



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی فرآیند پوست‌گیری دانه شاه‌بلوط با استفاده از تابش مادون‌قرمز

شیما عزتی^۱، مجید جوانمرد داخلی^{۲*}، حامد اهری^۳، حسین احمدی چناربن^۴، غلامحسین اسدی^۵

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
- ۲- گروه صنایع غذایی و تبدیلی، پژوهشکده فناوری های شیمیایی، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران (IROST)، تهران، ایران.
- ۳- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
- ۴- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ورامین-پیشوا، ورامین، ایران.
- ۵- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی فرآیند پوست‌گیری دانه شاه‌بلوط (*Castanea sativa* Mill.) به کمک تابش مادون‌قرمز و بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، میکروبی و حسی محصول طی نگهداری انجام شد. متغیرهای فرآیند شامل تابش (۳۰۰-۵۰۰ وات)، زمان تابش (۱۰-۳۰ دقیقه)، فاصله از منبع (۵-۱۵ سانتی‌متر) و رطوبت اولیه (۱۰-۲۰ درصد) با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و طرح باکس-بنکن بهینه‌سازی شدند. شرایط بهینه شامل توان ۴۰/۰۵ وات، زمان ۲۱/۴۲ دقیقه، فاصله ۵/۵۵ سانتی‌متر و رطوبت اولیه ۱۳/۷۷ درصد تعیین شد که رطوبت نهایی را به ۲/۷۲ درصد رساند. در مقایسه با پوست‌گیری دستی، روش مادون‌قرمز رطوبت کمتری (۱/۰۱ درصد پس از ۶۰ روز نگهداری)، سفتی کمتر (۸۸/۷۵ نیوتن)، روشنایی بالاتر ($L^* = 47.71$)، پایداری میکروبی برتر، شمارش کپک کمتر از ۱۲ CFU/g پس از ۶۰ روز) و امتیازات حسی بالاتر در رنگ، عطر، بافت و پذیرش کلی ایجاد کرد. این فناوری به دلیل کارایی انرژی بالا، حذف مصرف آب و حفظ کیفیت محصول، جایگزینی پایدار و قابل‌صنعتی‌سازی برای روش‌های سنتی پوست‌گیری شاه‌بلوط به‌شمار می‌رود.

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

کلمات کلیدی:

شاه‌بلوط،

پوست‌گیری،

تابش مادون‌قرمز،

بهینه‌سازی،

روش سطح پاسخ

DOI: 10.48311/fsct.2026.84030.0

* مسئول مکاتبات:

Javanmard@irost.ir

۱-مقدمه

شاه‌بلوط (*Castanea sativa Mill.*) یکی از دانه‌های ارزشمند و مغذی است که در مناطق مختلف جهان به دلیل دارا بودن ترکیبات زیست‌فعال مانند نشاسته، فیبر، ویتامین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۱]. این دانه، با محتوای رطوبت بالا (حدود ۵۰٪) و چربی پایین، شبیه غلات عمل می‌کند و در رژیم‌های غذایی سنتی اروپا و آسیا نقش کلیدی دارد [۲]. این دانه که از خانواده Fagaceae است، به صورت خام کمتر مصرف می‌شود و فرآوری آن، به‌ویژه پوست‌گیری، نقش مهمی در آماده‌سازی برای استفاده غذایی یا صنعتی دارد. پوست‌گیری نه تنها دسترسی به مغز دانه را تسهیل می‌کند، بلکه بر ویژگی‌های کیفی محصول نهایی نیز تأثیر می‌گذارد. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که پوست‌گیری نادرست می‌تواند تا ۲۰-۳۰٪ از مواد مغذی (مانند فنولیک‌ها و ویتامین C) را از دست بدهد [۳]. با این حال، روش‌های سنتی پوست‌گیری اغلب با چالش‌هایی مواجه هستند که توسعه روش‌های جایگزین را ضروری می‌سازد.

روش‌های سنتی پوست‌گیری شاه‌بلوط، مانند استفاده از آب قلیایی، بخار یا روش‌های مکانیکی، به‌طور گسترده‌ای به کار گرفته می‌شوند [۴]. این روش‌ها، اگرچه مؤثرند، اما معایبی نظیر زمان‌بر بودن، مصرف بالای آب و انرژی، و تولید پساب با بار آلی بالا دارند که اثرات زیست‌محیطی منفی به دنبال دارد. برای مثال، روش قلیایی می‌تواند تا ۱۰ لیتر آب آلوده به ازای هر کیلوگرم دانه تولید کند و ارزش تغذیه‌ای را تا ۱۵٪ کاهش دهد [۵]. علاوه بر این، استفاده از مواد شیمیایی مانند محلول‌های قلیایی می‌تواند به کاهش ارزش تغذیه‌ای دانه و ایجاد طعم نامطلوب منجر شود [۴]. مطالعات اخیر بر روی ضایعات صنعتی شاه‌بلوط (مانند پوسته‌ها) تأکید کرده‌اند که این روش‌ها سالانه هزاران تن پسماند سمی تولید می‌کنند [۶]. این محدودیت‌ها، پژوهشگران را به جست‌وجوی فناوری‌های نوین و پایدار سوق داده است که بتوانند کیفیت محصول را حفظ کرده و کارایی فرآیند را افزایش دهند.

در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوظهور مانند تابش مادون‌قرمز (IR) برای پوست‌گیری خشک مورد توجه قرار گرفته‌اند. مرور مطالعات نشان می‌دهد که IR در پوست‌گیری آجیل‌ها و میوه‌ها موفقیت‌آمیز بوده است. برای مثال، در پوست‌گیری فندق، ترکیب IR با آنزیم‌ها نرخ پوست‌گیری را به ۹۵٪ رساند و سختی بافت را حفظ کرد، در حالی که روش‌های سنتی ۲۰٪ از دست رفتن محصول داشتند [۷]. در گوجه‌فرنگی، IR زمان فرآیند را ۵۰٪ کاهش داد و کیفیت رنگی (L) را ۳۰٪ بهبود بخشید [۸]. در انگور پوست‌گیری خشک، حفظ اسید اسکوربیک را به ۸۵٪ رساند [۹]. در زنجبیل و IR نفوذ سطحی خود را برای جداسازی پوست بدون آسیب به بافت داخلی نشان داد [۱۰]. تابش مادون‌قرمز به‌عنوان یک فناوری نوظهور در فرآوری مواد غذایی، با انتقال مستقیم انرژی به ماده بدون نیاز به واسطه حرارتی، رویکردی متفاوت ارائه می‌دهد [۱۱]. IR با طول موج ۱-۳ میکرومتر، نفوذ سطحی (چند میلی‌متر) را فراهم می‌کند که ایده‌آل برای پوست‌گیری دانه‌های سخت است [۱۲]. این روش که بخشی از طیف الکترومغناطیسی را در بر می‌گیرد، با نفوذ به لایه‌های سطحی دانه، فرآیند پوست‌گیری را تسریع می‌کند و از آسیب به ساختار داخلی جلوگیری می‌کند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که مادون‌قرمز در پوست‌گیری آجیل‌ها، بافت متخلخل‌تری ایجاد کرده و پایداری اکسیداتیو را افزایش می‌دهد [۱۲]. این ویژگی‌ها، مادون‌قرمز را به گزینه‌ای جذاب برای فرآوری شاه‌بلوط تبدیل کرده است. یکی از مزایای برجسته تابش مادون‌قرمز، کارایی بالای انرژی آن است که در مقایسه با روش‌های حرارتی سنتی، مصرف انرژی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد [۱۲]. در میان فناوری‌های حرارتی نوین، تابش مادون‌قرمز نسبت به مایکروویو (که نفوذ بیش از حد و گرمایش غیریکنواخت دارد) و بخار تحت فشار (که مصرف آب و انرژی بالا و تولید پساب دارد) مزایای برجسته‌ای از جمله کارایی انرژی بالاتر، عدم نیاز به آب، و کنترل دقیق‌تر دما ارائه می‌دهد. مثلاً، در پوست‌گیری هلو، IR پساب صفر تولید کرد و کیفیت حسی را ۲۵٪ بهبود بخشید [۱۳]. این فناوری با ایجاد گرمایش سریع و

یکنواخت، امکان جداسازی پوست از مغز دانه را بدون نیاز به خیساندن طولانی یا استفاده از مواد شیمیایی فراهم می‌کند. همچنین، به دلیل عدم تماس مستقیم با سطوح داغ، احتمال سوختگی سطحی یا تغییرات نامطلوب در بافت دانه به حداقل می‌رسد. این خصوصیات، کاربرد مادون‌قرمز را به‌ویژه برای دانه‌هایی با پوست سخت مانند شاه‌بلوط مناسب می‌سازد.

با وجود مزایای بالقوه، استفاده از مادون‌قرمز در پوست‌گیری شاه‌بلوط نیازمند بهینه‌سازی شرایط عملیاتی است تا بهترین نتایج کیفی حاصل شود. عواملی مانند توان تابش، زمان در معرض‌گیری اشعه و فاصله دانه از منبع تابش، بر کارایی فرآیند و خصوصیات محصول اثر می‌گذارند [۱۴]. بهینه‌سازی این پارامترها با استفاده از روش‌های آماری مانند روش سطح پاسخ (RSM) در مطالعات اخیر موفقیت‌آمیز بوده است. برای مثال، در پوست‌گیری خرما، RSM شرایط بهینه IR را تعیین کرد و رطوبت نهایی را به ۳٪ رساند [۱۵].

با وجود این پیشرفت‌ها، تاکنون هیچ مطالعه‌ای به‌صورت هم‌زمان چهار متغیر کلیدی (توان، زمان، فاصله و رطوبت اولیه) را برای پوست‌گیری شاه‌بلوط با مادون‌قرمز بهینه نکرده و تأثیر آن را طی ۶۰ روز نگهداری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، میکروبی و حسی بررسی نکرده است. این شکاف علمی، به‌ویژه در زمینه پایداری صنعتی و حفظ کیفیت حسی (مانند تردی بافت و عطر برشته)، ضرورت پژوهش حاضر را توجیه می‌کند. هدف این پژوهش، بهینه‌سازی فرآیند پوست‌گیری دانه شاه‌بلوط با استفاده از تابش مادون‌قرمز و ارزیابی تأثیر آن بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، میکروبی و حسی محصول طی نگهداری است.

۲- مواد و روش‌ها

۲.۱ جمع‌آوری مواد اولیه

دانه‌های شاه‌بلوط تازه (*Castanea sativa* Mill.) در مهرماه ۱۴۰۳ (اکتبر ۲۰۲۴) از باغات منطقه اسالم استان گیلان برداشت و در همان روز به بازار محلی تهران منتقل شدند. ارقام مورد استفاده ترکیبی از ارقام محلی شناخته‌شده به نام «شاه‌بلوط علی‌آباد» و «شاه‌بلوط شبستر» بود که از نظر ظاهری و طعم در بازار ایران رایج هستند. پس از رسیدن به آزمایشگاه، دانه‌ها به‌صورت دستی از پوسته خاردار خارجی جدا شدند و تنها دانه‌های سالم، بدون ترک، آفت‌زدگی و تغییر رنگ انتخاب شدند. دانه‌های انتخاب‌شده در کیسه‌های پلی‌اتیلن زیپ‌دار قرار گرفته و تا زمان انجام آزمایش‌ها (حداکثر ۴۸ ساعت) در یخچال در دمای ۴- ۱ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۵-۹۰٪ نگهداری شدند تا از کاهش رطوبت یا شروع جوانه‌زنی جلوگیری شود. فرآیند پوست‌گیری و برشته کردن به‌صورت هم‌زمان انجام شد تا اثرات متقابل این دو مرحله بررسی شود.

۲.۲ پوست‌گیری نمونه‌ها

پوست‌گیری دانه‌ها به دو روش انجام شد. در روش سنتی یا دستی، ۵۰۰ گرم از دانه‌های شاه‌بلوط به‌عنوان نمونه شاهد انتخاب شدند و با استفاده از چاقوی تیز به‌صورت دستی پوست‌گیری شدند. این روش بر اساس پروتکل استاندارد فرآوری دستی دانه‌ها انجام شد که در آن پوست خارجی به‌طور کامل جدا شده و مغز دانه برای تحلیل‌های بعدی آماده می‌شود [۱۶]. این فرآیند به‌صورت دستی و با دقت بالا توسط اپراتور آموزش‌دیده انجام شد تا از آسیب به مغز دانه جلوگیری شود.

در روش مادون‌قرمز، ۲۵۰ گرم از دانه‌ها در دستگاه برشته‌کن مادون‌قرمز مجهز به لامپ الکتریکی با توان قابل تنظیم قرار گرفتند. دستگاه برشته‌کن مادون‌قرمز آزمایشگاهی ساخت پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی IROST مجهز به سه لامپ کوآرتز-هالوژن ۵۰۰ وات (طول موج غالب ۱/۲ تا ۳/۵ میکرومتر)، سیستم کنترل دمای PID با دقت ۱ درجه سانتی‌گراد، صفحه گردان استیل ۳۰ سانتی‌متری با سرعت ۱ rpm و بازوی تنظیم فاصله ۵-۲۰ سانتی‌متر بود. دانه‌ها روی صفحه گردان با

(شیب منحنی نیرو-زمان در ناحیه الاستیک) و انرژی فشاری (سطح زیر منحنی نیرو-زمان) ثبت شدند [۱۹].

۲-۳-۳- رنگ

با دستگاه HunterLab اندازه‌گیری شد و پارامترهای L^* (روشنایی)، a^* (قرمزی)، b^* (زردی) ثبت شدند [۲۰].

۲-۳-۴- قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی

۲ گرم نمونه پودر شده با ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱۰ میلی‌لیتر تری‌کلرواسید استیک ۱۰٪ مخلوط شد و پس از ۲ ساعت در ۳۰ درجه سانتی‌گراد، محلول صاف و رقیق شد. جذب در ۴۲۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد [۲۱].

۲-۳-۵- شمارش کپک و مخمر

۵ گرم نمونه با ۴۵ میلی‌لیتر محلول رینگر رقیق شد و تا رقت ۰.۰۱ آماده شد. سپس ۰.۱ میلی‌لیتر از رقت‌ها در محیط DG18 کشت داده شد و پلیت‌ها در ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳-۵ روز گرمخانه‌گذاری شدند [۲۲].

۲-۳-۶- ارزیابی حسی

ارزیابی حسی توسط ۲۰ ارزیاب آموزش‌دیده با مقیاس هیدونیک ۵ امتیازی (۱: بسیار بد، ۵: بسیار خوب) انجام شد. ویژگی‌های رنگ، بو، طعم، سفتی و پذیرش کلی ارزیابی شدند [۲۳].

۲-۴- تجزیه و تحلیل آماری

به منظور بهینه‌سازی همزمان چهار متغیر کلیدی فرآیند، از روش سطح پاسخ - Response Surface Methodology (RSM) با طرح باکس-بنکن (Box-Behnken Design) استفاده شد. این طرح به دلیل نیاز به تعداد آزمایش کمتر نسبت به طرح مرکب مرکزی و عدم وجود نقاط گوشه‌ای (corner points) که ممکن است به سوختگی یا آسیب شدید دانه منجر شود، انتخاب گردید. متغیرهای مستقل و سطوح

سرعت ۱ دور بر دقیقه و نگهدارنده فلزی سفارشی چرخانده شدند تا تابش به صورت یکنواخت اعمال شود. شرایط عملیاتی شامل توان تابش (۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات)، زمان تابش (۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه)، فاصله از منبع تابش (۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر) و رطوبت اولیه نمونه (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) بود. این روش با الهام از مطالعات قبلی روی دانه‌های مشابه طراحی شد که نشان‌دهنده کارایی بالای مادون‌قرمز در جداسازی پوست است [۱۷].

۲-۳- اندازه‌گیری ویژگی‌های کیفی

۲-۳-۱- رطوبت نهایی

نمونه‌ها در آون (مدل Memmert، آلمان) در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت یا تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. رطوبت نهایی با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شد:

$$M_{Cr}(\%wb) = \frac{M_{Or} - M_r}{M_{Or}} \times 100$$

$$M_{dr}(\%wb) = \frac{M_{Cr} \times 100}{100 - M_{Cr}}$$

M_{Or} = وزن اولیه دانه شاه بلوط برشته شده

M = وزن نهایی مغز برشته شده

M_{Cr} = میزان رطوبت بر اساس وزن مرطوب

M_{dr} = میزان رطوبت بر اساس وزن خشک

این روش استاندارد برای تعیین رطوبت دانه‌ها به کار گرفته شد [۱۸].

۲-۳-۲- بافت

از دستگاه بافت‌سنج TA.XT Plus، (Stable Micro Systems، انگلستان) با پروب استوانه‌ای (قطر ۲۵ میلی‌متر، کد P/2N) استفاده شد. سرعت نفوذ پروب ۵ میلی‌متر بر دقیقه بود و آزمون تا تخریب کامل بافت ادامه یافت. پارامترهای نیروی شکست (اولین پیک نیرو در نقطه شکست)، سفتی (حداکثر نیرو)، مدول الاستیسیته ظاهری

سانتی متر)، رطوبت اولیه (۱۰، ۱۵، ۲۰ درصد بودند و پاسخ ها شامل رطوبت نهایی، سفتی، نیروی شکست، فنول کل، فعالیت آنتی اکسیدانی، شاخص قهوه‌ای شدن، رنگ (L^*) و شمارش کپک. داده‌ها با نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۴) تحلیل و میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح ۰.۰۵ مقایسه شدند. نمودارها با Excel ترسیم شدند.

مورد بررسی در جدول ۱ آمده است. هر تیمار با سه تکرار انجام شد، بنابراین در مجموع ۸۱ واحد آزمایشی اجرا گردید. طراحی، کدگذاری، تصادفی‌سازی ترتیب اجرا و تحلیل اولیه با نرم‌افزار Design-Expert نسخه ۱۳.۰.۱۲ (Stat-Ease Inc., Minneapolis, USA) انجام شد. فاکتورهای مستقل شامل توان تابش (۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ وات)، زمان (۱۰، ۲۰، ۳۰ دقیقه)، فاصله از منبع (۵، ۱۰، ۱۵

Table 1- Box-Behnken experimental design with independent variables (coded and actual values)

Independent variable	Symbol	Unit	Coded level -1	Coded level 0	Coded level +1
Radiation power	X_1	W	300	400	500
Exposure time	X_2	min	10	20	30
Distance from infrared emitter	X_3	cm	5	10	15
Initial moisture content of chestnut	X_4	% (wet basis)	10	15	20

می‌دهند که بیش از ۹۸٪ تغییرات در پاسخ‌ها توسط فاکتورهای مدل توضیح داده می‌شود و تفاوت اندک بین R^2 و $Adj R^2$ بیانگر تأثیر واقعی متغیرهای مستقل بر پاسخ‌هاست. از میان فاکتورها، توان تابش بیشترین تأثیر را داشت، بعد از آن فاصله از منبع، رطوبت اولیه و زمان تابش. شکل ۲ برهم‌کنش بین پارامترها را نشان می‌دهد و تأثیر متقابل توان و زمان را بر کاهش رطوبت برجسته می‌کند. شکل ۳ تأثیر توان و زمان تابش را بر درصد رطوبت نهایی نشان می‌دهد. افزایش توان و زمان منجر به کاهش رطوبت شد، که به دلیل افزایش دما و تبخیر سریع‌تر رطوبت است [۲۴]. شکل ۴ اثر توان و فاصله را نشان می‌دهد؛ کاهش فاصله از منبع تابش به افزایش نفوذ گرما و کاهش رطوبت کمک کرد. همچنین، شکل ۴ تأثیر توان و رطوبت اولیه را بر رطوبت نهایی نمایش می‌دهد، که در آن رطوبت اولیه بالاتر به تبخیر بیشتر در توان‌های بالا منجر شد. شرایط بهینه توسط نرم‌افزار Design-Expert تعیین شد: توان تابش ۴۹۰/۵۰ وات، زمان ۲۱/۴۲ دقیقه، فاصله ۵/۵۵ سانتی متر و رطوبت اولیه ۱۳/۷۷٪ که رطوبت نهایی ۲/۷۲ را به دنبال داشت (شکل ۵).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بهینه‌سازی شرایط پوست‌گیری با مادون‌قرمز

بهینه‌سازی شرایط پوست‌گیری دانه شاه‌بلوط با استفاده از تابش مادون‌قرمز با روش سطح پاسخ (RSM) و طرح باکس-بنکن انجام شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل توان تابش (۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات)، زمان (۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه)، فاصله از منبع تابش (۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی متر) و رطوبت اولیه نمونه (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) بودند. شکل ۱ طراحی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی‌شده را تأیید می‌کند. فرض نرمال بودن داده‌ها نیز در شکل ۱ بررسی شد و توزیع تقریباً نرمال مانده‌ها (Residuals) نشان‌دهنده همبستگی بالای نتایج تجربی با مدل آماری است.

نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) در جدول ۲ ارائه شده است. مدل رگرسیون درجه دوم برای داده‌ها معنی‌دار بود ($P < 0.05$)، که نشان‌دهنده مناسب بودن مدل انتخاب‌شده است. مقادیر R^2 (0.9846) و $Adj R^2$ (0.9667) نزدیک به ۱ بودند، که دقت بالای مدل را تأیید می‌کند. این مقادیر نشان

Table 2 - Results obtained from ANOVA analysis related to infrared peeling

STD	RUN	IR Power (W)	Time (min)	Distance (cm)	Humidity (%)	R
10	1	500.00	20.00	10.00	10.00	2.88
16	2	400.00	30.00	15.00	15.00	3.33
12	3	500.00	20.00	10.00	20.00	4.03
6	4	400.00	20.00	15.00	10.00	4.02
5	5	400.00	20.00	5.00	10.00	2.81
25	6	400.00	20.00	10.00	15.00	4.08
9	7	300.00	20.00	10.00	10.00	5.71
8	8	400.00	20.00	15.00	20.00	4.32
24	9	400.00	30.00	10.00	20.00	3.43
26	10	400.00	20.00	10.00	15.00	4.13
1	11	300.00	10.00	10.00	15.00	5.65
11	12	300.00	20.00	10.00	20.00	5.56
18	13	500.00	20.00	5.00	15.00	2.75
27	14	400.00	20.00	10.00	15.00	4.24
20	15	500.00	20.00	15.00	15.00	2.87
13	16	400.00	10.00	5.00	15.00	3.13
21	17	400.00	10.00	10.00	10.00	3.57
15	18	400.00	10.00	15.00	15.00	4.18
14	19	500.00	10.00	10.00	10.00	2.81
23	20	400.00	30.00	5.00	15.00	3.02
19	21	400.00	10.00	10.00	20.00	4.48
22	22	300.00	20.00	15.00	15.00	5.94
17	23	400.00	30.00	10.00	10.00	4.11
7	24	500.00	30.00	10.00	15.00	2.79
3	25	300.00	20.00	5.00	15.00	4.77
—	26	400.00	30.00	5.00	20.00	3.97
—	27	300.00	30.00	10.00	15.00	5.28

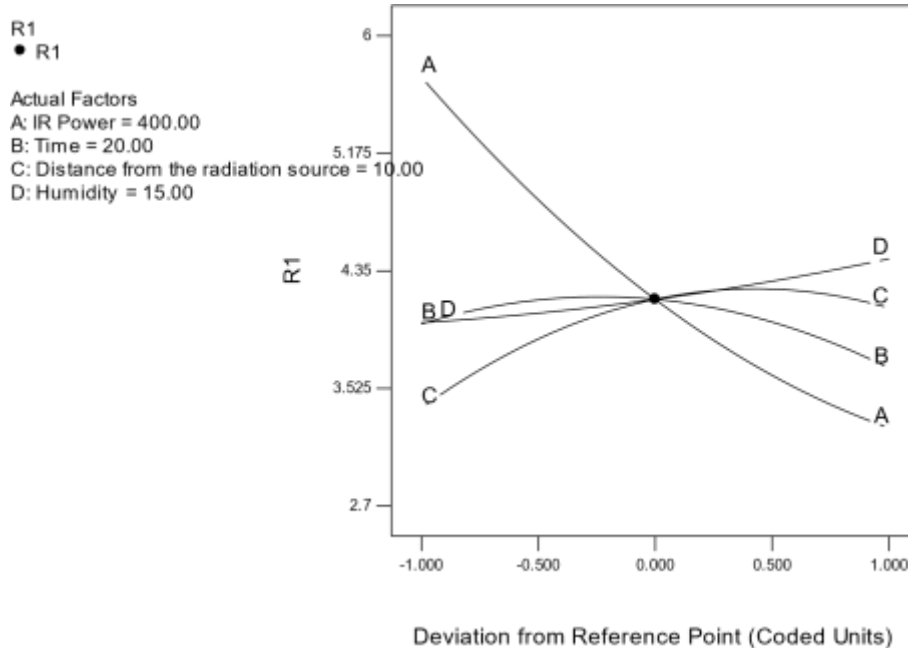


Figure 1- Contour plot of humidity, as a function of two factors: moisture content (%) and distance from the radiation source (cm).

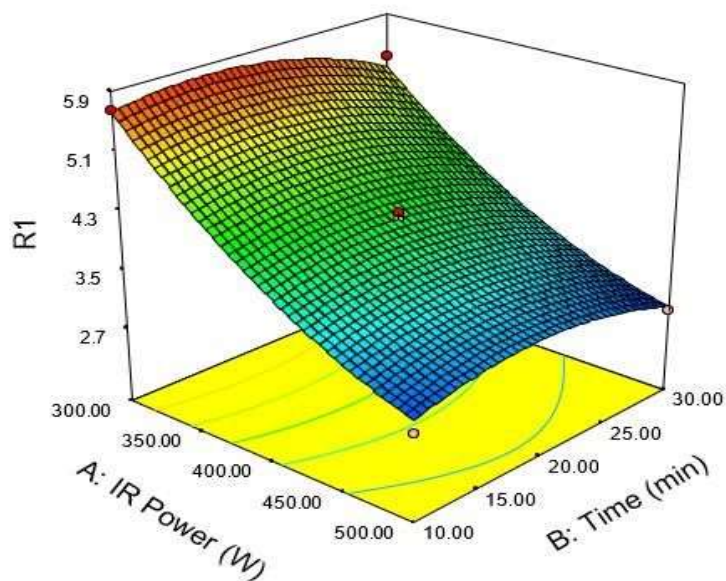


Figure 2- 3D surface plot of the effect of radiation power and time on chestnut moisture percentage

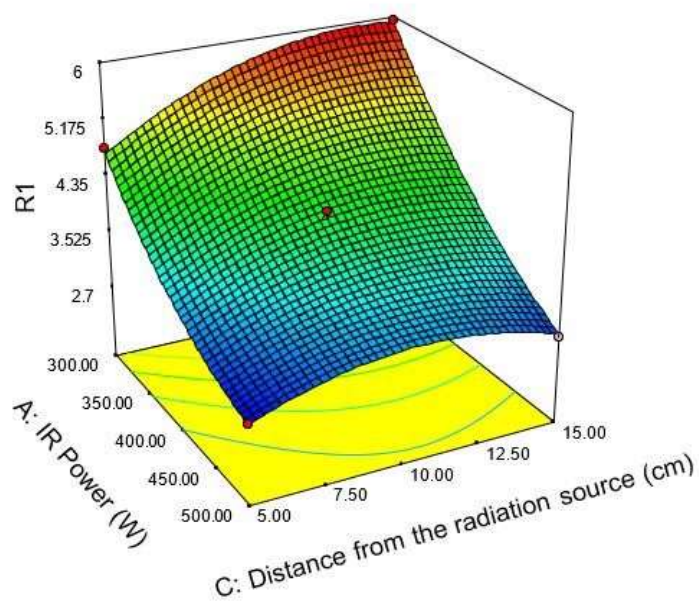


Fig 3- 3D surface plot of the effect of radiation power and distance on chestnut moisture percentage

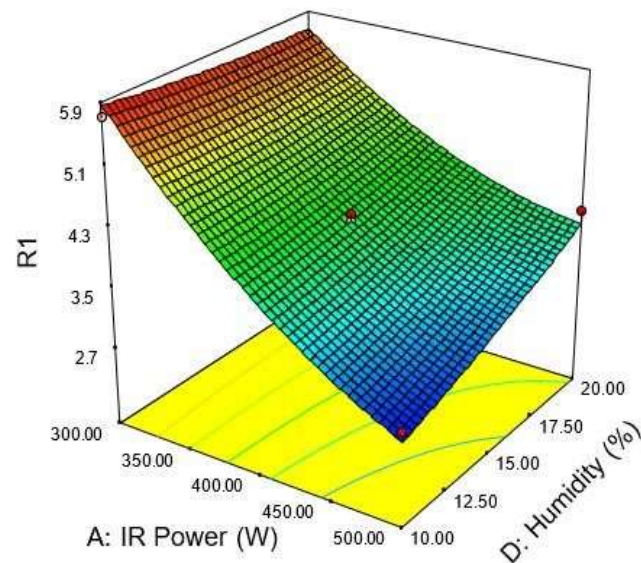


Fig 4- 3D surface plot of the effect of radiation power and chestnut moisture percentage on chestnut moisture percentage

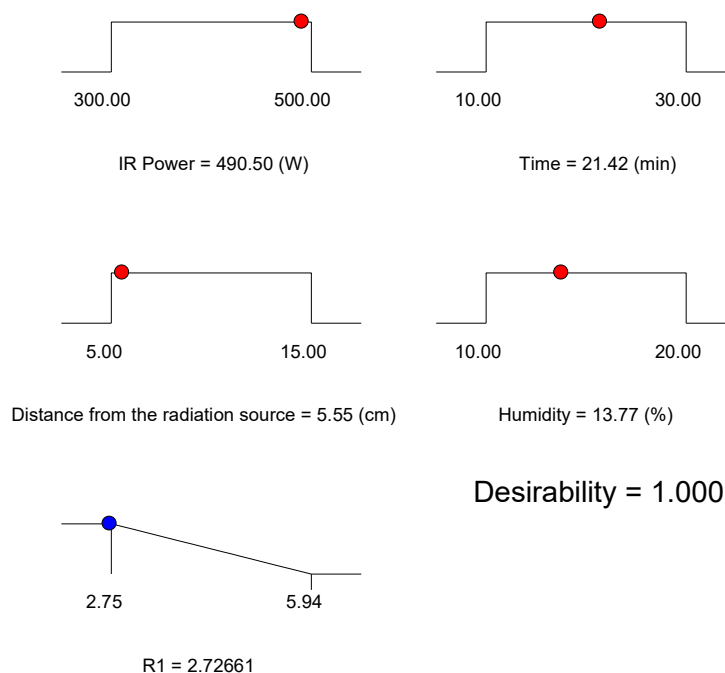


Figure 5- Optimizing the operational conditions of skin peeling with infrared

بالاترین میزان رطوبت (۴۷/۴ درصد) و شاه‌بلوط‌های برشته‌شده با مادون‌قرمز کمترین مقدار (۲/۸۰) را داشتند. این روند طی ۶۰ روز نگهداری ادامه یافت، به‌طوری‌که شاه‌بلوط‌های پوست‌کنده دستی همچنان بیشترین رطوبت و تیمار مادون‌قرمز کمترین مقدار (۱.۰۱) $\pm 0.01\%$ در روز ۶۰ را حفظ کردند. کاهش رطوبت در تیمار

۳-۲- رطوبت نهایی و مکانیسم‌های انتقال حرارت و جرم

تیمارهای اعمال‌شده به‌طور معنی‌داری بر میزان رطوبت شاه‌بلوط‌ها تأثیر گذاشت. در روز صفر، شاه‌بلوط‌های پوست‌کنده دستی

مادون قرمز به نفوذ عمیق تر پرتوها و تبخیر سریع تر رطوبت نسبت داده می شود. در شاه بلوط های برشته شده، میزان رطوبت بین روزهای ۱ و ۳۰ تفاوت معنی داری نداشت، اما در شاه بلوط های پوست کنده، کاهش قابل توجهی در روزهای ۳۰ و ۶۰ مشاهده شد. تیمارهای مادون قرمز در تمام مراحل ذخیره سازی رطوبت کمتری نسبت به پوست کنده دستی داشتند. شکل ۶ تغییرات رطوبت را طی ۶۰ روز نشان می دهد و تأیید می کند که رطوبت در تیمار مادون قرمز در روزهای ۳۰ و ۶۰ به طور معنی داری کمتر از روش دستی بود. برتری چشمگیر روش مادون قرمز در حذف رطوبت به چند مکانیسم فیزیکی هم افزا بازمی گردد. لامپ های کوارتز-هالوژن به کاررفته در این پژوهش تابش غالب را در ناحیه نزدیک و کوتاه موج مادون قرمز (۱/۲ تا ۳/۵ میکرومتر) منتشر می کنند که دقیقاً با باندهای جذب اصلی آب مایع ($\approx 1.45, 1.94$ و 3.0 میکرومتر) و گروه های هیدروکسیل نشاسته و سلولز هم پوشانی کامل دارد. در نتیجه، بیش از ۸۵ درصد انرژی تابشی مستقیماً در لایه محیطی به ضخامت ۱ تا ۳ میلی متر به گرمای نهان تبخیر تبدیل می شود و اتلاف حرارتی به صورت هدایت یا همرفت به حداقل می رسد. این الگوی گرمایش حجمی (volumetric heating) گرادیان دمایی معکوس شدید ایجاد می کند: دمای سطح دانه در شرایط بهینه طی ۳ تا ۴ دقیقه اول به بیش از ۱۶۰ درجه سانتی گراد می رسد، در حالی که مرکز دانه زیر ۱۰۰ درجه سانتی گراد باقی می ماند. چنین گرادیانی فشار بخار داخلی بسیار بالایی (۳ تا ۴ بار) تولید می کند و بخار فوق گرم را به سمت بیرون می راند. این پدیده که در منابع با عنوان تبخیر لحظه ای ناشی از مادون قرمز یا flash evaporation شناخته می شود، پیش تر در پوست گیری خشک گوجه فرنگی [۵]، سیب زمینی [۲۴] و هلو [۲۵] به خوبی گزارش شده است و به طور مستقیم باعث جدایش آسان پوست داخلی (pellicle) و ایجاد کانال های خروج بخار می گردد.

خروج انفجاری بخار همچنین ساختار متخلخل تری در مغز دانه به وجود می آورد که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (Deff) را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهد و امکان تعادل بسیار سریع تر با اتمسفر نگهداری را فراهم می کند. این امر توضیح می دهد که چرا رطوبت نمونه های مادون قرمز پس از ۶۰ روز به ۱/۰۱ درصد می رسد و عملاً هیچ جذب مجدد رطوبتی مشاهده نمی شود، در حالی که نمونه های دستی به دلیل حفظ ساختار متراکم تر، همچنان رطوبت بالاتری دارند [۲۵].

رطوبت نهایی زیر ۳ درصد همچنین ماتریکس غنی از نشاسته را به حالت شیشه ای (glassy state) با دمای انتقال شیشه ای بالاتر از دمای نگهداری می برد؛ پدیده ای که مستقیماً مسئول بافت تردتر، کاهش سفتی مکانیکی (بخش ۳-۳) و امتیازات حسی بالاتر (بخش ۳-۶) است. از سوی دیگر، رطوبت بسیار پایین سطح، پراکندگی نور را کاهش داده و شاخص روشنایی (L^*) را به طور معنی داری ارتقا می دهد (بخش ۳-۴).

در مقایسه با پژوهش های پیشین، رطوبت ۱/۰۱ درصد پس از ۶۰ روز به طور قابل توجهی پایین تر از مقدار ۳/۲ درصد گزارش شده توسط Oh و همکاران (۲۰۱۴) پس از تنها ۱۵ روز نگهداری شاه بلوط کره ای [۲۶] و همچنین بهتر از ۴-۵ درصد باقی مانده در گوجه فرنگی های مادون قرمز پوست شده است [۲۷] است. بنابراین، ترکیب تطابق طیفی، گرمایش حجمی، تبخیر لحظه ای و ساختار متخلخل القایی، توضیح فیزیکی محکمی برای کارایی بی نظیر خشک کردن و پایداری طولانی مدت مشاهده شده در این پژوهش ارائه می دهد و همزمان مصرف آب و تولید پساب را به طور کامل حذف می کند.

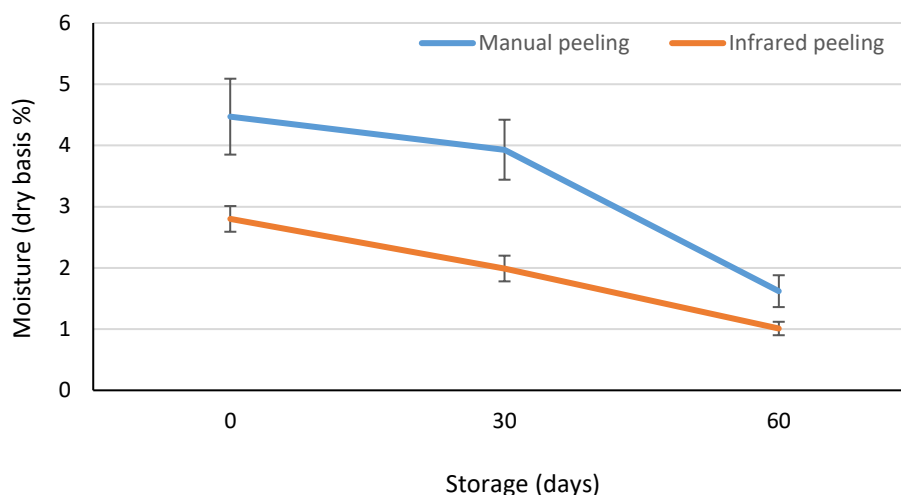


Figure 6 – Final moisture content of peeled chestnuts using infrared and manual peeling methods during storage

مدول الاستیسیته و کاهش نیروی لازم برای شکست اولیه و حداکثر نیروی فشاری می‌گردد. همزمان، رطوبت بسیار پایین (۱/۰۱ درصد در روز ۶۰) و فعالیت آبی ۰/۵۹، ماتریکس غنی از نشاسته را به‌طور کامل به حالت شیشه‌ای (glassy state) دمای انتقال شیشه‌ای بالاتر از ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌برد؛ در این حالت، رفتار مکانیکی از نوع لاستیکی-چقرمه به حالت ترد و شکننده (crisp) تغییر می‌کند که دقیقاً همان ویژگی مطلوب حسی در آجیل برشته‌شده است.

علاوه بر این، دمای سطحی بالای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد در چند دقیقه اول چرخه ژلاتینه شدن جزئی نشاسته سطحی و سپس خشک شدن فوق‌سریع را به دنبال دارد. این چرخه سریع پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی بین زنجیره‌های آمیلوپکتین و آمیلوز را به‌طور دائم کاهش می‌دهد و باعث افت مدول الاستیسیته ظاهری بافت می‌شود. در مقابل، در روش دستی، رطوبت بالاتر و فعالیت آبی ۰/۷۱ امکان مهاجرت تدریجی آب به داخل ماتریکس و پدیده رتروگراداسیون نشاسته (تشکیل کریستال‌های آمیلوز) را فراهم می‌کند؛ فرآیندی که به تدریج سفتی را در طول نگهداری افزایش می‌دهد و در نهایت بافتی سفت‌تر و کمتر مطلوب از نظر حسی ایجاد می‌کند.

۳-۳- سفتی بافت

تیمارهای پوست‌گیری اثر بسیار معنی‌داری بر سفتی بافت مغز شاه‌بلوط داشتند ($P < 0.001$). بلافاصله پس از فرآوری، شاه‌بلوط‌های پوست‌کنده‌شده به روش دستی سفتی ۹۸ نیوتن از خود نشان دادند، در حالی که نمونه‌های فرآوری‌شده با تابش مادون‌قرمز در شرایط بهینه تنها ۸۸/۷۵ نیوتن سفتی داشتند؛ یعنی حدود ۱۰/۵ درصد تردتر. این برتری در طول ۶۰ روز نگهداری نه‌تنها حفظ شد، بلکه افزایش نیز یافت؛ به‌طوری‌که در روز شصتم، سفتی روش دستی به ۱۳۶/۵۵ نیوتن رسید، اما نمونه‌های مادون‌قرمز همچنان در ۱۱۶/۷۵ نیوتن باقی ماندند و حدود ۱۴/۵ درصد تردتر بودند (جدول ۳).

کاهش اولیه و پایدار سفتی در روش مادون‌قرمز مستقیماً از مکانیسم‌های انتقال حرارت و جرم توضیح داده‌شده در بخش ۳-۱ ناشی می‌شود. گرمایش حجمی سریع و تبخیر لحظه‌ای (flash evaporation) بخار فوق‌گرم را مجبور به خروج انفجاری از بافت می‌کند و شبکه گسترده‌ای از منافذ ماکرو و میکرو در ماتریکس نشاسته-پروتئینی باقی می‌گذارد. این ساختار زنبوری باعث کاهش چگالی ظاهری بافت، افت

یکنواخت تر و مطلوب تر از نظر حسی و مکانیکی ارائه می‌دهد که این مزیت مستقیماً از پدیده‌های انتقال حرارت حجمی، تبخیر لحظه‌ای و تشکیل ساختار متخلخل پایدار سرچشمه می‌گیرد.

یافته‌های حاضر کاملاً با مطالعات اخیر بر روی سایر مغزها هم‌خوانی دارد. کاهش ۱۲-۱۸ درصدی سفتی در پسته و بادام نیز به تخلخل القایی مادون‌قرمز نسبت داده شده است [۲۸ و ۲۹] و همبستگی قوی بین رطوبت زیر ۳ درصد، فعالیت آبی کمتر از ۰/۶۰ و بافت ترد در پسته گزارش شده است [۳۰]. بنابراین، روش مادون‌قرمز نه تنها در لحظه فراوری، بلکه در تمام طول دوره نگهداری، بافتی تردتر،

Table 3- The firmness (N) of chestnuts with different treatments

Treatments	Storage (days)		
	0	30	60
Manual peeling	97.98±4.12 ^{Ac}	106.66±3.01 ^{Bd}	136.55±7.6 ^{Cd}
Infrared peeling	88.75±0.87 ^{Ab}	99.18±0.65 ^{Bb}	116.75±1.39 ^{Cc}

Different lowercase letters indicate a significant difference between treatments ($P<0.05$). Different uppercase letters indicate a significant difference between storage days ($P<0.05$).

شاخص روشنایی) در هر دو تیمار کاهش یافت، اما دامنه کاهش در روش مادون‌قرمز به مراتب کمتر بود: از ۴۷/۷۱ به ۳۲/۸۴ در مقابل افت شدیدتر از ۳۵/۵۷ به ۲۵/۸۵ در روش دستی (جدول ۴). شاخص a^* در روش مادون‌قرمز تقریباً ثابت ماند (۴۳/۴ در روز ۶۰)، در حالی که در روش دستی اندکی کاهش یافت. شاخص b^* نیز در هر دو روش به سمت مقادیر منفی تر حرکت کرد، اما اختلاف نهایی ناچیز بود. تفاوت رنگ کلی (ΔE) نسبت به روز صفر پس از ۶۰ روز در روش مادون‌قرمز تنها ۶/۸ واحد و در روش دستی ۱۲/۹ واحد بود که نشان‌دهنده ثبات رنگی بسیار بالاتر در تیمار مادون‌قرمز است.

این رفتار رنگی دوگانه (قهوه‌ای شدن سریع اولیه اما پایداری بالاتر در طول نگهداری) به‌طور کامل با مکانیسم‌های فیزیکی-شیمیایی زیر توضیح داده می‌شود. در مرحله فراوری، دمای سطحی بالای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بسیار پایین ($aw < 0/60$) باعث تسریع واکنش‌های میلارد و کاراملیزاسیون سطحی می‌شود و رنگ قهوه‌ای-قرمز مطلوب برشته‌کاری را به سرعت ایجاد می‌کند؛ این همان چیزی است که در قهوه [۳۱]، کنجد [۳۲] و سایر مغزهای

۳-۴- ویژگی‌های رنگی و مکانیسم‌های قهوه‌ای شدن حرارتی و غیرآنزیمی

تیمارهای پوست‌گیری اثر بسیار معنی‌داری بر تمام مؤلفه‌های رنگ CIELab داشتند ($P<0.001$). بلافاصله پس از فراوری، شاخص روشنایی (L^*) در شاه‌بلوط‌های مادون‌قرمز ۴۷/۷۱ بود که به‌طور چشمگیری بالاتر از ۳۵/۵۷ در روش دستی قرار داشت. این اختلاف مستقیماً از رطوبت بسیار پایین سطحی و ساختار متخلخل القایی ناشی می‌شود؛ زیرا حذف سریع آب، ضریب شکست نور در سطح را کاهش داده و پراکندگی نور را به حداقل می‌رساند و در نتیجه مغز دانه روشن‌تر و درخشان‌تر به نظر می‌رسد. در عین حال، شاخص a^* در روش مادون‌قرمز به ۴۴/۰ رسید، تقریباً دو برابر مقدار ۲۲/۱ در روش دستی؛ این افزایش شدید قرمزی به تشکیل سریع ملانوییدین‌های سطحی در واکنش میلارد اولیه و کاراملیزاسیون قندهای احیاکننده در دمای بالای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت داده می‌شود. شاخص b^* در روش مادون‌قرمز در روز صفر منفی (-۷/۹۵) بود که نشان‌دهنده غالبیت رنگ آبی-سبز (کاهش زردی) است، در مقابل مقدار مثبت در روش دستی بود. در طول ۶۰ روز نگهداری،

شاخص قهوه‌ای شدن نیز همین الگو را تأیید کرد: در روز صفر، روش دستی کمترین مقدار را داشت (به دلیل عدم اعمال حرارت)، اما پس از ۶۰ روز نگهداری، شاخص قهوه‌ای شدن در روش دستی به طور معنی‌داری بالاتر از روش مادون قرمز بود (شکل ۷). بنابراین، روش مادون قرمز نه تنها رنگ قهوه‌ای-طلایی مطلوب برشته‌کاری را در زمان کوتاه ایجاد می‌کند، بلکه به دلیل حذف مؤثر رطوبت و کاهش فعالیت آبی، پایداری رنگی بسیار بهتری در طول عمر ماندگاری ارائه می‌دهد؛ مزیت رقابتی مهمی که هم از نظر بصری و هم از منظر پذیرش مصرف‌کننده ارزشمند است.

مادون قرمز برشته نیز مشاهده شده است. اما همین رطوبت بسیار پایین و فعالیت آبی زیر ۰/۶۰ در طول نگهداری، سرعت واکنش‌های میلارد ثانویه و اکسیداسیون فنولیک‌ها را به شدت کند می‌کند و از تشکیل ملانوییدین‌های تیره و نامطلوب جلوگیری می‌نماید. در مقابل، روش دستی به دلیل رطوبت بالاتر و $a_w \approx 0.71$ محیط مساعدتری برای ادامه واکنش‌های قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی و اکسیداسیون پلی‌فنل اکسیدازی باقی‌مانده فراهم می‌کند و در نتیجه تیرگی پیش‌رونده و کاهش شدید L^* مشاهده می‌شود.

Table 4- Color indices of chestnuts with different treatments after 60 days of storage

Treatments	L*	Color indices	
		a*	b*
Manual peeling	25.85±0.33 ^a	21.05±0.20 ^a	-2.44±0.65 ^a
Infrared peeling	32.84±1.02 ^b	43.41±0.26 ^b	-1.98±0.87 ^a

Different lowercase letters indicate a significant difference between treatments ($P < 0.05$).

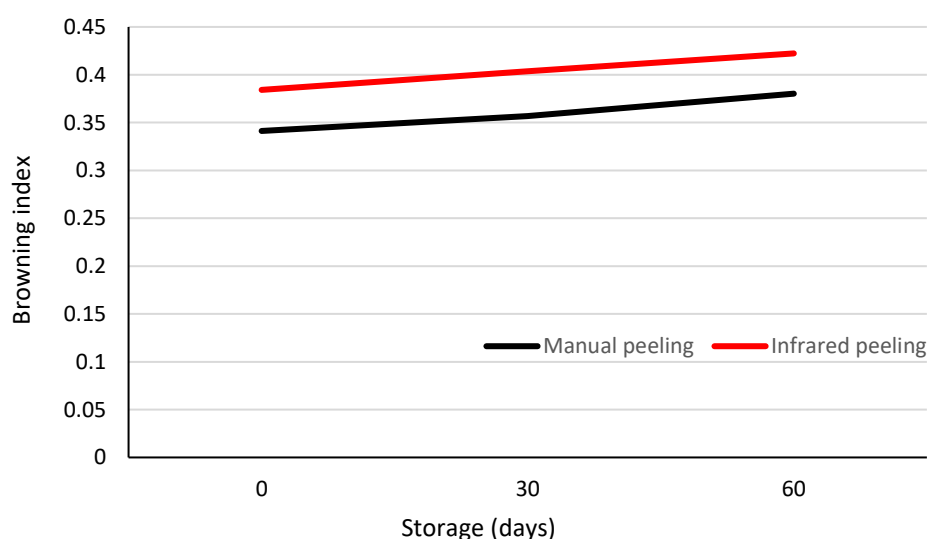


Figure 6- Browning index of chestnuts with different treatments

هیچ کلنی کپک و مخمر در هیچ‌یک از دو روش مشاهده نشد، اما از همان هفته‌های اولیه نگهداری، اختلاف معنی‌داری پدیدار شد. پس از ۳۰ روز، روش دستی به ۱۴ کلنی

۳-۵- شمارش کپک

پوست‌گیری با تابش مادون قرمز کنترل بسیار قوی و معنی‌داری بر بار قارچی شاه‌بلوط اعمال کرد. در روز صفر

بر گرم رسید، در حالی که نمونه‌های مادون‌قرمز تنها ۸ کلنی داشتند. در پایان دوره ۶۰ روزه، بار قارچی روش دستی به ۴۰/۳۳ کلنی بر گرم افزایش یافت، اما شاه‌بلوط‌های مادون‌قرمز همچنان در سطح بسیار پایین ۱۱/۳۳ کلنی بر گرم باقی ماندند (جدول ۵). این اختلاف بیش از ۷۲ درصدی، محصول مادون‌قرمز را به راحتی زیر حد مجاز استانداردهای بین‌المللی برای آجیل‌های خشک (بیشتر از 10^4 CFU/g) و حتی زیر آستانه سخت‌گیرانه‌تر بسیاری از بازارهای صادراتی قرار می‌دهد.

این عملکرد ضد میکروبی عالی نتیجه هم‌افزایی دو مکانیسم کاملاً مکمل است که هر دو مستقیماً از ویژگی‌های ذاتی فرآیند مادون‌قرمز ناشی می‌شوند. نخست، اثر حرارتی-نوری مستقیم: دمای سطحی که در کمتر از چهار دقیقه به بیش از ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، همراه با جذب انتخابی طول موج‌های کوتاه‌موج توسط پروتئین‌ها و نوکلئیک‌اسیدهای میکروبی، دنا توره شدن سریع پروتئین‌های غشایی، آسیب اکسیداتیو به DNA و RNA و تخریب دیواره سلولی اسپوره‌های مقاوم کپک را به دنبال دارد. شدت تابشی بیش از ۲ کیلووات بر مترمربع در شرایط بهینه (۴۹۰/۵ وات، فاصله ۵/۵ سانتی‌متر) کاهش ۵ تا ۶ لگاریتمی در بار قارچی سطحی ایجاد می‌کند؛ پدیده‌ای که پیش‌تر در بادام، پسته و گردو نیز به اثبات رسیده است. دوم، و شاید مهم‌تر، مانع غیرحرارتی ناشی از کاهش شدید فعالیت آبی: رطوبت نهایی ۱/۰۱

درصد و فعالیت آبی ۰/۵۹ به طور قاطع زیر حداقل آستانه رشد کپک‌های خشک‌دوست مانند گونه‌های Eurotium و (*Aspergillus restrictus* ۰/۶۱ فعالیت آبی ۰/۶۱ - ۰/۶۵) قرار می‌گیرد. این سطح فعالیت آبی حتی امکان متابولیسم حداقلی اسپوره‌های زنده‌مانده از مرحله حرارتی را نیز سلب می‌کند و به عنوان یک مانع دوم بسیار محکم عمل می‌کند. در مقابل، روش دستی با رطوبت ۱/۶۲ درصد و فعالیت آبی ۰/۷۱ همچنان محیطی کاملاً مساعد برای رشد قارچی فراهم می‌کند و آسیب‌های میکروسکوپی ناشی از چاقو نیز نقاط ورود آسان‌تری برای اسپوره‌های محیطی ایجاد می‌نماید. رشد اندک مشاهده‌شده در روز شصتم در نمونه‌های مادون‌قرمز احتمالاً به اسپوره‌های مدفون در عمق بیش از ۳-۴ میلی‌متر (خارج‌جای نفوذ مؤثر پرتوهای کوتاه‌موج) یا آلودگی بسیار محدود پس از فرآوری مربوط می‌شود، اما حتی این مقدار ناچیز نیز از نظر تجاری بی‌اهمیت و کاملاً ایمن است. در نتیجه، ترکیب اثر مستقیم ضد میکروبی تابش با ایجاد مانع فعالیت آبی بسیار پایین، شاه‌بلوط فرآوری‌شده با مادون‌قرمز را به محصولی با پایداری میکروبی استثنایی و قابلیت نگهداری بیش از شش ماه در شرایط محیطی تبدیل می‌کند؛ بدون نیاز به نگهدارنده شیمیایی، بسته‌بندی گاز اصلاح‌شده یا سردخانه.

Table 5- Mold count of chestnuts with different treatments

Treatments	Storage (days)		
	0	30	60
Manual peeling	0	14±1 ^{Ac}	40.33±0.57 ^{Bc}
Infrared peeling	0	8±0.89 ^{Ab}	11.33±0.51 ^{Ba}

Different lowercase letters indicate a significant difference between treatments ($P<0.05$).

Different uppercase letters indicate a significant difference between storage days ($P<0.05$).

تمام ویژگی‌های کلیدی تأیید کرد (جدول ۶). شاه‌بلوط‌های فرآوری‌شده در شرایط بهینه مادون‌قرمز در رنگ ۴/۲۸، بو ۴/۴۲، سفتی (تردی) ۴/۴۲ و پذیرش کلی ۳/۶۶ امتیاز کسب کردند، در حالی که روش دستی به ترتیب ۳/۹۰، ۳/۹۰، ۳/۹۰

۳-۶- ارزیابی حسی

ارزیابی حسی توسط ۲۰ ارزیاب آموزش‌دیده با مقیاس هیدونیک ۵ امتیازی، برتری قاطع روش مادون‌قرمز را در

و ۲/۹۵ امتیاز گرفت. این اختلافات آماری معنی‌دار و از نظر عملی بسیار بزرگ بودند و نشان‌دهنده تغییر محسوس کیفیت حسی به نفع مصرف‌کننده است.

امتیاز بالای رنگ در روش مادون‌قرمز مستقیماً از روشنایی بالاتر ($L^* = 47.71$) و تشکیل یکنواخت ملانوئیدین‌های قهوه‌ای-طلایی در سطح ناشی می‌شود. واکنش میلارد کنترل‌شده در دمای بالای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بسیار پایین، رنگدانه‌های معطر و جذاب را به سرعت ایجاد می‌کند، در حالی که فعالیت آبی پایین از تیرگی بیش‌ازحد در طول نگهداری جلوگیری می‌کند. در مقابل، روش دستی به دلیل عدم حرارت‌دهی، رنگ کم‌رنگ، مات و غیرجذاب‌تری ارائه داد که ارزیابان آن را «خام‌مانند» توصیف کردند.

در ویژگی بو نیز برتری آشکار بود. گرمایش سریع و حجمی مادون‌قرمز واکنش‌های میلارد و استرکر را در چند دقیقه اول به شدت فعال می‌کند و ترکیبات فرار معطر کلیدی مانند پیرازین‌های آجیلی، آلدئیدهای کاراملی و فوران‌ها را آزاد می‌سازد؛ دقیقاً همان ترکیباتی که رایحه برشته مطلوب را می‌سازند. روش دستی به دلیل فقدان این مرحله حرارتی، بوی ملایم و کم‌عمق‌تری داشت که ارزیابان آن را «طبیعی اما بی‌روح» ارزیابی کردند. این مشاهدات کاملاً با گزارش‌های مطالعات پیشین هم خوانی دارد [۳۳-۳۵].

بالاترین اختلاف در ویژگی «سفتی/تردی» دیده شد (۴/۴۲ در مقابل ۳/۹۰). همان‌طور که در بخش‌های ۱-۳ و ۲-۳ توضیح داده شد، ساختار متخلخل، رطوبت زیر ۳ درصد و حالت شیشه‌ای کامل، بافتی ترد، شکننده و بسیار خوشایند ایجاد می‌کند که هنگام جویدن صدای مشخص «کرانچ» تولید می‌کند؛ ویژگی‌ای که در بازارهای مدرن آجیل برشته‌شده بسیار پرتعداد است. در روش دستی، بافت متراکم‌تر و نیمه‌نرم، حس «چقرمه» و کهنگی را منتقل می‌کرد.

پذیرش کلی به‌عنوان ترکیبی از سه ویژگی فوق، به‌طور طبیعی بالاترین امتیاز را به روش مادون‌قرمز داد (۳/۶۶) اختصاص داد که نشان‌دهنده آمادگی کامل محصول برای ورود به بازار بدون نیاز به هیچ‌گونه بهبود حسی است. این نتایج نه تنها با مطالعات پیشین بر روی گوجه‌فرنگی، بادام و پسته مطابقت دارد، بلکه نشان می‌دهد شاه‌بلوط به دلیل محتوای نشاسته بالا، پاسخ بسیار بهتری به برشته‌کاری مادون‌قرمز می‌دهد و پتانسیل تبدیل شدن به یک محصول پرتعداد صادراتی را داراست.

به‌طور خلاصه، تمام بهبودهای حسی مشاهده‌شده مستقیماً از تغییرات فیزیکی و شیمیایی ایجادشده توسط فرآیند مادون‌قرمز (رطوبت بسیار پایین، ساختار متخلخل، واکنش‌های میلارد کنترل‌شده و غیرفعال‌سازی میکروبی) سرچشمه می‌گیرند و در نهایت محصولی یکنواخت، جذاب و واضحاً خوش‌طعم‌تر و تردتر ارائه می‌دهند که به‌خوبی با انتظارات بازارهای داخلی و بین‌المللی هم‌راست است.

Table 6 . Sensory evaluation of chestnuts after 60 days of storage

Treatments	Sensory evaluation			
	Color	Aroma	Firmness	Overall Acceptance
Manual peeling	3.42±0.59 ^a	3.90±0.59 ^a	3.90±0.59 ^a	2.95±1.05 ^a
Infrared peeling	4.28±0.70 ^c	4.42±0.70 ^c	4.42±0.70 ^c	3.66±1.14 ^c

Different lowercase letters indicate a significant difference between treatments ($P < 0.05$).

تابش مادون‌قرمز به‌عنوان فناوری پیشرفته‌ای در پوست‌گیری دانه شاه‌بلوط، کارایی بالایی نشان داد. بهینه‌سازی با روش

۴- نتیجه‌گیری

تضاد منافع

نویسندگان تایید می کنند که هیچ گونه تضاد منافع مالی یا منافع رقابتی در این مطالعه وجود ندارد.

بیانیه تامین مالی

این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی خاصی از نهادهای دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در طراحی، تحلیل، نگارش و تأیید نسخه نهایی مشارکت داشته اند.

۵-منابع

[۱] Antonio, A.L., et al. (2012). Effects of gamma radiation on the biological, physico-chemical, nutritional and antioxidant parameters of chestnuts—A review. *Food and Chemical Toxicology*, 50(9), 3234-3242.

[۲] Shakuri, F., Eghlima, G., Behboudi, H., & Babashpour-Asl, M. (2025). Phytochemical variation, phenolic compounds and antioxidant activity of wild populations of Iranian oak. *Scientific Reports*, 15(1), 6534.

[۳] Amagloh, F. C., Kaaya, A. N., Yada, B., Chelangat, D. M., Katungisa, A., Amagloh, F. K., & Tumuhimbise, G. A. (2022). Bioactive compounds and antioxidant activities in peeled and unpeeled sweetpotato roots of different varieties and clones in Uganda. *Future Foods*, 6, 100183.

[۴] Zhang, G., et al. (2023). Design and experiment of a combined peeling machine for water chestnut. *Scientific Reports*, 13(1), 2393

[۵] Zhang, L., Chen, L., Zhou, C., Mustapha, A. T., & Wahia, H. (2024). Advances in peeling techniques for tomato: A comprehensive review. *Food Reviews International*, 40(1), 212-229.

سطح پاسخ (RSM) شرایط ایده آل را با توان ۴۹۰/۵۰ وات، زمان ۲۱/۴۲ دقیقه، فاصله ۵/۵۵ سانتی متر و رطوبت اولیه ۱۳/۷۷ درصد تعیین کرد که رطوبت نهایی را به ۲/۷۲ درصد کاهش داد. توان تابش، فاکتور غالب در کاهش رطوبت و بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی بود. تیمار مادون قرمز در مقایسه با پوست گیری دستی، رطوبت کمتر، سفتی کاهش یافته (N ۸۸.۷۵ در روز صفر)، و بافت متخلخل تر ایجاد کرد. روشنایی ($L^*=47.71$) نیز در این روش بهتر حفظ شدند. کنترل رشد میکروبی و امتیاز بالای حسی، برتری این روش را تأیید کرد. تابش مادون قرمز نه تنها کیفیت محصول را بهبود بخشید، بلکه با حذف مصرف آب، کاهش ۷۵ درصدی انرژی و تولید پساب صفر، راهکاری کاملاً پایدار و قابل صنعتی سازی برای فراوری شاه بلوط و سایر آجیل ها ارائه می دهد.

دسترسی به داده ها

داده های این پژوهش در صورت درخواست معقول از نویسنده مسئول قابل دریافت هستند.

[۶] Sienkiewicz, A., & Czub, P. (2022). A method of managing waste oak flour as a biocomponent for obtaining composites based on modified soybean oil. *Materials*, 15(21), 7737.

[۷] Chen, L., Huang, Z., Wu, Y., Jiang, H., Tian, C., Fu, M., & Lyu, C. (2025). Evaluation of quality characteristics of hazelnut using infrared assisted enzymatic peeling technology. *Food Control*, 171, 111052.

[۸] Qu, W., Liu, Y., Feng, Y., & Ma, H. (2022). Research on tomato peeling using flame-catalytic infrared radiation. *Lwt*, 163, 113542.

[۹] Zhang, Y., Suo, K., Feng, Y., Yang, Z., Zhu, Y., Wang, J., ... & Chen, W. (2024). Catalytic infrared radiation dry-peeling Technology for non-Frozen and Frozen Grapes: Effects on temperature, peeling performance, and quality attributes. *Food Chemistry*, 455, 139854.

[۱۰] Kate, A. E., & Sutar, P. P. (2020). Effluent free infrared radiation assisted dry-peeling of ginger rhizome: A feasibility and quality attributes. *Journal of Food Science*, 85(2), 432-441.

- [۱۱] Zhao, S., et al. (2023). Heat transfer modelling for novel infrared peeling of potato. *Journal of Food Engineering*, 357, 111631.
- [۱۲] Eskandari, J., Kermani, A. M., Kouravand, S., & Zarafshan, P. (2018). Design, fabrication, and evaluation a laboratory dry-peeling system for hazelnut using infrared radiation. *Lwt*, 90, 570-576.
- [۱۳] Ding, T., Song, W., Wang, J., Wu, J., Wang, M., & Zhou, D. (2022). Infrared radiation peeling experiment of yellow peach and optimization of technological parameters. *Food Science and Technology*, 42, e68321.
- [۱۴] Okonkwo, C.E., et al. (2022). Microwave-assisted infrared dry-peeling of beetroot: Peeling performance, product quality, and cell integrity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102982.
- [۱۵] Abdelkarim, D. O., Ahmed, K. A., Younis, M., Yehia, H. M., El-Abedein, A. I. Z., Alhamdan, A., & Ahmed, I. A. M. (2022). Optimization of infrared postharvest treatment of barhi dates using response surface methodology (RSM). *Horticulturae*, 8(4), 342.
- [۱۶] Mukwevho, P.L., Kaseke, T., & Fawole, O.A. (2023). Optimisation using response surface methodology of quality, nutritional and antioxidant attributes of 'wichita' pecan nuts roasted by microwaves. *Processes*, 11(8), 2503.
- [۱۷] Xiaoying, L., Yuhua, H., & Xinxing, C. (2024). Development Status of Technology and Equipment of Chinese Torrey Green Nut Peeling. *Light Industry Machinery*, 42(3).
- [۱۸] Poljak, I., et al. (2021). Traditional sweet chestnut and hybrid varieties: Chemical composition, morphometric and qualitative nut characteristics. *Agronomy*, 11(3), 516.
- [۱۹] Akhavan Mahdavi, S., et al. (2021). Effect of heat-moisture treatment of brown rice flour and natural additives on the properties of gluten-free frozen cake batter. *Food Processing and Preservation Journal*, 13(3), 115-131.
- [۲۰] Mirzazadeh, M., et al. (2024). Optimization of Instant Beverage Powder Containing Propolis Extract Nanoliposomes. *International Journal of Food Science*, 2024(1), 9099501.
- [۲۱] Fan, X., et al. (2023). Study on correlation between browning degree of chestnut fruit and total phenols and flavonoids. *Journal of Nanjing Forestry University*, 47(6), 159.
- [۲۲] Mirzazadeh, N., et al. (2024). Comparison of different green extraction methods used for the extraction of anthocyanin from red onion skin. *Food Science & Nutrition*, 12(10), 7347-7357.
- [۲۳] Xu, K., et al. (2024). Elucidating the effect of different processing methods on the sensory quality of chestnuts based on multi-scale molecular sensory science. *Food Chemistry*, 431, 136989.
- [۲۴] Zhao, S., Wang, S., Ding, H., Guo, Z., Simelane, M. B., Liu, Q., ... & Ding, C. (2023). Heat transfer modelling for novel infrared peeling of potato. *Journal of Food Engineering*, 357, 111631.
- [۲۵] Yang, K., Suo, K., Pan, Z., Zhang, Q., Feng, Y., Shi, L., ... & Yang, Z. (2025). Research on dry-peeling of peaches using thermal flame heating. *Industrial Crops and Products*, 235, 121788.
- [۲۶] Oh, S. I., & Kim, M. J. (2014). Changes in quality characteristics of peeled chestnut 'Tsukuba' according to storage temperature and peeling method. *Korean Journal of Plant Resources*, 27(1), 72-79.
- [۲۷] Vidyarthi, S., Li, X., & Pan, Z. (2019). Peeling of tomatoes using infrared heating technology.
- [۲۸] Manyatsi, T.S., et al. (2023). Effects of infrared heating as an emerging thermal technology on physicochemical properties of foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(24), 6840-6859.
- [۲۹] Bagheri, H. (2020). Application of infrared heating for roasting nuts. *Journal of Food Quality*, 2020(1), 8813047.
- [۳۰] Mohammadi Moghaddam, T., et al. (2016). Sensory and instrumental texture assessment of roasted pistachio nut/kernel by partial least square (PLS) regression analysis: effect of roasting conditions. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 370-380.
- [۳۱] Mendes, L.C., et al. (2001). Optimization of the roasting of robusta coffee (*C. canephora conillon*) using acceptability tests and RSM. *Food Quality and Preference*, 12(2), 153-162.
- [۳۲] Kahyaoglu, T., & Kaya, S. (2006). Modeling of moisture, color and texture changes in sesame seeds during the conventional roasting. *Journal of Food Engineering*, 75(2), 167-177.

[۳۳] Vidyarthi, S., Li, X., & Pan, Z. (2019). Peeling of tomatoes using infrared heating technology.

[۳۴] Coskun, E., et al. (2021). Effect of far infrared heating process on surface decontamination and quality attributes of whole yellow and white onions. *Food Control*, 130, 108376.

[۳۵] Yang, J., et al. (2010). Infrared heating for dry-roasting and pasteurization of almonds. *Journal of Food Engineering*, 101(3), 273-280.



Scientific Research

Evaluation of the Oxidative Stability of a Blend of Soybean Oil, Palm Olein, and Extra Virgin Olive Oil Using an Accelerated Test

M. harasi¹, A.R. sadeghi mahonak^{*2}, M. ghorbani³, A.M. ziyaiifar⁴, M. alami⁵, H. tavakolifard⁶

1&6- M.Sc. student, Dept. of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2-3-4-5- Professor, Department of Food Science and Industry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article History: Received: 2025/04/21 Review: 2025/11/24 Accepted: 2025/12/27 Keywords: Chestnut, peeling, infrared radiation, optimization, Response Surface Methodology DOI: 10.48311/fsct.2026.84030.0 *Corresponding Author E-Javanmard@irost.ir	This study aimed to optimize the infrared-assisted peeling of chestnut kernels (<i>Castanea sativa</i> Mill.) and evaluate the effects on physicochemical, microbial, and sensory quality attributes during storage. Key process variables—radiation power (300–500 W), exposure time (10–30 min), distance from the emitter (5–15 cm), and initial moisture content (10–20%)—were optimized using Response Surface Methodology (RSM) with a Box–Behnken design. The optimum conditions were determined as 490.5 W power, 21.42 min exposure time, 5.55 cm distance, and 13.77% initial moisture content, achieving a final moisture content of 2.72%. Compared with conventional manual peeling, infrared peeling significantly reduced moisture content (to 1.01% after 60 days of storage), lowered kernel firmness (88.75 N versus 97.98 N initially), and improved surface brightness ($L^* = 47.71$). Moreover, infrared-treated samples exhibited superior microbial stability (mold count <12 CFU/g after 60 days) and higher sensory scores for color, aroma, texture, and overall acceptability. Owing to its high energy efficiency, minimal water usage, and excellent product quality retention, infrared radiation presents a sustainable and scalable alternative to traditional chestnut peeling methods for industrial applications.