

**Research Article****Investigation of the effect of sterilization methods on the quality characteristics of cumin****Edris Rahmati<sup>1</sup>, Mohammad Hadi Khoshtaghaza<sup>2\*</sup>, Ahmad Banakar<sup>3</sup>, Mohammad-Taghi Ebadi<sup>4</sup>, Zohreh Hamidi-Esfahani<sup>5</sup>**

1. Ph.D. student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran

2. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran

3. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran

4. Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran

5. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran

(Received 10 May 2022, Received in revised form 17 June 2022, Accepted 20 June 2022)

**Abstract**

Microbial contamination of spices and medicinal plants at various stages of the production leads to low quality and shorter shelf life. As a result, sterilization is required to decrease the microbial load. The purpose of the current study was qualitative comparison of the two methods: induction heating technology (115, 135 and 155 °C for 45, 60 and 75 s) with gamma irradiation (5 and 10 kGy) for sterilization of cumin seeds. For this purpose, microbial load (total microbial count, mold and yeast and coliform), total color differences and essential oil content were studied as quality properties of cumin seeds. After examining the influence of various induction heating system treatments on the specified parameters, process optimization was carried out by using the response surface methodology. Optimal decontamination conditions were obtained with a combined treatment of 151 °C -46 s. In these conditions, total microbial count, mold and yeast, coliform, total color differences and the amount of essential oil were 3.06 CFU/g, 3.1 CFU/g, 2.28 CFU/g, 4.15 and 2.57%, respectively. The optimal points of the induction heating method were validated and compared with the gamma irradiation method. The results showed that gamma irradiation caused in the greatest decrease of microbial load (1.52 CFU/g) (10 kGy). The least amount total color differences were found at 5 kGy treatment with a value of 2.76. No significant effect on total color differences was identified between gamma irradiation (10 kGy) and induction heating system. The highest and lowest levels of essential oil were found in the induction heating treatment (151 °C -46 s) and gamma irradiation (5 kGy), with the values of 2.45 and 1.7 %, respectively. According to the results of scanning electron microscope, induction heating led to a change in the surface structure, pores and cracks in the seed surface compared to gamma irradiation.

**Keywords: Spices, Microbial load, Irradiation, Decontamination, Thermal processing, Scanning electron microscope.****How to cite this article:**

Edris Rahmati, E., Khoshtaghaza\*, M-H., Banakar, A., Ebadi, M-T., Hamidi-Esfahani, Z., (2022). Investigation of the effect of sterilization methods on the quality characteristics of cumin. *Innov. Food Technol.*, 10(1), 15-33.

\* Corresponding author: [khoshtag@modares.ac.ir](mailto:khoshtag@modares.ac.ir)

### مقاله پژوهشی

## بررسی تأثیر روش‌های ضدعفونی کردن بر خصوصیات کیفی زیره سبز

ادریس رحمتی<sup>۱</sup>، محمدهادی خوش تقاضا<sup>۲\*</sup>، احمد بناکار<sup>۳</sup>، محمدتقی عبادی<sup>۴</sup>، زهره حمیدی اصفهانی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴. استادیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۵. استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰)

### چکیده

آلوده شدن میکروبی گیاهان دارویی و ادویه‌ها در مراحل مختلف فرآیند تولید منجر به کاهش کیفیت و ماندگاری محصول می‌گردد. لذا ضدعفونی کردن آنها به منظور کاهش بار میکروبی ضروری است. هدف از این تحقیق مقایسه کیفی دو روش گرمایش القایی (دما °C ۱۱۵، ۱۳۵ و ۱۵۵ به مدت ۴۵ s، ۶۰ و ۷۵) و تابش‌دهی گاما (دوز تابش دهی kGy ۵ و ۱۰) برای ضدعفونی کردن دانه زیره سبز بود. بدین منظور بار میکروبی (شمارش کلی میکروبی، کپک و مخمر و کلی‌فرم)، میزان اختلاف رنگ کلی و مقدار اسانس به عنوان صفات کیفی دانه زیره مورد بررسی قرار گرفتند. پس از بررسی اثر تیمارهای مختلف سامانه گرمایش القایی بر صفات مورد نظر، بهینه‌سازی فرآیند با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد. شرایط بهینه ضدعفونی کردن گرمایش القایی در دمای °C ۱۵۱ و زمان ۴۶ s ثانیه به دست آمد. در این شرایط مقادیر شمارش کلی میکروبی، کپک و مخمر، کلی‌فرم، میزان اختلاف رنگ کلی و مقدار اسانس به ترتیب CFU/g ۳/۰۶، ۳/۱، ۲/۲۸، ۴/۱۵ و ۲/۵۷٪ به دست آمد. پس از اعتبارسنجی نقاط بهینه روش گرمایش القایی، مقایسه این نقاط با روش تابش‌دهی گاما انجام شد. بیشترین کاهش بار میکروبی با مقدار ۱/۵۲ CFU/g در تابش‌دهی گاما (دوز ۱۰ kGy) مشاهده شد. کمترین میزان اختلاف رنگ کلی در دوز ۵ kGy تابش‌دهی گاما با مقدار ۲/۷۶ به دست آمد. تفاوت معنی‌داری در میزان اختلاف رنگ کلی بین تیمار ۱۰ kGy تابش‌دهی گاما و سامانه گرمایش القایی مشاهده نشد. بیشترین و کمترین مقدار اسانس به ترتیب در تیمار گرمایش القایی (دمای °C ۱۵۱ و زمان ۴۶ s) و تابش‌دهی گاما (دوز ۵ kGy) با مقدار ۲/۴۵ و ۱/۷٪ مشاهده شد. طبق نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی، گرمایش القایی منجر به تغییر ساختار سطحی، منافذ و ترک‌هایی در سطح دانه زیره در مقایسه با تابش‌دهی گاما شد.

واژه‌های کلیدی: ادویه‌ها، بار میکروبی، پرتودهی، ضدعفونی کردن، فرآوری حرارتی، میکروسکوپ الکترونی.

## ۱. مقدمه

ادویه‌ها محصولات کشاورزی هستند که عمدتاً به‌عنوان طعم‌دهنده در غذاها، شیرینی‌ها و نان، گوشت و همچنین به‌عنوان نگهدارنده در مواد خوراکی استفاده می‌شوند [۱، ۲]. به‌طور کلی، طعم و عطر اصلی ادویه‌ها به دلیل ترکیبات فرار آن‌ها است. بنابراین، حفظ این ترکیبات برای پذیرش محصول مهم است. در حال حاضر از مهم‌ترین ادویه‌ها در تجارت جهانی می‌توان به هل، وانیل، فلفل سیاه، میخک، زنجبیل، دارچین و زردچوبه در مناطق گرمسیری و زیره سبز، گشنیز، مریم گلی، آویشن و نعنای در مناطق غیرگرمسیری اشاره کرد [۳]. زیره سبز (*Cuminum cyminum L*) یک محصول تجاری مهم متعلق به خانواده Apiaceae است که به‌عنوان ادویه و چاشنی در غذاها استفاده می‌شود. زیره دارای اثرات ضد باکتریایی، آنتی‌اکسیدانی، ضد سرطانی و ارزش دارویی برای درمان نفخ و اختلالات گوارشی است. این خواص مهم به اسانس و ترکیبات پلی‌فنلی آن نسبت داده شده است [۴، ۵]. دانه زیره حاوی ۳-۴٪ اسانس است که به کمک فرآیند تقطیر با بخار آب یا تقطیر با آب استخراج می‌شود. براساس مطالعات فیتوشیمیایی انجام شده ترکیبات تشکیل‌دهنده اصلی دانه زیره سبز شامل کیومین آلدئید، بتا-پینن و گاما-ترپینن هستند [۱، ۶].

ادویه‌ها مانند سایر محصولات کشاورزی ممکن است در معرض طیف گسترده‌ای از آلودگی‌ها همچون آلودگی با آفت‌کش‌ها، فلزات سنگین، عوامل میکروبی، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای و سایر آلودگی‌های محیطی قرار گیرند [۷، ۸]. آلوده‌شدن گیاهان دارویی ممکن است اثرات تجمعی و افزودنی بر سلامت انسان داشته باشد؛ که در نهایت منجر به اختلالات غددی، ناباروری، سرطان‌زایی و اثرات تراژونیک<sup>۱</sup> می‌گردند. آلودگی ناشی از بار میکروبی در شرایط غیربهداشتی محیط رشد، خشک‌کردن به روش سنتی، سامانه‌های فرآوری و حمل و نقل گیاهان دارویی ایجادشده و در پایان سبب آلودگی با انواع قارچ‌ها به همراه رشد کپک، فساد و تولید مایکوتوکسین می‌گردد [۹، ۱۰]؛ بنابراین

فرآوری ادویه‌ها به‌منظور افزایش ارزش‌افزوده محصول، کاهش ضایعات، ماندگاری بیشتر و ایمنی مصرف‌کننده نیاز است. در این راستا برای کاهش بار میکروبی ادویه‌ها روش‌های مرسوم همچون تدخین با گاز اتیلن اکسید و متیل بروماید، تابش‌دهی گاما و تیمارهای حرارتی همچون بخار و هوای گرم به کار گرفته شده است. تدخین با گاز متیل بروماید و اتیلن اکسید یکی از روش‌های ضدعفونی است که به دلیل اثربخشی و هزینه کم، به‌طور متداول برای کاهش آلودگی میکروبی در گیاهان دارویی و ادویه‌ای به کار گرفته شده است. ولی امروزه این روش‌ها به دلیل تشکیل مواد سمی، سرطان‌زایی، ایمنی و مسائل زیست‌محیطی در اتحادیه اروپا منسوخ شده‌اند [۱۱]. تابش‌دهی گاما روش دیگری است که برای ضدعفونی میکروبیولوژیکی گیاهان دارویی و ادویه‌ای به کار گرفته شده است. بیشینه مقدار شدت پرتوتایی برای مواد غذایی در تابش‌دهی با اشعه گاما نباید از ۱۰ kGy بیشتر گردد، چرا که سلامتی مصرف‌کنندگان را به خطر می‌اندازد و بر ویژگی‌های ساختاری و حسی مواد غذایی تأثیر نامطلوب می‌گذارد [۱۲]. با این حال گزارش‌هایی درباره معایب پرتوتایی همچون تأثیر بر روی خصوصیات کیفی گیاهان دارویی و ادویه‌ای، هزینه زیاد فرآیند، تشکیل مواد رادیولیز در محصولات بسته‌بندی‌شده و عدم استقبال عمومی مصرف‌کنندگان از محصولات پرتودیده ارائه شده است [۱۳-۱۶]. به‌کارگیری تیمارهای حرارتی همچون هوای گرم و بخار به دلیل مصرف زیاد انرژی، تأثیر منفی بر مواد مؤثره ادویه‌ها، پیچیدگی تجهیزات، زمان‌بر بودن فرآیند، افزایش میزان رطوبت محصول نهایی و کاربردی نبودن برای مواد پودری کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۷-۲۰].

معایب روش‌های بیان‌شده، واحدهای فرآوری را به سمت روش‌های نوین ضدعفونی با در نظر گرفتن زمان کوتاه تیماردهی، پیوسته‌بودن فرآیند و عملکرد بی‌ضرر برای کاربران، محصول و محیط‌زیست سوق داده است. گرمایش القایی فناوری جدید است که به‌تازگی در زمینه ضدعفونی کردن و فرآیندهای خشک‌کردن به کار گرفته شده است. در این راستا در پژوهش‌هایی اثر پارامترهای دما، نرخ اسپری‌کردن، قطر ذرات و جرم اولیه بستر بر روی میزان رطوبت، توزیع اندازه ذرات و چگالی ظاهری در دو سامانه‌ی

1. Teratogenic effects

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۰.۲. تهیه دانه زیره سبز

زیره سبز مورد استفاده در این پژوهش از بازار تهران خریداری شد. دانه‌ها به‌منظور حذف ناخالصی‌ها و مواد خارجی با استفاده از الک تمیز و تا زمان استفاده در دمای  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  نگهداری شدند.

### ۲.۰.۲. تیماردهی با سامانه گرمایش القایی

در این مطالعه یک سامانه جدید ضدعفونی پیوسته بر پایه گرمایش القایی برای ضدعفونی کردن دانه زیره سبز به کار گرفته شد. گرمایش القایی یک روش گرمایش الکترومغناطیسی، غیرتماسی و سطحی است. اصول گرمایش القایی براساس قوانین فیزیکی آمپر، قانون القای فارادی و قانون اهم استوار است (روابط ۱، ۲ و ۳).

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

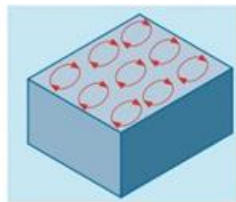
$$P = R \times (I)^2 \quad (3)$$

در این روابط،  $\nabla$  عملگر کرل،  $H$  شدت میدان مغناطیسی ( $A/m$ )،  $J$  چگالی جریان ( $A/m^2$ )،  $D$  چگالی شار الکتریکی ( $C/m^2$ )،  $E$  شدت میدان الکتریکی ( $V/m$ )،  $B$  چگالی شار مغناطیسی ( $T$ )،  $P$  توان ( $J$ )،  $R$  مقاومت الکتریکی رسانا ( $\Omega$ ) و  $I$  جریان الکتریکی ( $A$ ) می‌باشد. طبق روابط بیان شده ولتاژ متناوب داده شده به کوئل منجر به شار جریان متناوب در کوئل القایی می‌گردد. جریان متناوب، میدان مغناطیسی متغیر با زمان در اطراف کوئل ایجاد می‌کند (قانون آمپر). شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده به مقدار جریان، هندسه کوئل و فاصله کوپلینگ کوئل و هسته وابسته است. شار مغناطیسی متغیر با زمان منجر به ایجاد نیرو محرکه الکتریکی می‌گردد (قانون القای فارادی). اگر یک ماده رسانا در داخل میدان الکترومغناطیسی قرار بگیرد بر اساس قانون اهم یک جریان القایی در آن ایجاد می‌گردد (شکل ۱-الف). این جریان‌ها به جریان‌های گردابی معروف هستند که مقدار آنها به القاگر و مقاومت ماده وابسته است. این جریان‌های

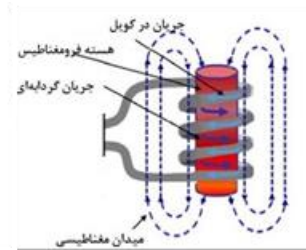
بستر سیال همرفتی و القایی برای خشک شدن ذرات اسپری شده بنزوات سدیم (محلول اسپری شده شامل ۳۰٪ جرمی سدیم بنزوات و ۷۰٪ جرمی آب) مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داده که گرمایش القایی بستر سیال، سبب کوتاه شدن زمان فرآیند و کاهش هزینه‌ها در فرآیندهای غیرپیوسته خشک‌کن بسترسیال شده است. علاوه بر این کنترل دمای گاز داخل بستر دقیق‌تر است [۲۱-۲۳]. در پژوهشی دیگر فناوری گرمایش القایی برای ضدعفونی کردن تخم مرغ به کار گرفته شد. بدین منظور تخم‌مرغ به همراه میکرو مهره‌های مغناطیسی (با اندازه  $50 \mu m$ ) در داخل یک ظرف شیشه‌ای گذاشته شد و در معرض میدان مغناطیسی متغیر قرار گرفت. حرارت از طریق پسماند مغناطیسی در میکرو مهره ایجاد و به محصول منتقل شد. نتایج نشان داد که در طی ۶۰ s تیماردهی در دمای  $68^\circ\text{C}$ ، سالمونلا به میزان  $7/6$  سیکل لگاریتمی کاهش یافته بود که این نتیجه با عملکرد روش گرمایش مرسوم ( $60^\circ\text{C}$  به مدت ۲۱۰ s که منجر به کاهش ۶ سیکل لگاریتمی شده است) قابل مقایسه است [۲۴]. همچنین به‌منظور ضدعفونی کردن شیر خام و آب‌میوه گریپ‌فروت روش گرمایش القایی به کار گرفته شد. براساس نتایج به دست آمده تفاوت دمای ورودی و خروجی در لوله گرمایشی برای گریپ‌فروت و شیر به ترتیب  $34/3^\circ\text{C}$  و  $34/6$  بود. همچنین بعد از ۲۰ s تیماردهی میزان باکتری در شیر و گریپ‌فروت به ترتیب  $98/5\%$  و  $98/6$  کاهش یافته بود [۲۵].

براساس مرور منابع صورت گرفته، فناوری گرمایش القایی به‌عنوان یک روش جدید در زمینه ضدعفونی کردن مؤثر بوده است. به هر حال تاکنون سامانه ضدعفونی پیوسته بر پایه گرمایش القایی برای ضدعفونی کردن ادویه‌ها به کار گرفته نشده است. از آنجایی که آلودگی ادویه‌ها اغلب سطحی است و بخش‌های داخلی محصول از آلودگی مبرا می‌باشند، ضدعفونی کردن سطحی برای حذف این آلودگی‌ها کافی به نظر می‌رسد. بنابراین هدف از این مطالعه بررسی اثر تیمار گرمایش القایی بر بار میکروبی و خواص کیفی دانه زیره سبز بود. بعد از بهینه‌سازی شرایط سامانه گرمایش القایی، نقاط بهینه شده با روش تابش‌دهی گاما مقایسه شد.

یک دبی جرمی مشخص ( $0.5 \text{ g/s}$ ) وارد محفظه سامانه گرمایش القایی شد. نمونه‌ها به وسیله حرکت انتقالی و چرخشی نوار نقاله از منطقه گرمایشی عبور و به سمت خروجی منتقل و در داخل کیسه‌های ضدعفونی جمع‌آوری شدند. ماتریس آزمایش تیمارها در جدول (۱) نشان داده شده است. دمای ضدعفونی و زمان فرآوری که در ارتباط با سرعت مارپیچ است به‌عنوان تیمارهای مورد نظر در سه سطح در نظر گرفته شدند. دمای ضدعفونی و زمان فرآوری به ترتیب با تنظیم دمای نقاله مارپیچی و سرعت مارپیچ به‌واسطه مدار کنترلی انجام شد. بار میکروبی، میزان اختلاف رنگ کلی و مقدار اسانس به‌عنوان صفات مورد بررسی انتخاب شدند. مراحل انجام پژوهش در ادامه به ترتیب مورد بررسی قرار گرفته است.

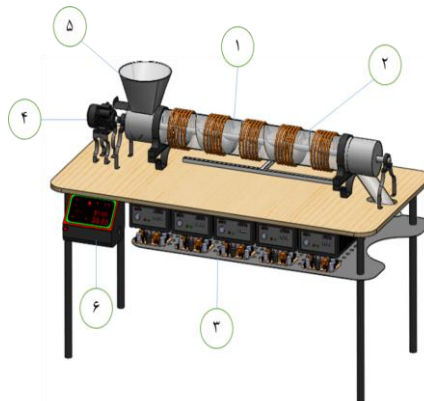


(ب) (ب)



(الف) (A)

شکل (۱) الف) شماتیک میدان مغناطیسی و ب) جریان‌های گردابه‌ای داخل هسته فرومغناطیس  
**Fig 1.** A) Schematic of magnetic field, B) Eddy currents inside the ferromagnetic core



شکل (۲) سامانه ضدعفونی پیوسته بر پایه گرمایش القایی: نقاله مارپیچی (۱)، محفظه نقاله (۲)، مدار الکترومغناطیس (۳)، الکتروموتور (۴)، مخزن محصول (۵) و مدار کنترلی (۶)

**Fig 2.** Continuous decontamination system based on induction heating: Screw conveyor (1), Screw conveyor chamber (2), Electromagnetic circuit (3), electric motor (4), sample tank (5) and control circuit (6)

۱- اثر ژول تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی است که با عبور جریان الکتریکی از یک ماده رسانا صورت می‌گیرد.

جدول (۱) ماتریس آزمایش برای ارزیابی سامانه‌ی گرمایش القایی

Table 1. Experimental matrix for evaluation of induction heating systems

صفات Traits		متغیرهای آزمایش Experimental variable			ردیف Row
مقدار اسانس (%) Essential oil amount	میزان اختلاف رنگ کلی Total color differences	بار میکروبی Microbial load	زمان ضدعفونی Decontamination time duration (s)	دمای ضدعفونی Decontamination temperature (°C)	
*	*	*	45	115	1
*	*	*	60	135	2
*	*	*	75	155	3

دستگاه رنگ‌سنج (ColorFlex, HunterLab, USA) استفاده شد، همچنین اختلاف رنگ کلی نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۴) و (۵) محاسبه شد [۲۹]. صفحه استاندارد مورد استفاده در این پژوهش سرامیک سفید با مشخصات  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  به ترتیب ۹۲/۲۳، ۱/۲۹- و ۱/۱۹ بود.

$$\Delta E = ((\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\Delta L = L_2^* - L_1^*; \Delta a = a_2^* - a_1^* \text{ and } \Delta b = b_2^* - b_1^* \quad (5)$$

در این رابطه،  $L^*$  (روشنایی-تاریکی)،  $a^*$  (سرخ-سبزی)،  $b^*$  (زردی-آبی) و  $\Delta E$  میزان اختلاف رنگ کلی نمونه‌ها را نشان می‌دهند.  $L_2^*$ ،  $a_2^*$ ،  $b_2^*$  مقادیر شاخص‌های رنگ بعد از تیماردهی و  $L_1^*$ ،  $a_1^*$ ،  $b_1^*$  مقادیر شاخص‌های رنگ نمونه شاهد هستند.

### ۳.۴.۲. آنالیز مقدار اسانس

برای استخراج اسانس دانه زیره از دستگاه کلونجر استفاده شد. برای این منظور ۵۰۰ mL آب مقطر به پودر زیره سبز (۲۰ g) اضافه شد. پس از پایان فرآیند استخراج اسانس (h) (۳)، با افزودن سولفات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) آب اسانس خارج شد. مقدار اسانس استخراجی بر اساس فرمول زیر محاسبه شد (معادله ۶) [۳۰].

$$\frac{\text{Essential oil (g)}}{100 \text{ g of cumin}} * 100 = \text{Percentage of Essential oil} \quad (6)$$

### ۴.۴.۲. تصویربرداری الکترونی

در این مطالعه میکروسکوپ الکترونی روبشی (XL 30 SEM, Philips, Netherlands) برای بررسی اثر تیمارهای گرمایش القایی و گاما بر مورفولوژی سطح دانه زیره استفاده

### ۳.۲. پرتودهی با اشعه گاما

برای پرتودهی با سامانه تابش‌دهی گاما، نمونه‌ها به داخل پاکت‌های پلی‌اتیلن منتقل شدند. بدین منظور نمونه‌ها به آزمایشگاه پژوهش‌کنده کاربرد پرتوها واقع در سازمان انرژی اتمی ایران منتقل شد. تابش‌دهی در دوزهای ۵ و ۱۰ kGy به‌وسیله دستگاه گاماسل ( $\text{Gamma cell-220-Co}^{60}$ ) انجام شد. این دو سطح تیماردهی براساس مرور منابع صورت گرفته و مقدار مجاز توصیه شده انتخاب شد [۲۸].

### ۴.۲. خواص میکروبی و کیفی مورد ارزیابی در زیره سبز

#### ۱.۴.۲. آنالیز بار میکروبی

به‌منظور آنالیز میکروبی سطح نمونه‌های تیمار شده، ۵ g دانه زیره سبز با ۴۵ mL آب پپتون<sup>۱</sup> ترکیب و همگن‌سازی با استفاده از همزن به مدت ۲ min انجام شد. سپس ۱۰۰  $\mu\text{L}$  از رقت نهایی بر روی محیط کشت پلیت کانت آگار<sup>۲</sup>، پتیتو دکستروز آگار<sup>۳</sup> و ویلت رد بایل آگار<sup>۴</sup> در سه تکرار برای شمارش کلی میکروب‌ها، کپک و مخمر و کلی‌فرم به ترتیب استفاده شد [۲۰].

#### ۲.۴.۲. آنالیز رنگ

برای اندازه‌گیری پارامترهای رنگی  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  تیمارها و نمونه شاهد (نمونه‌ای که روی آن تیمار اعمال نشده است) از

1. Peptone water
2. Plate Count Agar
3. Potato Dextrose Agar
4. Violet Red Bile Agar

چندجمله‌ای با استفاده از روش سطح پاسخ در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استفاده شد. همچنین با توجه اهمیت هر یک از صفات، از روش تابع مطلوبیت برای بهینه‌سازی صفات مورد بررسی استفاده شد. تابع مطلوبیت در بهینه‌سازی چندین صفت به‌طور همزمان استفاده می‌شود. با توجه به درجه اهمیت هر یک از صفات محدوده تغییرات تابع مطلوبیت در محدوده ۰-۱ (حداقل تا حداکثر) تغییر می‌کند. معادله تابع مطلوبیت میانگین هندسی کل صفات مورد بررسی می‌باشد (رابطه ۷).

$$D = (d_1 * d_2 * \dots * d_n)^{1/n} \quad (7)$$

در این معادله،  $D$  تابع مطلوبیت،  $n$  تعداد صفات و  $d$  صفات مورد بررسی را نشان می‌دهد [۲۹].

به‌منظور دستیابی به سطوح بهینه متغیرهای شمارش کلی میکروبی، کپک و مخمر، کلی‌فرم، میزان اختلاف رنگ کلی و مقدار اسانس، آزمایش‌هایی در سطوح مختلف متغیرهای دمای ضدعفونی و زمان ضدعفونی انجام شد. روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی عددی شرایط عملیاتی سامانه گرمایش القایی و دستیابی به پاسخ‌های بهینه به کار گرفته شد. درجه اهمیت هر یک از متغیرهای مستقل و پاسخ‌ها و تابع هدف در جدول (۲) نشان داده شده است. مقادیر بیشینه و کمینه هر یک از پاسخ‌ها با در نظر گرفتن صفت مورد بررسی انتخاب شدند.

شد. نمونه‌های دانه توسط چسب کربن بر روی پایه‌های آلومینیومی چسبانده شد. سپس سطح آنها به‌منظور رسانا کردن با لایه نازکی از طلا ( $5$  تا  $10$  nm) پوشش دهی شد. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها در ولتاژ شتابی  $25$  KV، شدت جریان  $75$   $\mu$ A و فشار خلاً  $120$  bar آنالیز شدند.

## ۵.۲. آنالیز آماری

در پژوهش حاضر برای ارزیابی سامانه گرمایش القایی از روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> (طرح Central composite با سه تکرار در نقطه مرکزی) استفاده شد. دما و زمان ضدعفونی به‌عنوان تیمارهای مورد بررسی و آنالیز میکروبی، میزان اختلاف رنگ کلی و مقدار اسانس به‌عنوان صفات در نظر گرفته شدند. آنالیز تیمارها با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت (Design-Expert® Software version 10) انجام شد. همچنین برای بررسی اثر تیمارهای پرتودهی گاما از طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SAS (version 9) استفاده شد. پس از بهینه‌سازی متغیرهای سامانه گرمایش القایی، مقایسه میانگین‌ها بین تیمارهای سامانه گرمایش القایی و تابش‌دهی گاما با استفاده از آزمون توکی انجام شد.

## ۶.۲. مدل‌سازی و بهینه‌سازی متغیرهای آزمایش

برای پیش‌بینی مقدار صفات مورد بررسی و همچنین درجه تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل، از مدل‌های رگرسیونی

جدول (۲) معیارها و تابع هدف هر یک از متغیرها در سامانه گرمایش القایی

Table 2. Criteria and objective function of each of the variables in induction heating system

درجه اهمیت Importance	بیشترین مقدار Upper limit	کمترین مقدار Lower limit	تابع هدف Goal function	متغیرها Variables
3	155	115	115-155	دمای ضدعفونی Decontamination temperature
3	75	45	45-75	زمان ضدعفونی Decontamination time duration
3	-	-	کمینه Minimize	شمارش کل Total microbial count
3	-	-	کمینه Minimize	کپک و مخمر Mold and yeast
3	-	-	کمینه Minimize	کلی‌فرم Coliform
3	-	-	کمینه Minimize	میزان اختلاف رنگ کلی Total color differences
3	-	-	بیشینه Maximize	مقدار اسانس Essential oil amount

1. Response surface methodology

## ۳. نتایج و بحث

## ۱.۳. سامانه گرمایش القایی

## ۱.۱.۳. بار میکروبی

دماهای زیاد و سرعت زیاد چرخش نوار نقاله (زمان فرآوری کم) مشاهده شد؛ طوری که کمترین مقدار در ترکیب تیماری  $155^{\circ}\text{C}$  - ۶۰ s با مقدار ۲/۹۶ CFU/g مشاهده گردید. همچنین این مقدار برای کپک و مخمر و کلی‌فرم در ترکیب تیماری  $155^{\circ}\text{C}$  - ۴۵ s با مقدار ۲/۹۵ CFU/g و ۲/۱۵ CFU/g مشاهده شد که این مقادیر نسبت به نمونه‌ای که روی آن تیماری اعمال نشده است (نمونه شاهد) به ترتیب به میزان ۳/۲۴ CFU/g، ۳/۱۷ و ۳/۶ کاهش یافت. با افزایش دمای ضدعفونی مقادیر شمارش کل میکروبها، کپک و مخمر و همچنین کلی‌فرم روند کاهشی داشت. این نتیجه ناشی از اثر حرارتی نقاله مارپیچی است که از طریق فرآیندهای انتقال حرارت همرفتی و هدایتی به سطح محصول منتقل کرده است.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس بار میکروبی در جدول (۳) بیان شده است. مطابق این نتایج اثر ساده دمای ضدعفونی تأثیر معنی‌داری بر شمارش کل میکروبها، کپک و مخمر و کلی‌فرم داشت ( $p < 0.01$ ). همچنین اثر متقابل دما و زمان تأثیر معنی‌داری بر کلی‌فرم داشت ( $p < 0.05$ ). تغییرات بار میکروبی در شرایط مختلف کاری سامانه گرمایش القایی در شکل (۳) نشان داده شده است. بیشترین کاهش بار میکروبی برای شمارش کل میکروبها، کپک و مخمر و کلی‌فرم در

جدول (۳) تجزیه واریانس متغیرهای آزمایش در سامانه گرمایش القایی  
Table 3. ANOVA of Experimental variables in induction heating system

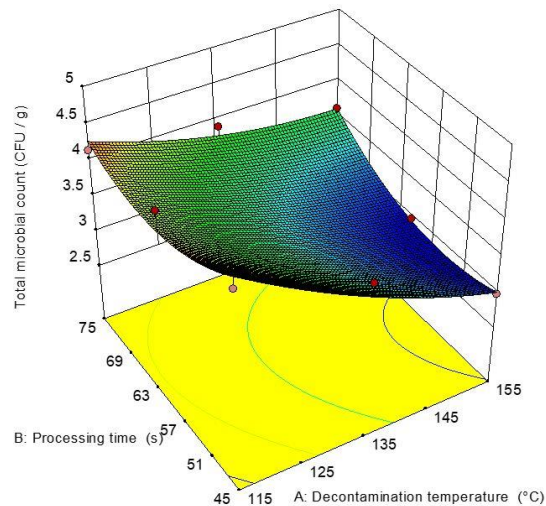
میانگین مربعات Mean of squares					منابع تغییرات Source of variation
مقدار اسانس (%) Essential oil amount	میزان اختلاف رنگ کلی (EA) Total color differences	کلی‌فرم (CFU/g) Coliform	کپک و مخمر (CFU/g) Mold and yeast	شمارش کل (CFU/g) Total microbial count	
0.23**	4.3**	1.57**	0.57*	0.55**	تیمار Treatment
0.11*	8.42**	4.58**	1.64**	1.96**	دما Temperature
0.00306	0.18	0.033	0.03	0.022	زمان Time
0.58**	-	0.091*	0.27	0.22	دما*زمان Temperature*Time
-	-	-	0.17	0.066	دما <sup>۲</sup> Temperature <sup>2</sup>
-	-	-	0.51*	0.34*	زمان <sup>۲</sup> Time <sup>2</sup>
5.99	8.3	3.76	7.41	5.69	ضریب تغییرات Coefficient of variation

\* و \*\* به ترتیب بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد است.  
\* and \*\* significance at the 5 and 1% level, respectively

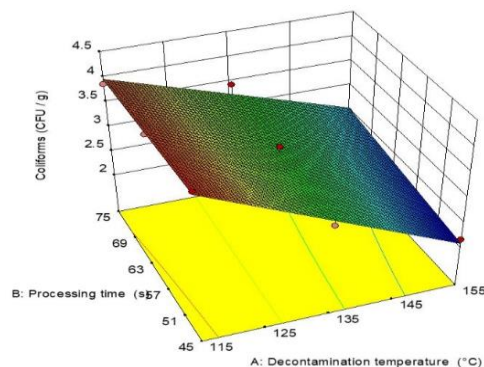


۶kW - فرکانس ۲۷/۱۲ MHz) روی ضدعفونی کردن دانه زیره نشان داد که در زمان کمتر از ۲ min بار میکروبی بیش از ۵ سیکل لگاریتمی کاهش پیدا کرده است [۳۴]. در مطالعه‌ای دیگر تابش مادون قرمز و فرابنفش به منظور حذف بار میکروبی دانه زیره به کار گرفته شد. تیماردهی در دماهای ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ °C طی مدت ۲/۸، ۴/۸ min و ۱/۵۷ هوازی مزوفیلیک را ۴ سیکل لگاریتمی کاهش داد. همچنین در این شرایط تیماری کپک‌ها و مخمرها به طور کامل حذف شدند [۳۵]. در پژوهش حاضر، شمارش کل میکروب‌ها، کپک و مخمر و کلی فرم در دانه زیره، به مقدار مجاز آلودگی‌های میکروبی در ادویه‌ها رسید [۳۶، ۳۷].

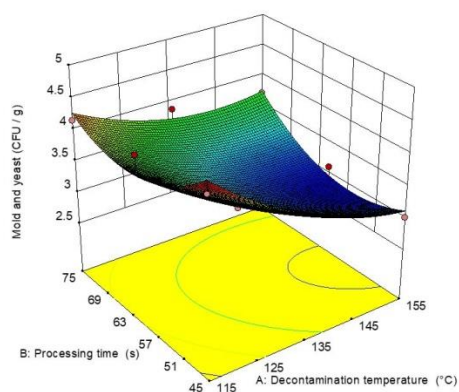
حرارت ایجاد شده در فرآیند گرمایش القایی ممکن است مکانیزمی شبیه مادون قرمز داشته باشد که منجر به آسیب رساندن به اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌ها در سلول‌های میکروبی و در نتیجه غیرفعال سازی میکروارگانیسم‌ها در سطح محصول شده است [۳۱، ۳۲]. نکته قابل توجه در بررسی میزان بار میکروبی نمونه‌ها، افزایش مقادیر کلی فرم با افزایش زمان ضدعفونی در دماهای بیشتر بود ( $p < 0.05$ ) که دلیل احتمالی آن می‌تواند ناشی از سرعت چرخش نقاله مارپیچی باشد به طوری که در زمان‌های زیاد تیماردهی به دلیل سرعت کم چرخش نقاله، یکنواختی توزیع دما طی فرآیند ضدعفونی کمتر است. همبستگی بین یکنواختی توزیع دما و اثر آن بر پاستوریزاسیون در تحقیقات قبلی گزارش شده است [۳۳]. نتایج بررسی اثر گرمایش رادیوفرکانسی (توان



(الف) (A)



(ب) (B)



(ج) (C)

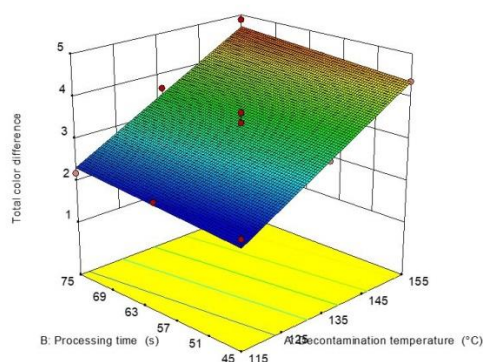
شکل (۳) اثرات متقابل دما-زمان ضدعفونی سامانه گرمایش القایی بر بار میکروبی دانه زیره: الف) شمارش کل میکروب‌ها، ب) کپک و مخمر، ج) کلی‌فرم

**Fig 3.** The interaction effects of temperature and processing time duration of induction heating system on microbial load of cumin seed: A) Total microbial count, B) Mold and Yeast, C) Coliform

رنگ کلی نمونه‌ها افزایش یافت. در دماهای زیاد، بیشترین میزان اختلاف رنگ کلی در دوره‌های کم نقاله مارپیچی مشاهده شد که این نتیجه ناشی از غیریکنواختی فرآیند ضدعفونی است. به‌طور کلی تیمارهای حرارتی باعث تخریب و تغییر رنگدانه کلروفیل و به دنبال آن ایجاد فتوفیتین می‌شود که در نهایت منجر به تغییر رنگ نمونه می‌گردد [۳۸]. بنابراین هر چقدر محصول بیشتر در معرض تیماردهی قرار بگیرد تخریب رنگدانه‌ها بیشتر و در نتیجه میزان اختلاف رنگ کلی نمونه بیشتر خواهد بود. به‌طور کلی در تیمارهای حرارتی به‌منظور کاهش دمای محصول و شوک حرارتی کمتر، بعد از فرآیند ضدعفونی خنک‌کاری سریع محصول نیاز است.

### ۲.۱.۳. میزان اختلاف رنگ کلی

تجزیه واریانس میزان اختلاف رنگ کلی در جدول (۳) ذکر شده است. مطابق این نتایج دما تأثیر معنی‌داری بر میزان اختلاف رنگ کلی دانه زیره داشت ( $p < 0.01$ ). میزان اختلاف رنگ کلی تیمارهای مختلف سامانه گرمایش القایی در شکل (۴) نشان داده شده است. بیشترین میزان اختلاف رنگ کلی دانه زیره در بیشترین دمای فرآوری مشاهده شد. به‌طوری که بیشترین این تغییرات در ترکیب تیماری  $155^{\circ}\text{C} - 75\text{ s}$  با مقدار  $4/87$  مشاهده شد. همچنین کمترین میزان اختلاف رنگ کلی دانه زیره در کمترین دمای فرآوری مشاهده شد. این شاخص در ترکیب تیماری  $155^{\circ}\text{C} - 45\text{ s}$  با مقدار  $2/17$  مشاهده شد. با افزایش زمان تیماردهی میزان اختلاف



شکل (۴) اثرات متقابل دما-زمان ضدعفونی سامانه گرمایش القایی بر میزان اختلاف رنگ کلی دانه زیره

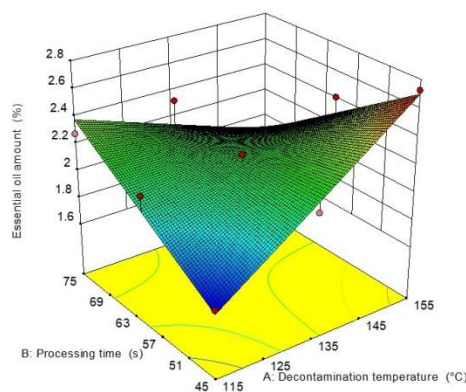
**Fig 4.** The interaction effects of temperature and processing time duration of induction heating system on total color differences of cumin seed

نشان داده شده است. مطابق این نتایج اثر ساده دما ( $p < 0.05$ ) و همچنین اثر متقابل دما و زمان ضدعفونی ( $p < 0.01$ ) تأثیر معنی‌داری بر مقدار اسانس دانه زیره داشتند. مقادیر اسانس تیمارهای مختلف سامانه گرمایش القایی در شکل (۵) نشان داده شده است. بیشترین و کمترین مقدار اسانس به ترتیب در ترکیب تیماری  $155 - 45s$  و  $115 - 45s$  در  $10^\circ C$  و  $2/72$  و  $1/69\%$  مشاهده شد. در زمان‌های فرآوری کم با افزایش دما، مقدار اسانس افزایش یافت. می‌توان چنین بیان کرد در این شرایط تیماری یکنواختی فرآیند ضدعفونی بیشتر است؛ بنابراین گرادیان دمایی بین نمونه‌های ضدعفونی شده کمتر و در نتیجه میانگین دمای سطحی نمونه‌ها یکسان خواهد بود. ترکیبات اصلی دیواره سلول‌های گیاهی سلولز و پکتین هستند. تخریب بیشتر دیواره‌های سلولی منجر به آزادسازی ترکیبات گیاهی بیشتری می‌گردد [۳۰]. به‌طور کلی دانه زیره دارای لایه خارجی سخت و غیرقابل نفوذ است که ممکن است بازده اسانس را تحت تأثیر قرار دهد. بر این اساس، افزایش مقدار استخراج اسانس ناشی از تغییر فیزیکی سطح دانه و در نتیجه شکستن بافت سطحی دانه زیره سبز در دماهای زیاد بود [۳۴].

محدوده میزان اختلاف رنگ کلی دانه زیره در این مطالعه با پژوهش‌های صورت گرفته با تیمارهای حرارتی همسو بود. در پژوهشی اثر تیمار مایکروویو با شرایط تیماری (چگالی توان مایکروویو:  $10 W/g$ ،  $33/5$  و  $57$ ، زمان تیماردهی،  $10s$ ،  $20$  و  $30$  و ضخامت لایه پودر  $1$ ،  $2$  و  $3$ ) به‌منظور بررسی بار میکروبی و میزان اختلاف رنگ کلی پودر زردچوبه به کار گرفته شد. طبق نتایج گزارش‌شده، میزان اختلاف رنگ کلی پودر زردچوبه در محدوده  $2/37 - 5/49$  متغیر بود ولی متغیرهای مستقل اثر معنی‌داری بر میزان اختلاف رنگ کلی پودر زردچوبه نداشتند ( $p > 0.05$ ) [۳۹]. در پژوهشی دیگر فرآیند گرمایش القایی با شرایط تیماری (ولتاژ:  $7$ ،  $900$ ،  $1800$  و  $2700$ ، دمای اولیه نمونه  $10^\circ C$  و زمان فرآوری  $s$   $180$ ،  $240$ ،  $300$  و  $400$ ) به منظور پاستوریزه کردن آب میوه گریپ‌فروت به کار گرفته شد. طبق نتایج گزارش شده در این تحقیق، فرآیند گرمایش القایی به‌طور مؤثری سبب تغییر همه شاخص‌های رنگ در آب میوه گریپ‌فروت شد [۴۰].

### ۳.۱.۳. مقدار اسانس

نتایج تجزیه واریانس مقدار اسانس دانه زیره در جدول (۳)



شکل (۵) اثرات متقابل دما-زمان ضدعفونی سامانه گرمایش القایی بر مقدار اسانس دانه زیره.

Fig 5. The interaction effects of temperature and processing time duration of induction heating system on essential oil amount of cumin seed

مقدار بازده اسانس دانه زیره در این پژوهش با تحقیقات قبلی گزارش شده مطابقت داشت. در این راستا در مطالعه‌ای ترکیبات فرار ۸ جمعیت بومی دانه زیره به‌منظور بررسی ترکیبات شیمیایی و فعالیت ضد میکروبی مورد بررسی قرار

گرفت، طبق نتایج گزارش‌شده مقدار اسانس در محدوده  $2/9\%$  تا  $3/7\%$  متغیر بود [۵]. به هر حال تفاوت در مقدار اسانس به فاکتورهای محیطی، فاکتورهای ژنتیکی، رسیدگی گیاه و نوع تیمار اعمال‌شده بستگی دارد.



### ۲.۳. مدل‌های رگرسیونی و بهینه‌سازی

کلی‌فرم، میزان اختلاف رنگ کلی و مقدار اسانس به ترتیب در معادلات ۸ تا ۱۲ نشان می‌دهند. در این معادلات، علامت جبری نشان‌دهنده روند تغییرات متغیرهای مستقل با صفت مورد بررسی و بزرگی ضرایب رگرسیونی نشان‌دهنده اهمیت متغیر مورد نظر بر روی صفت است. با در نظر گرفتن ضرایب رگرسیونی اثرات ساده دمایی ضدعفونی و زمان به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در روند تغییرات صفات مورد بررسی داشتند.

$$\text{Total microbial count} = +3.42 - 0.57 * A + 0.41 * B^2,$$

$$\text{Mold and yeast} = +3.32 - 0.52 * A + 0.52 * B^2,$$

$$\text{Coliform} = +3.18 - 0.87 * A + 0.15 * AB,$$

$$\text{Total color difference} = +3.35 + 1.18 * A,$$

$$\text{Essential oil amount} = +2.16 + 0.14 * A - 0.38 * AB,$$

در این پژوهش پنج مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی مقادیر شمارش کل میکروبه‌ها، کپک و مخمر، کلی‌فرم، میزان اختلاف رنگ کلی و مقدار اسانس با استفاده از داده‌های تجربی به دست آمد. این مدل‌های رگرسیونی چند جمله‌ای که با استفاده از آنالیز سطح پاسخ به دست آمده‌اند، تأثیر متغیرهای مستقل دمایی و زمان ضدعفونی بر صفات مورد بررسی همچون شمارش کل میکروبه‌ها، کپک و مخمر،

$$R^2 = 0.82 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.74 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.97 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.91 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.85 \quad (11)$$

سطوح بهینه انجام شد. بدین منظور دمایی ضدعفونی با مقدار ۱۵۱ °C و زمان فرآوری با مقدار ۴۶ s (سرعت ماریج ۳۵ rpm) تنظیم شد تا کارایی مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی پاسخ‌های بهینه مورد بررسی قرار گیرد. نتایج تجربی به دست آمده برای صفات مورد بررسی در جدول (۴) نشان داده شده است. این نتایج اعتبار مدل‌های توسعه یافته بر اساس داده‌های تجربی را نشان می‌دهند. هر چه قدر خطای نسبی بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده کمتر باشد دقت مدل بالاتر خواهد بود. خطای نسبی از اختلاف اندازه مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر تجربی نسبت به پارامتر پایه (مقادیر پیش‌بینی شده) به دست خواهد آمد.

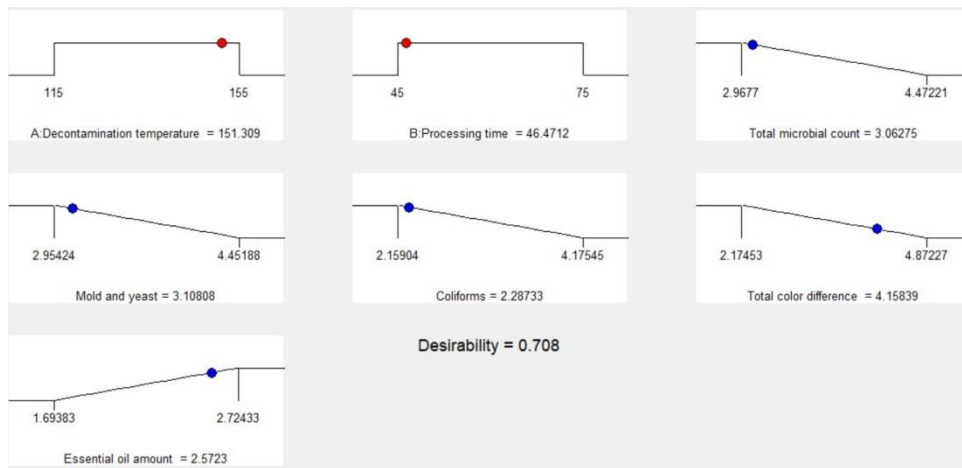
در این روابط، مقادیر A و B به ترتیب دما و زمان ضدعفونی می‌باشند.

مقدار بهینه صفات مورد بررسی با استفاده از داده‌های تجربی به دست آمد. سطوح بهینه هر یک از متغیرهای مستقل و مقادیر پیش‌بینی شده برای هر یک از صفات مورد بررسی در شکل (۶) نشان داده شده است. طبق این شرایط بهینه دمایی ضدعفونی ۱۵۱ °C و زمان ۴۶ s منجر به بهترین پاسخ‌ها با تابع مطلوبیت ۰/۷۰۸ شد. در این شرایط بهینه، مقادیر شمارش کل میکروبه‌ها، کپک و مخمر، کلی‌فرم، میزان اختلاف رنگ کلی و مقدار اسانس به ترتیب ۳/۰۶، ۳/۱، ۲/۲۸، ۴/۱۵ و ۲/۵۷٪ به دست آمد. به منظور اعتبارسنجی داده‌های نرم‌افزار آزمایش‌هایی در این

جدول (۴) مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده صفات مورد بررسی دانه زیره در تیمارهای گرمایش القایی

Table 4. Experimental and predicted values of studied traits of cumin seeds in induction heating treatments

خطای نسبی (%) Relative error	مقادیر تجربی Experimental values	مقادیر پیش‌بینی شده Predicted values	پاسخ‌ها Responses
3.59	3.17	3.06	شمارش کل میکروبه‌ها Total microbial count
1.61	3.15	3.1	کپک و مخمر Mold and yeast
3.07	2.35	2.28	کلی‌فرم Coliform
5.83	2.42	2.57	مقدار اسانس Essential oil amount
3.37	4.01	4.15	میزان اختلاف رنگ کلی Total color differences



شکل (۶) نقاط مطلوب پیش‌بینی‌شده برای کارکرد بهینه سامانه گرمایش القایی به‌منظور ضدعفونی کردن دانه زیره  
**Fig 6.** Desirability points for optimal operation of induction heating system in order to decontamination of cumin seed

نقاط بهینه، مقایسه نقاط بهینه سامانه گرمایش القایی با تابش‌دهی گاما انجام شد. نتایج تجزیه واریانس بار میکروبی، مقدار اسانس و میزان اختلاف رنگ کلی تیمارهای مورد بررسی (گرمایش القایی، تابش‌دهی گاما و نمونه شاهد) در جدول (۵) نشان داده شده است. اثرات تیمارها تأثیر معنی داری بر شمارش کل، کپک و مخمر، کلی‌فرم، مقدار اسانس و میزان اختلاف رنگ کلی در سطح احتمال ۱٪ داشتند.

### ۲.۳. مقایسه نتایج سامانه گرمایش القایی با تابش‌دهی گاما

#### ۱.۲.۳. بار میکروبی

در این بخش مقایسه اثر تیمار سامانه گرمایش القایی، روش تابش‌دهی گاما با نمونه شاهد صورت گرفت. بدین منظور پس از بررسی اثر تیمارهای مختلف سامانه گرمایش القایی بر بار میکروبی و خواص کیفی دانه زیره و به‌دست‌آوردن

جدول (۵) تجزیه واریانس بار میکروبی، مقدار اسانس و میزان اختلاف رنگ کلی دانه زیره در تیمارهای مختلف (تابش‌دهی گاما، گرمایش القایی و نمونه شاهد)

**Table 5.** ANOVA of microbial load, essential oil amount and total color differences of cumin seed in different treatments (gamma irradiation, induction heating and control sample)

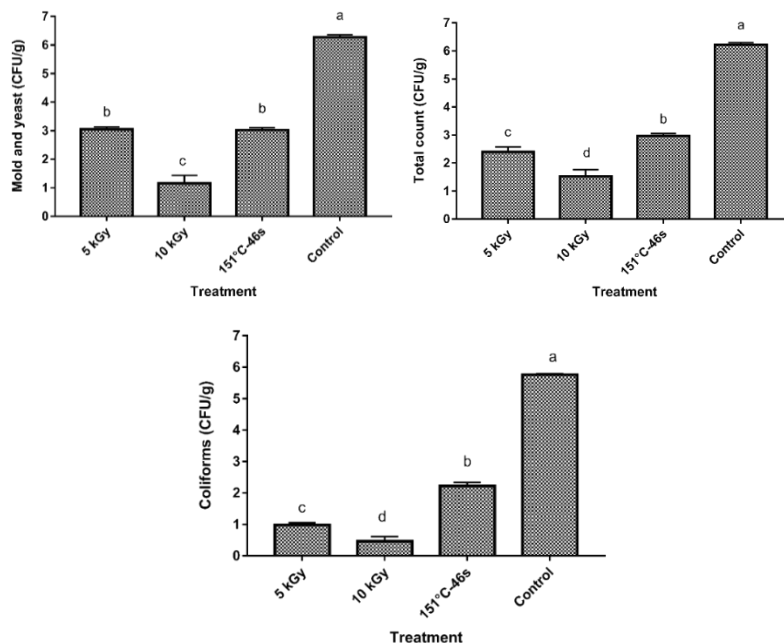
میانگین مربعات Mean of squares					درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Source of variation
میزان اختلاف رنگ کلی Total color differences	مقدار اسانس Essential oil amount	کلی‌فرم Coliform	کپک و مخمر Mold and yeast	شمارش کل Total microbial count		
8.96**	0.3**	17.052**	13.47**	12.55**	3	تیمار Treatment
0.17	0.016	0.007	0.023	0.024	8	خطای آزمایش Error
16.69	6.12	3.59	4.45	4.68	-	ضریب تغییرات Coefficient of variation

\*\* بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد است.

\*\* significance at the 1% level

نمونه شاهد کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). بیشترین کاهش کپک و مخمر در تیمار ۱۰ kGy مشاهده شد. همچنین مقدار کلی فرم برای تیمارهای تابش‌دهی گاما در دوزهای ۵ و ۱۰ kGy و سامانه گرمایش القایی به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۴۶ و ۲/۳۵ CFU/g مشاهده شد. مقادیر کلی فرم در همه نمونه‌های تیمار شده به‌طور معنی‌داری در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). بیشترین کاهش کلی فرم در تیمار ۱۰ kGy مشاهده شد. به‌طور کلی ساز و کار اصلی غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها در تابش‌دهی گاما آسیب رساندن به DNA سلول‌ها است. بنابراین دوزهای زیاد تیماردهی آسیب بیشتری به میکروارگانیسم‌ها وارد می‌کند [۴۲].

نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. شمارش بار میکروبی در همه نمونه‌های تیمار شده به‌طور معنی‌داری در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). بیشترین کاهش شمارش کل در تیمار ۱۰ kGy با مقدار ۱/۵۲ CFU/g مشاهده شد که به میزان ۴/۲۸ CFU/g در مقایسه با شاهد (۶/۲۱ CFU/g) کاهش پیدا کرد. این مقدار در تیمار ۵ kGy و تیمار سامانه گرمایش القایی به ترتیب ۲/۴ CFU/g و ۳/۱۷ CFU/g بود. میزان کپک و مخمر برای تیمارهای تابش‌دهی گاما در دوزهای ۵ و ۱۰ kGy و سامانه گرمایش القایی به ترتیب ۳/۱۵ و ۱/۱۶، ۳/۰۵ و ۳/۱۵ CFU/g مشاهده شد. مقادیر کپک و مخمر در همه نمونه‌های تیمار شده به‌طور معنی‌داری در مقایسه با



شکل (۷) بار میکروبی دانه زیره در نمونه شاهد، تیمارهای مختلف تابش‌دهی گاما و سامانه گرمایش القایی

Fig 7. Microbial load of cumin seeds in control sample, different treatments of gamma irradiation and induction heating system

روش‌های تیماردهی در تحقیقات قبلی گزارش شده است با این وجود تغییراتی در شاخص‌های کیفی محصول گزارش شده است [۲۰، ۴۱].

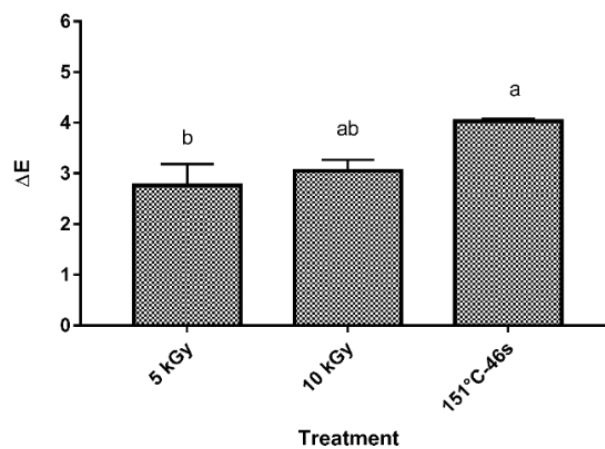
### ۳.۲.۲. میزان اختلاف رنگ کلی

نتایج تجزیه واریانس میزان اختلاف رنگ کلی نمونه‌های

تابش‌دهی گاما بار میکروبی را در مقایسه با تیمار گرمایش القایی بیشتر کاهش داد. چرا که نمونه‌ها مدت بیشتری در معرض تیماردهی قرار گرفتند. طی مدت زمان کوتاه تیماردهی در سامانه گرمایش القایی، این شاخص‌ها به مقدار مجاز آلودگی‌های میکروبی در ادویه‌ها رسید. مؤثر بودن تیمار گاما در زمینه کاهش بار میکروبی در مقایسه با سایر

مشاهده نشد. تیمارهای حرارتی طی فرآیندهای فرآوری رنگ ظاهری نمونه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این پژوهش به دلیل تماس سطح محصول با دمای زیاد نقاله مارپیچی، رنگ نمونه‌ها تغییر کرد. تابش‌دهی گاما مقدار انرژی لازم برای یون سازی است که از منبع تابش (کبالت ۶۰ یا سزیم ۱۳۷) به ماده غذایی منتقل و جذب می‌شود. به هر حال دوزهای زیاد تیماردهی منجر به تغییراتی در رنگ نمونه‌ها شد. نتایج میزان اختلاف رنگ کلی نمونه‌ها با افزایش دوز تیماردهی با تحقیقات پیشین در یک راستا بود [۴۲].

تیمار شده و نمونه شاهد در جدول (۵) نشان داده شده است. اثر تیمارهای مختلف تأثیر معنی‌داری بر میزان اختلاف رنگ کلی در سطح احتمال ۱٪ داشتند. نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. میزان اختلاف رنگ کلی در همه نمونه‌های تیمار شده به‌طور معنی‌داری در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). میزان اختلاف رنگ کلی نمونه‌ها بین ۲/۷۶-۴/۰۱ متغیر بود، کمترین مقدار آن در تیمار ۵ kGy و بیشترین مقدار آن در تیمار گرمایش القایی مشاهده شد. تفاوت معنی‌داری بین تیمار گرمایش القایی و تابش‌دهی گاما در دوز ۱۰ kGy



شکل (۸) میزان اختلاف رنگ کلی دانه زیره در نمونه شاهد، تیمارهای مختلف تابش‌دهی گاما و سامانه گرمایش القایی

Fig 8. Total color differences of cumin seed in control sample, different treatments of gamma irradiation and induction heating system

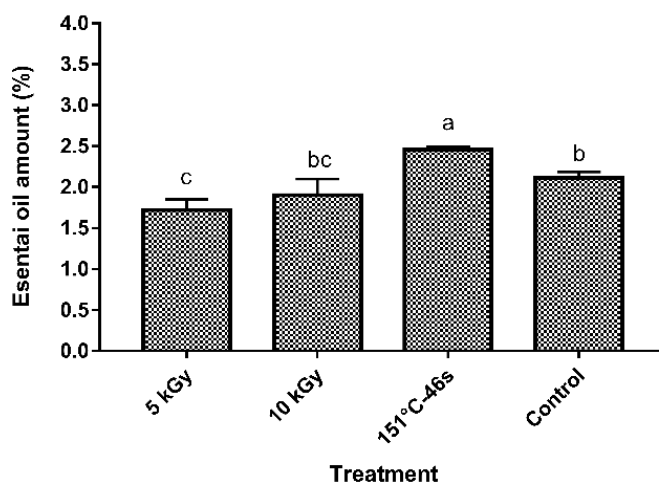
سطحی دانه زیره در مقایسه با تابش‌دهی گاما شد. به‌طور کلی دانه زیره دارای پوشش سخت و تا حدودی غیرقابل نفوذ است که بازده استخراج اسانس را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تیمار گرمایش القایی منجر به ایجاد منافذ و ترک‌هایی در سطح محصول و در نتیجه تغییر مورفولوژی سطحی دانه زیره شد. در این راستا نتایج مشابهی در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است. در تحقیقی روش گرمایش القایی و روش‌های مرسوم گرمایش (دمای ۸۰ °C و زمان استخراج ۹۰ min) برای استخراج پکتین میوه سیترنج<sup>۱</sup> مقایسه شدند. نتایج تصاویر الکترونی نشان داد که تیمار گرمایش به‌طور مؤثری منجر به تغییر مورفولوژی سطحی محصول شده است. همچنین گزارش شد که افزایش دمای تیماردهی ممکن

### ۳.۲.۳. مقدار اسانس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی

نتایج تجزیه واریانس مقدار اسانس تیمارهای مختلف و نمونه شاهد در جدول (۵) نشان داده شده است. اثر تیمارها تأثیر معنی‌داری بر مقدار اسانس در سطح احتمال ۱٪ داشتند. شکل (۹) مقدار اسانس برای تیمارهای مختلف نمونه شاهد را نشان می‌دهد. مقدار اسانس تیمارهای مختلف در محدوده ۲/۴۲ - ۱/۷۲٪ متغیر بود. تفاوت معنی‌داری در مقدار اسانس ترکیب‌های تیماری مختلف با نمونه شاهد مشاهده شد ( $p < 0.05$ ). بیشترین و کمترین مقدار اسانس به ترتیب در تیمار گرمایش القایی و تیمار گاما در دوز ۵ kGy مشاهده شد.

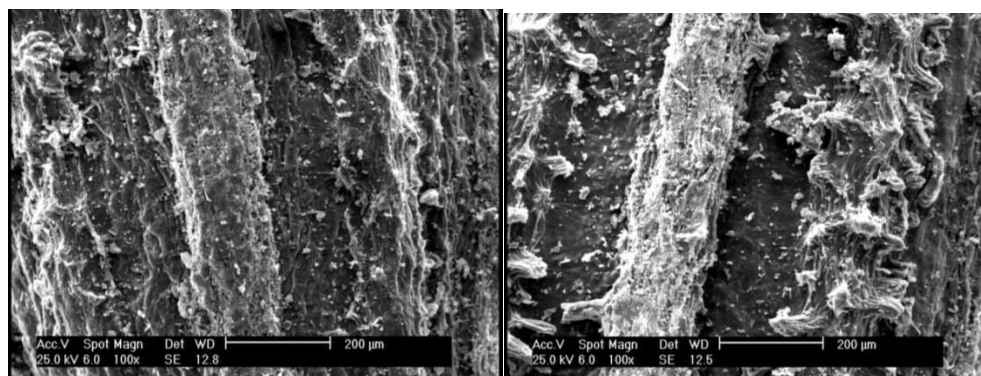
تصاویر میکروسکوپ الکترونی دانه زیره تیمارگرمایش القایی، تابش‌دهی گاما و نمونه شاهد در شکل (۱۰) نشان داده شده است. گرمایش القایی منجر به تغییر ساختار

است منجر به تخریب ساختار سلولی سلول‌های پارانسیم و تغییرات مورفولوژی در محصول سیترنج می‌تواند ناشی از افزایش فضای بین سلولی ماده گیاهی منجر گردند که این مدت زمان فرآوری باشد [۴۳].



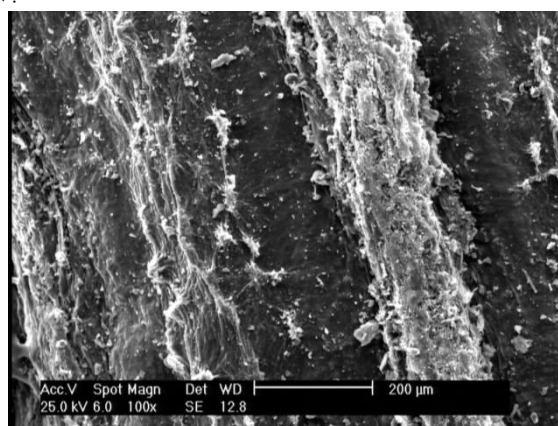
شکل (۹) مقدار اسانس دانه زیره در نمونه شاهد، تیمارهای مختلف تابش‌دهی گاما و سامانه گرمایش القایی

Fig 9. The amount of essential oil of cumin seed in the control sample, different treatments of gamma irradiation and induction heating system



(ب)

(الف)



(ج)

شکل (۱۰) تصاویر الکترونی دانه زیره (الف-تابش‌دهی گاما در دوز ۱۰ کیلوگری؛ ب-گرمایش القایی (دمای ۱۵۵-زمان ۴۵ ثانیه؛ ج-نمونه شاهد)

Fig 10. Scanning electron micrographs of cumin seed: (A: gamma irradiation for 10 kGy, B: induction heating for 155°C -45s, C: control sample)



مقدار محصول ضدعفونی‌شده در ساعت با سامانه گرمایش القایی به‌مراتب بیشتر خواهد بود. براساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بیان کرد که فناوری گرمایش القایی یک استراتژی امیدوارکننده برای ضدعفونی‌کردن ادویه‌ها است. داده‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش به درک بهتر مکانیسم گرمایش القایی بر بار میکروبی و ویژگی‌های کیفی دانه زیره و سایر محصولات مشابه کمک می‌کند. به هر حال برای انتقال این فناوری از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی، در کنار پارامترهای طراحی سامانه، پارامترهای مؤثر در ارزیابی سامانه همچون ضدعفونی محصولات مختلف، تکرارپذیری نتایج، برآورد مصرف انرژی و ارزیابی اقتصادی سامانه ضروری است.

#### تشکر و قدردانی

از گروه‌های مهندسی مکانیک بیوسیستم، علوم باغبانی و علوم و صنایع غذایی دانشگاه تربیت مدرس و صندوق حمایت از پژوهشگران و نوآوران کشور (شماره طرح: ۹۸۰۲۳۰۱۳) که در اجرا و حمایت این تحقیق ما را یاری نمودند، صمیمانه تشکر می‌گردد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به مصرف بالای ادویه‌ها، ایمنی غذایی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین کاربرد فناوری‌های نوظهور که بتواند به‌طور مؤثر آلودگی بیولوژیکی را کاهش و ضایعات را به حداقل برساند ضروری است. در این پژوهش ضدعفونی‌کردن دانه زیره با استفاده از دو روش گرمایش القایی و تابش‌دهی گاما انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد تابش‌دهی گاما به‌طور مؤثری سبب کاهش بار میکروبی در مقایسه با گرمایش القایی شد که این ناشی از مدت زمان بیشتر تیماردهی بود. با این وجود تیمار گرمایش القایی بار میکروبی را به محدوده استاندارد تعیین‌شده برای ادویه‌ها رساند. کمترین میزان اختلاف رنگ کلی در تابش‌دهی گاما (دوز ۵ kGy) مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار اسانس در گرمایش القایی به دست آمد زیرا حرارت ایجادشده بر روی سطح ماریپیج منجر به تغییر مورفولوژی سطح دانه و در نتیجه ایجاد ترک و منافذ در سطح محصول گردید. زمان تیماردهی در تابش‌دهی گاما برای دوزهای ۵ و ۱۰ kGy به ترتیب ۱/۱۹ h و ۲/۳۸ گزارش شد که این مقدار در تیمار گرمایش القایی به‌مراتب خیلی کمتر (۴۶ ثانیه) بود. بنابراین

#### منابع

- [1] Ramadan, M. F. (2020). Cold pressed cumin (*Cuminum cyminum*) oil. In *Cold Pressed Oils* (pp. 695-702): Elsevier.
- [2] Sahana, K., Nagarajan, S., & Rao, L. J. M. (2011). Cumin (*Cuminum cyminum* L.) seed volatile oil: Chemistry and role in health and disease prevention. In *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention* (pp. 417-427): Elsevier.
- [3] Embuscado, M. E. (2015). Herbs and spices as antioxidants for food preservation. In *Handbook of Antioxidants for Food Preservation* (pp. 251-283): Elsevier.
- [4] Allahghadri, T., Rasooli, I., Owlia, P., Nadooshan, M. J., Ghazanfari, T., Taghizadeh, M., & Astaneh, S. D. A. (2010). Antimicrobial property, antioxidant capacity, and cytotoxicity of essential oil from cumin produced in Iran. *J. Food Sci.*, 75(2), H54-H61.
- [5] Petretto, G., Fancello, F., Bakhy, K., Faiz, C. A., Sibawayh, Z., Chessa, M., . . . Rourke, J. (2018). Chemical composition and antimicrobial activity of essential oils from *Cuminum cyminum* L. collected in different areas of Morocco. *Food Biosci.*, 22, 50-58.
- [6] Sowbhagya, H., Srinivas, P., Purnima, K. T., & Krishnamurthy, N. (2011). Enzyme-assisted extraction of volatiles from cumin (*Cuminum cyminum* L.) seeds. *Food Chem.*, 127(4), 1856-1861.
- [7] Chan, K. (2003). Some aspects of toxic contaminants in herbal medicines. *Chemosphere.*, 52(9), 1361-1371.
- [8] McKee, L. (1995). Microbial contamination of spices and herbs: a review. *LWT - Food Sci. Technol.*, 28(1), 1-11.
- [9] Stępień, Ł., Koczyk, G., & Waśkiewicz, A. (2011). Genetic and phenotypic variation of *Fusarium proliferatum* isolates from different host species. *J. Appl. Genet.*, 52(4), 487-496.
- [10] Waśkiewicz, A., Irzykowska, L., Karolewski, Z., Bocianowski, J., Kostecki, M., Goliński, P., . . . Weber, Z. (2008). *Fusarium* spp. and mycotoxins present in asparagus spears. *Cereal Res. Commun.*, 36, 405-407.

- [11] Chweiggert, U., Carle, R., & Schieber, A. (2007). Conventional and alternative processes for spice production—a review. *Trends Food Sci. Technol.*, 18(5), 260-268.
- [12] Roberts, P. B. (2016). Food irradiation: Standards, regulations and world-wide trade. *Radiat. Phys. Chem.*, 129, 30-34.
- [13] Akbas, M. Y., & Ozdemir, M. (2008). Effect of gaseous ozone on microbial inactivation and sensory of flaked red peppers. *Int. J. Food Sci.*, 43(9), 1657-1662.
- [14] Ban, C., Lee, D. H., Jo, Y., Bae, H., Seong, H., Kim, S. O., Choi, Y. J. (2018). Use of superheated steam to inactivate Salmonella enterica serovars Typhimurium and Enteritidis contamination on black peppercorns, pecans, and almonds. *J. Food Eng.*, 222, 284-291.
- [15] Chytiri, S., Goulas, A., Badeka, A., Riganakos, K., & Kontominas, M. (2005). Volatile and non-volatile radiolysis products in irradiated multilayer coextruded food-packaging films containing a buried layer of recycled low-density polyethylene. *Food Addit Contam.*, 22(12), 1264-1273.
- [16] Gumus, T., Albayrak, S., Sagdic, O., & Arici, M. (2011). Effect of gamma irradiation on total phenolic contents and antioxidant activities of *Satureja hortensis*, *Thymus vulgaris*, and *Thymbra spicata* from Turkey. *Int. J. Food Prop.*, 14(4), 830-839.
- [17] Ban, G.-H., & Kang, D.-H. (2016). Effectiveness of superheated steam for inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella Typhimurium*, *Salmonella Enteritidis* phage type 30, and *Listeria monocytogenes* on almonds and pistachios. *Int. J. Food Microbiol.*, 220, 19-25.
- [18] Brodowska, A., Śmigielski, K., & Nowak, A. (2014). Comparison of methods of herbs and spices decontamination. *Chemik.*, 68(2), 97-102.
- [19] Cenkowski, S., Pronyk, C., Zmidzinska, D., & Muir, W. (2007). Decontamination of food products with superheated steam. *J. Food Eng.*, 83(1), 68-75.
- [20] Rico, C. W., Kim, G.-R., Ahn, J.-J., Kim, H.-K., Furuta, M., & Kwon, J.-H. (2010). The comparative effect of steaming and irradiation on the physicochemical and microbiological properties of dried red pepper (*Capsicum annum* L.). *Food Chem.*, 119(3), 1012-1016.
- [21] Idakiev, V. V., Lazarova, P. V., Bück, A., Tsotsas, E., & Mörl, L. (2017). Inductive heating of fluidized beds: Drying of particulate solids. *Powder Technol.*, 306, 26-33.
- [22] Idakiev, V. V., Steinke, C., Sondej, F., Bück, A., Tsotsas, E., & Mörl, L. (2018). Inductive heating of fluidized beds: Spray coating process. *Powder Technol.*, 328, 26-37.
- [23] Wu, S., Yang, N., Jin, Y., Li, D., Xu, Y., Xu, X., & Jin, Z. (2020). Development of an innovative induction heating technique for the treatment of liquid food: Principle, experimental validation and application. *J. Food Eng.*, 271, 109780.
- [24] Wang, G., Wan, Z., & Yang, X. (2020). Induction heating by magnetic microbeads for pasteurization of liquid whole eggs. *J. Food Eng.*, 284, 110079.
- [25] bduh, M. Y., van Ulden, W., Kalpoe, V., van de Bovenkamp, H. H., Manurung, R., & Heeres, H. J. (2013). Biodiesel synthesis from *Jatropha curcas* L. oil and ethanol in a continuous centrifugal contactor separator. *Eur J Lipid Sci Technol.*, 115(1), 123-131
- [26] Giustozzi, F. (2020). Novel magnetically induced healing in road pavements. In *Eco-Efficient Pavement Construction Materials* (pp. 315-336): Elsevier.
- [27] Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. L. (2017). *Handbook of induction heating*: CRC press.
- [28] Rahmati, E., Khoshtaghaza, M. H., Banakar, A., & Ebadi, M. T. (2022). Decontamination technologies for medicinal and aromatic plants: A review. *Food Sci. Nutr.*, 10 (3), 784-799.
- [29] Yong, H. I., Lee, H., Park, S., Park, J., Choe, W., Jung, S., & Jo, C. (2017). Flexible thin-layer plasma inactivation of bacteria and mold survival in beef jerky packaging and its effects on the meat's physicochemical properties. *Meat Sci.*, 123, 151-156.
- [30] Zhao, Y., Wang, P., Zheng, W., Yu, G., Li, Z., She, Y., & Lee, M. (2019). Three-stage microwave extraction of cumin (*Cuminum cyminum* L.) Seed essential oil with natural deep eutectic solvents. *Ind Crops Prod*, 140, 111660.
- [31] Gurtler, J. B., Doyle, M. P., & Kornacki, J. L. (2014). The microbiological safety of low water activity foods and spices: Springer.
- [32] Rifna, E., Singh, S. K., Chakraborty, S., & Dwivedi, M. (2019). Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: Recent advances. *Food Res.Int.*, 126, 108654.
- [33] Tsai, Y.-H., Hwang, C.-C., Lin, C.-S., Lin, C.-Y., Ou, T.-Y., Chang, T.-H., & Lee, Y.-C. (2021). Comparison of microwave-assisted induction heating system (MAIH) and individual heating methods on the quality of pre-packaged white shrimp. *IFSET*, 73, 102787.
- [34] Chen, L., Wei, X., Irmak, S., Chaves, B. D., & Subbiah, J. (2019). Inactivation of *Salmonella enterica* and *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 in cumin seeds by radiofrequency heating. *Food Control.*, 103, 59-69.
- [35] Erdoğdu, S. B., & Ekiz, H. I. (2011). Effect of ultraviolet and far infrared radiation on microbial

- decontamination and quality of cumin seeds. *J. Food Sci.*, 76(5), M284-M292.
- [36] Kosalec, I., Cvek, J., & Tomic, S. (2009). Contaminants of medicinal herbs and herbal products. *Arh. za Hig. Rada Toksikol.*, 60(4), 485.
- [37] De Freitas Araújo, M. G., & Bauab, T. M. (2012). Microbial quality of medicinal plant materials. *Latest Research into Quality Control*, 67-81.
- [38] 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.
- [39] Behera, G., Sutar, P., & Aditya, S. (2017). Development of novel high power-short time (HPST) microwave assisted commercial decontamination process for dried turmeric powder (*Curcuma Longa* L.). *JFST*, 54(12), 4078-4091.
- [40] Jin, Y., Yang, N., Xu, D., He, C., Xu, Y., Xu, X., & Jin, Z. (2020). Innovative induction heating of grapefruit juice via induced electric field and its application in *Escherichia coli* O157: H7 inactivation. *RSC Adv.*, 10(46), 27280-27287.
- [41] Molnár, H., Bata-Vidács, I., Baka, E., Cserhalmi, Z., Ferenczi, S., Tömösközi-Farkas, R., . . . Székács, A. (2018). The effect of different decontamination methods on the microbial load, bioactive components, aroma and colour of spice paprika. *Food Control*, 83, 131-140.
- [42] Alinezhad, M., Hojjati, M., Barzegar, H., Shahbazi, S., & Askari, H. (2021). Effect of gamma irradiation on the physicochemical properties of pistachio (*Pistacia vera* L.) nuts. *J. Food Meas. Charact.*, 15(1), 199-209.
- [43] Zouambia, Y., Ettoumi, K. Y., Krea, M., & Moulai-Mostefa, N. (2017). A new approach for pectin extraction: Electromagnetic induction heating. *Arab. J. Chem.*, 10(4), 480-487.