and vegetables. *J Am Coll Nutr*, 19(3), 312Se319S.
- [5] Mishra, G., Joshi, D. C., & Panda, B. K. (2014). Popping and puffing of cereal grains: a review. *J. grain processing storage*, 1(2), 34-46.
- [6] Hosene CR, Zeleznak K and Abdelrahman A, (1983). Mechanism of popcorn popping. *J. Cereal Sci.* 1: 43-52.
- [7] Saberi, B., Farahnaki, A., Majzobi, M. (1390). Investigation of physical properties of natural and hydroxy-propylized wheat and oat starch gels. *J. Food Research (AGRICULTURAL SCIENC)*. 22, 1. [In Persian]
- [8] Allred-Coyle TA, Toma RB, Reiboldt W and Thaku M, (2000). Effects of moisture content, hybrid variety, kernel size, and microwave wattage on the expansion volume of microwave popcorn. *Int J Food Sci Nutr.* 51: 389-394.
- [9] Shimoni E, Dirks EM and Labuza TP, (2002). The relation between final popped volume of popcorn and thermal-physical parameters. *LWT-Food Sci Technol.* 35: 93-98.
- [10] Cañizares, L. D. C. C., da Silva Timm, N., Ramos, A. H., Neutzling, H. P., Ferreira, C. D., & Oliveira, M. (2020). Effects of moisture content and

- expansion method on the technological and sensory properties of white popcorn. *Int J Gastron Food Sci*, 22, 100282.
- [11] Mir, S. A., Bosco, S. J. D., Shah, M. A., & Mir, M. M. (2016). Effect of puffing on physical and antioxidant properties of brown rice. *Food Chem.*, 191, 139-146.
- [12] Puangjinda, K., Matan, N., & Nisoa, M. (2016). Effects atmospheric radio-frequency plasma treatment on popping characteristics of popped rice and its nutritional evaluation. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 35, 119-124.
- [13] Llopart, E. E., & Drago, S. R. (2016). Physicochemical properties of sorghum and technological aptitude for popping. Nutritional changes after popping. *LWT-Food Sci Technol*, 71, 316-322.
- [14] Singh, J., & Singh, N. (1999). Effects of different ingredients and microwave power on popping characteristics of popcorn. *J. Food Eng.*, 42(3), 161-165.
- [15] Lee, E.H. (2019). A review on applications of IR heating for food processing, *Innov Food Pro Tech*.
- [16] Shavandi, M., Taghdir, M., Abbaszadeh, S., Sepandi, M., & Parastouei, K. (2020). Modeling the inactivation of *Bacillus cereus* by infrared radiation in paprika powder (*Capsicum annum*). *J. Food Saf.*, e12797s.
- [17] Shavandi, M., Sadeghi, A., & Sarani, A. (2020). Modeling the effect of different infrared treatment on *B. cereus* in cardamom seeds and using genetic algorithm-artificial neural network. *J. Food Bio. Eng.*, 3(1), 29-34.
- [18] Shavandi, M., Kashaninejad, M., Sadeghi, A., Jafari, S. M., Hasani, M. (2018). Evaluation of Selective Infrared Radiation on Inactivation of *Bacillus Cereus* by Response Surface Methodology. *Food Eng. research (Journal of Agricultural Engineering Research)*, 17, 57-70. [In Persian]
- [19] Javanmard, M., & Shavandi, M. (2021). Effect of pulsed infrared on safranal, crocin and picrocin and color parameters in saffron (*Crocus sativus* L.). *Innov. Food Technol.*, 8(3), 349-363. [In Persian]
- [20] Asadiamirabadi, A., Shavandi, M., & Kashaninezhad, M. (2020). Modeling of Blackberry Drying Process by Double sided infrared System using Genetic Algorithm–Artificial Neural Network Method. *Innov. Food Technol.*, 7(2), 201-210. [In Persian]
- [21] Staack, N., Ahrné, L., Borch, E. and Knorr, D. (2008a). Effect of infrared heating on quality and microbial decontamination in paprika powder. *J. Food Eng.*, 86(1), 17-24.
- [22] Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis. *Biotechnol. Prog*, 2(3), 109-119.
- [23] ASAE (2000). ASAE standards 2000. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers.
- [24] Mishra, G., Joshi, D. C., Mohapatra, D., & Babu, V. B. (2015). Varietal influence on the microwave popping characteristics of sorghum. *J. Cereal Sci.*, 65, 19-24.
- [25] Shavandi, M., Javanmard, M., & Basiri, A. (2022). Novel popping through infrared: Effect on some physicochemical properties of popcorn (*Zea Mays* L. var. Everta). *LWT-Food Sci Technol*, 155, 112955.
- [26] Devi, M. K., & Das, S. K. (2018). Microwave popping characteristics of paddy as affected by sample placement and geometry and process optimization. *J. Food Eng.*, 221, 45-53.
- [27] Mishra, G., Joshi, D. C., & Mohapatra, D. (2015). Optimization of pretreatments and process parameters for sorghum popping in microwave oven using response surface methodology. *J. Food Sci. Technol.*, 52(12), 7839-7849.
- [28] Shavandi, M., Kashaninejad, M., Sadeghi, A., Jafari, S. M., & Hasani, M. (2020). Decontamination of *Bacillus cereus* in cardamom (*Elettaria cardamomum*) seeds by infrared radiation and modeling of microbial inactivation through experimental models. *J. Food Saf.*, 40(1), e12730.
- [29] Gökmen, S. (2004). Effects of moisture content and popping method on popping characteristics of popcorn. *J. Food Eng.*, 65(3), 357-362.
- [30] Mariotti, M., Alamprese, C., Pagani, M. A., & Lucisano, M. (2006). Effect of puffing on ultrastructure and physical characteristics of cereal grains and flours. *J. Cereal Sci.*, 43(1), 47-56.
- [31] Ceylan, M., & Karababa, E. (2002). Comparison of sensory properties of popcorn from various types and sizes of kernel. *J. Sci. Food Agric.*, 82(1), 127-133.
- [32] Dofing, S. M., Thomas-Compton, M. A., & Buck, J. S. (1990). Genotype× Popping Method Interaction for Expansion Volume in Popcorn. *Crop Sci.*, 30(1), 62-65.
- [33] Ginzburg, A. S. (1969). Theoretical principles of heating and drying using infra-red radiation. In A. S. Ginsberg (Ed.), Application of infra-red radiation in food processing (pp. 1-71). London: Leonhard Hill Books.
- [34] Sakai, N. and Hanzawa, T. (1994). Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends Food Sci. Technol.* 5(11):357-62.
- [35] Park, D., Allen, K. G., Stermitz, F. R., & Maga, J. A. (2000). Chemical composition and physical



characteristics of unpopped popcorn hybrids. *J Food Compost Anal.*, 13(6), 921-934.

[36] Dharmaraj, U., Ravi, R., & Malleshi, N. G. (2012). Physicochemical and textural characteristics of expanded finger millet. *Int. J. Food Prop.*, 15(2), 336-349.

[37] Arnhold, E., Silva, R. G., & Viana, J. M. S. (2010). Seleção de linhagens S5 de milho-pipoca com base em desempenho e divergência genética. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 32(2), 279-283.