



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی پوست‌گیری خشک آلو با گرمایش مادون قرمز تابشی به روش سطح پاسخ و ارزیابی ویژگی‌های

فیزیکوشیمیایی در مقایسه با روش قلیایی

داریوش شاطرآبادی^۱، علی ماشاءالله کرمانی^{۲*}، حجت‌الله اکبری^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

۲- دانشیار گروه فنی کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ‌های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۹

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴

کلمات کلیدی:

آلو،

پوست‌گیری خشک،

گرمایش مادون قرمز،

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی،

روش سطح پاسخ (RSM)،

بهینه‌سازی،

پوست‌گیری قلیایی

DOI: 10.48311/fsct.2026.119647.83085

* مسئول مکاتبات:

amkermani@ut.ac.ir

پوست‌گیری یکی از مراحل کلیدی فرآوری آلو است که روش‌های مرسوم استفاده از محلول قلیایی با چالش‌هایی نظیر تلفات بالای پوست‌گیری، راندمان پایین فرآیند و مصرف زیاد آب و انرژی، تولید فاضلاب شیمیایی و کاهش کیفیت محصول همراه است که در نهایت صرفه اقتصادی را کاهش می‌دهد. این پژوهش به بررسی امکان‌سنجی و بهینه‌سازی پوست‌گیری خشک آلو با استفاده از گرمایش تابشی مادون قرمز به عنوان جایگزین پایدار پرداخته است. سامانه آزمایشگاهی شامل ساطع‌کننده سرمایی مادون قرمز و غلتک‌های چرخان طراحی شد. اثرات توان ساطع‌کننده (۳۵۰ - ۱۰۰۰ وات)، زمان گرمایش (۹۰ - ۱۵۰ ثانیه) و فاصله ساطع‌کننده (۲۰ - ۷۰ میلی‌متر) بر عملکرد پوست‌گیری و خصوصیات فیزیکوشیمیایی (تلفات رطوبت، ضخامت پوست، دمای سطح، ویژگی تغییر رنگ ΔE) و محتوای اسید اسکوربیک) با روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که شرایط بهینه (توان ۷۹۷/۴۶ وات، فاصله ۷۰ میلی‌متر، زمان ۱۰۷ ثانیه) به از دست دادن رطوبت ۰/۳۰ درصد، ضخامت پوست ۰/۱۲ میلی‌متر، دمای سطح ۴۰ درجه سلسیوس، ΔE برابر ۱۳/۵ و محتوای اسید اسکوربیک ۱۴ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم منجر شد. در مقایسه با پوست‌گیری قلیایی مرسوم (سدیم هیدروکسید ۱۰ درصد، دمای ۸۵ درجه سلسیوس، مدت زمان غوطه‌وری ۱۰۰ ثانیه)، روش مادون قرمز اتلاف رطوبت را به طور چشمگیری کاهش داد (۰/۳۰ درصد در مقابل ۹/۵۶ درصد)، رنگ روشن‌تری (زاویه هيو ۸۲ درجه در مقابل ۵۵ درجه) حفظ کرد و محتوای اسید اسکوربیک را بیشتر نگه داشت (۱۴ در مقابل ۱۰/۵ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم)، ضمن حذف کامل فاضلاب شیمیایی. این یافته‌ها پتانسیل بالای فناوری گرمایش مادون قرمز را به عنوان روشی سبز، کارآمد و با کیفیت بالا برای فرآوری آلو تأیید می‌کند.

۱-مقدمه

آلو (*Prunus domestica L.*) میوه‌ای مهم در سطح جهانی هست که در آب و هوای معتدل و مدیترانه‌ای کشت می‌شود. طبق گزارش سازمان غذا و کشاورزی (فائو)^۱، تولید جهانی آلو سالانه به ۱۲/۵ میلیون تن می‌رسد که ایران با تولید ۳۷۶ هزار تن در رتبه ششم قرار دارد. آلو سرشار از ویتامین‌های A و C، پتاسیم، مس و فیبر غذایی و ترکیبات زیست فعال مختلف است که کاربرد آن‌ها را در آب‌میوه‌ها، پوره‌ها و فرمولاسیون‌های دارویی امکان‌پذیر می‌سازد. پوست‌گیری ضمن بهبود بافت و کاهش تانن‌ها، مواد مغذی ضروری را حفظ کرده و پتانسیل فراوری آلو را افزایش می‌دهد [۱].

میوه‌ها و سبزیجات به دلیل رطوبت بالا و فصل برداشت کوتاه، نیازمند فراوری برای افزایش ماندگاری هستند. ساختار بیرونی میوه از لایه‌ای به نام پریکارپ (پوست) تشکیل شده که روی آن را لایه مومی به نام کوتیکول پوشانده است. این لایه ضمن داشتن عملکردهای فیزیولوژیکی متعدد، به عنوان مانعی در برابر عوامل بیماری‌زا، آسیب مکانیکی و از دست دادن آب عمل می‌کند [۲]. اپیدرم مومی میوه مانع انتقال رطوبت در حین خشک شدن شده و برداشتن پوست را ضروری می‌سازد. پوست‌گیری همچنین برای تولید محصولات با ارزش افزوده مانند پوره و آبمیوه ضروری است، زیرا پوست آلو حاوی تانن‌ها و فیبرهای نامحلولی است که شفافیت آبمیوه را کاهش داده و باعث ایجاد گسی و مشکلات بافتی می‌شود [۳].

پوست‌گیری مرحله قابل توجهی از فراوری پس از برداشت میوه‌ها یا سبزیجات است. روش‌های مرسوم پوست‌گیری آلو، از جمله روش قلیایی و روش بخار، علی‌رغم کاربرد گسترده، با محدودیت‌های اساسی همراه هستند. روش قلیایی حجم بالایی فاضلاب شور-قلیایی تولید کرده و با هیدرولیز

پکتین‌ها به بافت میوه آسیب می‌زند، در حالی که روش بخار اگرچه بدون مواد شیمیایی است، اما اغلب باعث تغییر رنگ، سخت شدن سطح و پوست‌گیری ناهموار می‌شود [۴]. این کاستی‌ها ضرورت توسعه روش‌های جایگزین پایدار مانند پوست‌گیری خشک^۲ (بدون استفاده از آب) با استفاده از گرمایش مادون قرمز^۳ (IR) را آشکار می‌سازد [۲، ۵ و ۶].

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در کاربرد فناوری مادون قرمز در فراوری میوه و سبزیجات حاصل شده است. وو و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که سامانه‌های مادون قرمز کاتالیستی^۴ (CIR) که با گاز طبیعی یا مایع کار می‌کنند، بازده حرارتی بالاتری نسبت به ساطع‌کننده‌های الکتریکی سنتی داشته و مصرف انرژی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند [۷]. از منظر مکانیسمی، نیو و همکاران (۲۰۲۴) بیان کردند که گرمایش مادون قرمز با تسریع تخریب موضعی ماتریس پکتین و همی سلولز در لایه برون‌بر (اگزوکارپ)، نیروی چسبندگی بین پوست و گوشت را بدون آسیب به میان‌بر (مزوکارپ) کاهش می‌دهد [۸]. افزون بر این، تحلیل‌های اخیر اقتصادی- زیست‌محیطی توسط اسلامی و همکاران (۲۰۲۴) نشان می‌دهد که فناوری مادون قرمز مصرف آب و انرژی را کاهش، پسماند جامد را تا ۵۲ درصد کم می‌کند و در ارزیابی چرخه حیات^۵ (LCA) عملکرد به مراتب بهتری نسبت به روش‌های بخار یا قلیایی دارد [۹].

علی‌رغم کاربردهای امیدوارکننده پوست‌گیری خشک با حرارت‌دهی مادون قرمز به عنوان یک فناوری نوظهور برای میوه‌ها و سبزیجات مختلف، تاکنون مطالعه منتشر شده‌ای کاربرد آن را برای آلو که دارای اپیدرم مومی و ساختاری ظریف است، بررسی نکرده است. بنابراین، این مطالعه با هدف توسعه و بهینه‌سازی سامانه پوست‌گیری خشک با مادون قرمز برای آلو و ارزیابی امکان‌سنجی آن در مقایسه با

4-Catalytic infrared

5- Life cycle assessment

1- Food and agriculture organization

2- Dry peeling

3- Infrared heating

آلوهایی با ابعاد یکسان به صورت تصادفی برای انجام این آزمایش انتخاب گردید.

۲-۲- سامانه پوست‌گیری مادون قرمز

سامانه پوست‌گیری که برای فرآوری آلو در این تحقیق توسعه داده شد، سامانه پوست‌گیری خشک مادون قرمز در مقیاس آزمایشگاهی است که شامل دو واحد اصلی است: (۱) واحد گرمادهی مادون قرمز با یک ساطع‌کننده مادون قرمز سرامیکی و (۲) واحد غلتک‌های گردان میوه آلو (شکل ۱). این سیستم برای گرم کردن یکنواخت سطح آلو، سست کردن چسبندگی بین پوست و گوشت میوه (مزوکارپ) و ایجاد ترک سطحی روی پوست میوه آلو از طریق گرمایش سریع طراحی شده است. در واحد گرمایش مادون قرمز از یک ساطع‌کننده سرامیکی منحنی (60×240 میلی‌متر، RCH0624، تایوان) با توان ۱۰۰۰ وات استفاده شد (شکل ۱) که روی سقف محفظه نصب شده و تابش را در طول موج‌های ۲/۵ تا ۶ میکرومتر ساطع می‌کند. در زیر ساطع‌کننده، دو غلتک چرخان هم جهت از جنس گالوانیزه برای چرخاندن نمونه‌های آلو در وسط محفظه نصب شده بودند. غلتک‌ها با استفاده از یک سیستم تسمه و پولی متصل به یک موتور الکتریکی سه فاز و یک اینورتر برای تنظیم دور روی ۳ دور در دقیقه، حرکت می‌کردند.

روش قلیایی مرسوم انجام شده است. پوست‌گیری با مادون قرمز با حذف فاضلاب شیمیایی، کاهش مصرف آب و انرژی و حفظ مواد مغذی حساس به گرما (مانند اسید اسکوربیک)، جایگزین پایداری برای پوست‌گیری قلیایی مرسوم است [۵]. اهداف خاص این پژوهش عبارتند از: (۱) تعیین پارامترهای عملیاتی بهینه گرمایش مادون قرمز (IR) با استفاده از روش سطح پاسخ^۶ (RSM) جهت دستیابی به راندمان بالا و کیفیت مطلوب در پوست‌گیری آلو؛ (۲) مقایسه عملکرد فرآیند پوست‌گیری و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آلوه‌ای تیمار شده با IR نسبت به روش قلیایی مرسوم به منظور ارزیابی پایداری و کیفیت محصول. با دستیابی به این اهداف، پژوهش حاضر به توسعه فناوری‌های فرآوری میوه پایدارتر و کارآمدتر با پتانسیل کاربرد صنعتی کمک می‌کند.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

آلو مورد نیاز از باغات سبزوار استان خراسان رضوی و از رقم سانتاروزا در سال ۱۴۰۰ تهیه شد و در دمای ۴ درجه سلسیوس به محل آزمایشگاه منتقل شد. آلوه‌ها پس از شستشوی کامل درجه‌بندی شد و موارد دارای عیوب ظاهری یا خارج از اندازه مورد نظر، از میان آنها برچیده شدند. سپس

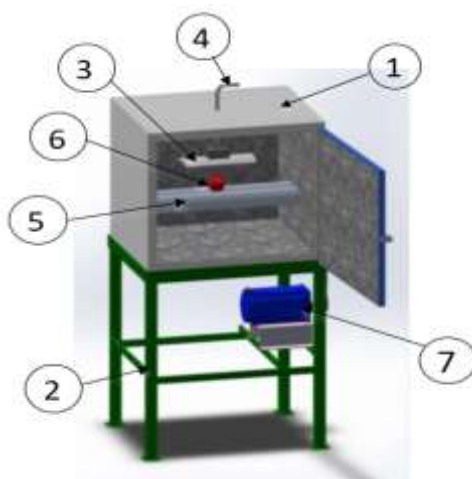


Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory-scale infrared (IR) dry-peeling system for plums. (1) Chamber, (2) Chassis, (3) Ceramic IR emitter, (4) Screw mechanism for adjusting the distance, (5) Rotating rollers, (6) Plum sample, (7) Electric motor and belt drive assembly.

۲-۳- روش آزمایش پوست‌گیری مادون قرمز

در این تحقیق آزمایش‌هایی برای ارزیابی عملکرد سیستم پوست‌گیری خشک مادون قرمز (IR) با در نظر گرفتن توان منبع تغذیه، مدت زمان تابش‌دهی و فاصله ساطع‌کننده تا نمونه در سه سطح به عنوان پارامترهای مستقل مطابق (جدول ۱) و روش سطح پاسخ برای میوه آلو انجام شد. برای دستیابی به سطوح مختلف منبع تغذیه الکتریکی برای ساطع‌کننده

مادون قرمز، یک دستگاه دیمر روی خط برق شهری ورودی نصب شد. شدت توان با استفاده از یک آنالایزر توان (LUTRON DW-6090) پایش و کنترل شد. مدت زمان گرمایش مادون قرمز توسط کرنومتر تنظیم گردید و فاصله ساطع‌کننده مادون قرمز تا سطح نمونه با استفاده از پیچ تنظیم ارتفاع شماره ۴ تعیین شد (شکل ۱). دیاگرام برقی سامانه مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است.

Table 1. Actual and coded levels of independent variables in the central composite design (CCD) for infrared dry-peeling of plums

Variable	Low (-1)	Center (0)	High (+1)
IR emitter power (W)	350	675	1000
Irradiation duration (s)	90	120	150
Emitter distance to sample (mm)	20	45	70

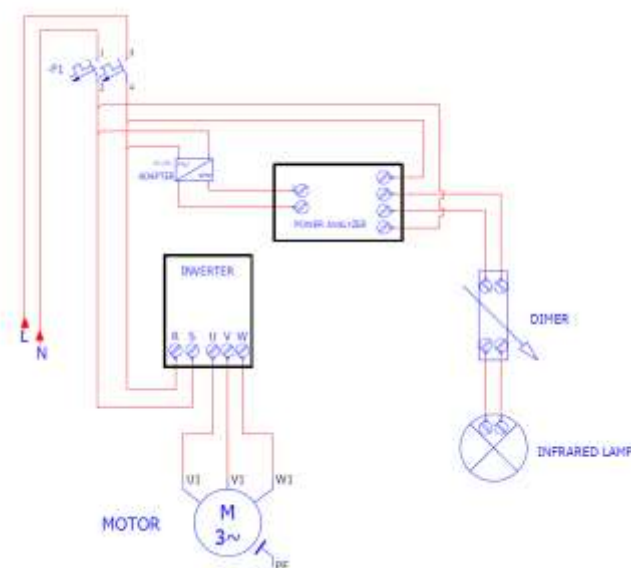


Fig. 2. Electrical circuit diagram of the infrared peeling chamber including power supply, dimmer, motor drive, and IR emitter connections

متغیرهای وابسته مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد پوست‌گیری با اشعه مادون قرمز و کیفیت آلو رطوبت از دست رفته، ضخامت پوست جدا شده، ویژگی‌های رنگ، و میزان اسید اسکوربیک بود.

۲-۵-۱- ضخامت پوست

کاهش ضخامت پوست‌کنده شده، محصول نهایی را کامل‌تر کرده و ضایعات فرآوری را کاهش می‌دهد. ضخامت پوست‌کنده شده هر تیمار توسط کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر در سه نقطه از پوست‌کنده اندازه‌گیری و میانگین مقادیر اندازه‌گیری ثبت شد.

۲-۵-۲- رطوبت از دست رفته

رطوبت از دست‌رفته نشان‌دهنده کاهش وزن نمونه بر اثر تبخیر رطوبت در طی حرارت‌دهی با تابش مادون قرمز است. این پارامتر با اندازه‌گیری تغییر جرم نمونه آلو قبل ($M1$) و بعد ($M2$) از عملیات حرارتی و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$\text{Moisture loss \%} = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100 \quad (1)$$

۲-۴- پوست‌گیری آلو با محلول قلیایی

پوست‌گیری با محلول قلیایی، یک روش مرسوم، به عنوان تیمار کنترل برای مقایسه با روش پوست‌گیری خشک مادون قرمز استفاده شد. عملیات پوست‌گیری با قلیای داغ با استفاده از محلول ۱۰ درصد وزنی / حجمی سدیم هیدروکسید (NaOH) (۱۰۰ گرم در لیتر) در شرایط ۸۵ درجه سلسیوس که از آزمایش‌های اولیه و استانداردهای مرجع تعیین شده بود [۱۰]. انجام شد تا از پوست‌گیری مؤثر و حفظ کیفیت (مانند ویتامین ث، رنگ) آلوها اطمینان حاصل شود. زمان غوطه‌وری با آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی^۱ (CRD) شامل سه زمان ۷۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ ثانیه با سه تکرار تعیین شد. پس از عملیات قلیایی، آلوها به مدت ۳۰ ثانیه در آب ۲۵ درجه سلسیوس شسته شده و خنثی شدن قلیا با فنل فتالین ۱ درصد تأیید گردید. سپس نمونه‌ها به صورت دستی پوست‌گیری شدند. پارامترهای عملکردی شامل رطوبت از دست‌رفته، ضخامت پوست و ویژگی رنگی اندازه‌گیری گردید. این پارامترها به عنوان مبنای مقایسه روش پوست‌گیری مادون قرمز مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۵- پارامترهای عملکرد پوست‌گیری

۲-۵-۳- دمای سطحی آلو

دمای سطحی آلوهای تیمار شده با اشعه مادون قرمز بلافاصله پس از تیمار حرارت‌دهی در سه نقطه مختلف (دو انتها و وسط میوه) با استفاده از دماسنج مادون قرمز غیرتماسی مدل (Testo 830-T2) اندازه‌گیری شد و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده ثبت گردید. برای پوست‌گیری با محلول قلیایی، دمای سطح آلو برابر با دمای محلول قلیا در نظر گرفته شد.

۲-۵-۴- ویژگی رنگی

تغییر در ویژگی‌های رنگ آلود پوست‌گیری شده پارامتر مهمی برای ارزیابی میزان آسیب بافتی، کیفیت و معیارهای پذیرش است. برای تعیین تغییر رنگ آلود تیمار شده با مادون قرمز از طریق روش پردازش تصویر استفاده شد. تصاویر نمونه‌ها پس از پوست‌گیری با دوربین دیجیتال (Canon, Powershot G12, 10 megapixels) گرفته شد. دوربین بر روی جعبه‌ای با ابعاد $45 \times 45 \times 45$ سانتی‌متر، مجهز به چهار لامپ فلورسنت سفید رنگ (۳۲ وات، ۲۶۳۰ لوکس) ثابت شد. پردازش تصویر در openCV-Python نوشته شد و برنامه در فضای رنگی RGB وارد شد، سپس مقادیر L^* (روشنایی)، a^* (قرمزی) و b^* (زردی) محاسبه شد. ویژگی‌های تصویر برای هر تیمار با تصویر مرجع مقایسه و تغییر رنگ (ΔE) توسط (رابطه ۲) تعیین شد.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2)$$

برای نمونه‌های پوست‌گیری شده از تیمار شاهد قلیایی و مقایسه روش پوست‌گیری مادون قرمز با روش قلیایی، شاخص رنگ زاویه هیو با استفاده از (رابطه ۳) محاسبه شد.

$$\text{Hue angle} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (3)$$

۲-۵-۵- آسکوربیک اسید

میوه آلو سرشار از آنتی‌اکسیدان‌ها، از جمله اسید آسکوربیک یا ویتامین ث است. این ویتامین به شرایط مختلف فرآوری حساس است، بنابراین میزان پایداری این ویتامین پس از پوست‌گیری می‌تواند شاخصی از کیفیت فرآیند و محصول در نظر گرفته شود. به دلیل حساسیت بالای اسید آسکوربیک به حرارت، تحت عملیات حرارتی ممکن است از بین برود و کیفیت محصول را کاهش دهد. اگرچه اسید آسکوربیک به عنوان یک تثبیت‌کننده عمل می‌کند و از واکنش‌های قهوه‌ای شدن جلوگیری می‌کند، اما با وجود حرارت، می‌تواند برعکس عمل کند و واکنش‌های قهوه‌ای شدن را تسریع کند. برای اندازه‌گیری میزان اسید آسکوربیک از روش استاندارد AOAC Official Method 967.21 استفاده شد [۱۱].

۲-۶- طراحی آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها

در این مطالعه، طراحی آزمایش‌هایی برای بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی سیستم پوست‌گیری مادون قرمز آلو با روش سطح پاسخ (RSM) در یک طرح مرکب مرکزی^۲ (CCD) با شش تکرار نقطه مرکزی اجرا شد (جدول ۲). متغیرهای مستقل سیستم پوست‌گیری مادون قرمز، منبع تغذیه الکتریکی ساطع‌کننده (X_1) در سه سطح ۳۵۰، ۶۷۵ و ۱۰۰۰ وات، فاصله لامپ از نمونه (X_2) در سه سطح ۲۰، ۴۵ و ۷۰ میلی‌متر، مدت زمان حرارت‌دهی (X_3) در سه سطح ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه می‌باشد. متغیر وابسته شامل رطوبت از دست‌رفته (Y_1 ، %)، ضخامت پوسته (Y_2 ، mm)، ویژگی رنگی (Y_3) و دمای سطحی (Y_4 ، °C) بودند. (جدول ۲)، ۲۰ آزمایش تعیین شده توسط نرم افزار Design-Expert Version 13.0 و نتایج را نشان می‌دهد. داده‌های تجربی به‌دست‌آمده برای هر پاسخ به مدل چند جمله‌ای مرتبه دوم کامل برازش داده شد و ضرایب رگرسیون محاسبه شد. اهمیت ضرایب مدل برای هر پاسخ با استفاده از تحلیل واریانس^۳ (ANOVA) از محاسبات و قضاوت F-value مربوطه تعیین شد. برای فرآیند اعتبار سنجی، درمان پوست‌گیری مادون قرمز در شرایط بهینه عملیاتی سیستم

گرمایش مادون قرمز انجام شد و مقادیر پاسخ تعیین شد. عبارتند از: رطوبت از دست رفته $0.18 \pm 0.38\%$ ، ضخامت پوست 0.1 ± 0.14 میلی متر، اختلاف رنگ $260 \pm 13/75$ ، $\Delta E =$ و دمای سطح $3/2 \pm 38/5$ درجه سلسیوس. (۶ تکرار، ۶۷۵ وات، ۴۵ میلی متر، ۱۲۰ ثانیه) به ترتیب

Table 2. Central composite design (CCD) matrix and experimental results for infrared dry-peeling of plums

Treatment No.	Run	Independent variables			Response variables			
		X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
		IR emitter power (W)	Distance (mm)	Irradiation time (s)	Moisture loss (%)	Peel thickness (mm)	Color difference (ΔE)	Surface temp. ($^{\circ}C$)
6	1	1000	20	150	3.5	0.033	16.27	90
18	2	675	45	120	0.8	0.13	13.55	40.5
1	3	350	20	90	0.2	0.180	9.79	35
10	4	1000	45	120	1	0.04	16.20	72
8	5	1000	70	150	1	0.035	15.5	70
14	6	675	45	150	0.2	0.168	13.56	50
11	7	675	20	120	1.9	0.163	14.64	34.5
7	8	350	70	150	0	0.188	11.02	36
4	9	1000	70	90	1	0.043	15.23	42.5
3	10	350	70	90	0.1	0.168	9.81	34.5
13	11	675	45	90	1	0.147	13.5	38.5
19	12	675	45	120	0.3	0.132	13.54	34
12	13	350	45	120	0.3	0.135	13.40	36
2	14	1000	20	90	2.8	0.086	16.30	45.5
9	15	350	45	120	0	0.135	10.11	34.5
20	16	675	45	120	0.3	0.137	14.23	41.5
5	17	350	20	150	0.1	0.175	9.83	50
16	18	675	45	120	0.3	0.160	13.70	41
15	19	675	45	120	0.3	0.134	13.95	40
17	20	675	45	120	0.3	0.155	14.12	40

CCD with 6 center point replicates (675 W, 45 mm, 120 s). For mean $\pm$ SD values of center point, see text above. Non-center points were performed once according to standard CCD design.

به ترتیب بیش از ۹۲٪ و بیش از ۸۴٪ بودند. این نتایج تأیید می کند که مدل رگرسیون در سطح احتمال ۱ درصد (۰/۰۱) معنی دار است و می تواند عملکرد پوست گیری را تحت پارامترهای کاری گرمایش مادون قرمز پیش بینی و بهینه کند. ضریب تغییرات (C.V.) نیز در محدوده ۲/۰۶ تا ۲۲/۸۹ درصد متغیر بود. مقادیر پایین ضریب تغییرات نشان دهنده تغییرات ناچیز و پایداری بالای مدل است. مقدار دقت کافی بیش از ۹/۹۱ (نسبت سیگنال به نویز مطلوب $S/N > 4$) بود [۱۲]. بنابراین، مدل های برازش شده برای بهینه سازی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی برازش مدل های سطح پاسخ

جدول ۳ نتایج تحلیل رگرسیون مدل های چندجمله ای مرتبه دوم کامل را نشان می دهد. این مدل ها برای ارزیابی برازش مدل های سطح پاسخ در پوست گیری مادون قرمز آلو و برای هر متغیر پاسخ برازش شده اند. مدل های توسعه یافته با روش RSM برازش معنی داری نشان دادند ($p\text{-value} < 0.0003$)، در حالی که عدم برازش (Lack of fit) معنی دار نبود ($p\text{-value} > 0.0508$). ضرایب تعیین (R^2) و ضرایب تعیین تعدیل شده ($\text{Adjusted } R^2$) مدل های چندجمله ای مرتبه دوم

متغیرهای گرمایش مادون‌قرمز در پوست‌گیری آلو قابل استفاده هستند.

Table 3. Statistical evaluation of quadratic models for response variables in IR dry-peeling of plums

Evaluation metrics	Response variables			
	Peel thickness (mm)	Moisture loss (%)	Surface temp. (°C)	Color difference (ΔE)
Model (<i>p</i> -value)	> 0.0001**	> 0.0001**	> 0.0001**	> 0.0001**
Lack of fit (<i>p</i> -value)	0.29 ns	0.06 ns	0.05 ns	0.55 ns
R ²	0.96	0.94	0.93	0.99
Adj. R ²	0.93	0.89	0.87	0.98
Coefficient of variation (%)	10.02	22.31	11.77	2.23
Adequate precision	18.63	15.76	14.90	32.09

نشان می‌دهد. این مدل شامل عرض از مبدا، اثرات خطی، اثرات متقابل (X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3) و اثرات درجه دوم (X_1^2 , X_2^2 , X_3^2) است. سطوح معنی‌داری بر اساس CCD و در دو سطح ۵٪ (*, $p < 0.05$) و ۱٪ (**, $p < 0.01$) تعیین شده‌اند. ضرایب رگرسیون نشان‌دهنده میزان و جهت تأثیر هر متغیر بر پاسخ بوده و مقادیر *p* معناداری آماری را تأیید می‌کنند.

۳-۲- تأثیر متغیرهای عملیاتی مادون قرمز بر عملکرد پوست‌گیری

جدول ۴ ضرایب رگرسیون و سطوح معنی‌داری مدل چندجمله‌ای مرتبه دوم کامل (حاصل از RSM و ANOVA) را برای ارزیابی اثرات توان (X_1), زمان حرارت‌دهی (X_2) و فاصله ساطع‌کننده (X_3) بر پارامترهای پوست‌گیری آلو (ضخامت پوست، رطوبت از دست‌رفته، دمای سطح و ΔE)

Table 4. Regression coefficients and statistical significance of independent variables affecting IR peeling performance

Response variables	Intercept	Linear effects			Interaction effects			Quadratic effects		
		X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2
Peel thickness (mm)	14.0	-0.06 0.0001** >	-0.002 >0.5490	-0.005 >0.2612	-0.009 >0.0612	-0.005 >0.2711	-0.008 >0.0809	-0.056 0.0001** >	-0.014 >0.0939	0.016 >0.0680
Moisture loss (%)	43.0	0.89 0.0001** >	-0.03 >0.7840	-0.61 0.0002** >	0.11 >0.3671	-0.50 0.0016** >	-0.09 >0.4794	-0.01 >0.9652	0.09 >0.6640	0.59 0.0156* >
Surface temp. (°C)	80.39	13.00 0.0001** >	10.00 0.0001** >	-3.20 >0.0870	6.49 0.0043** >	-1.06 >0.5855	-3.81 >0.0708	12.00 0.0039** >	3.00 >0.3729	-4.00 >0.2420
Color difference (ΔE)	82.13	2/89 0.0001** >	0.15 >0.1330	-0.11 >0.2529	-0.12 >0.2610	-0.38 0.0049** >	0.18 >0.1136	-0.81 0.0012** >	-0.43 0.0383* >	0.41 0.0429* >

ضخامت پوست، شاخصی کلیدی در ارزیابی عملکرد سیستم پوست‌گیری مادون قرمز است که مستقیماً بر بازده محصول و ارزش اقتصادی تأثیر می‌گذارد. حذف بیش از حد

۳-۲-۱- ضخامت پوست

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، افزایش توان ساطع‌کننده از ۳۵۰ به ۱۰۰۰ وات، ضخامت پوست را از ۰/۱۸۸ به ۰/۰۳۳ میلی‌متر کاهش داد. این کاهش به نفوذ سطحی (۱-۰/۱ میلی‌متر) تابش مادون قرمز (۶-۲/۵ میکرومتر) نسبت داده می‌شود که با ایجاد ترک و فشار بخار در ماتریس پکتین-همی سلولز، چسبندگی پوست به گوشت را تضعیف می‌کند [۱۴، ۱۳، ۴]. شن و همکاران (۲۰۲۰) تأیید کردند که این دقت، از دست دادن مزوکارپ (گوشت میوه) را به حداقل می‌رساند [۱۴]. این یافته‌ها با مطالعات انجام‌شده بر روی هلو و کیوی همسو است [۱۵، ۶].

مزوکارپ می‌تواند کیفیت و بازارپسندی را به خطر بیندازد. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که توان ساطع‌کننده مادون قرمز (IR) اثرات خطی و درجه دوم بسیار معنی‌داری بر ضخامت پوست دارد ($p < 0.0001$) (جدول ۴). در مقابل، اثرات خطی و درجه دوم فاصله ساطع‌کننده و مدت زمان گرمایش و همچنین تمام اثرات متقابل غیرمعنی‌دار بودند ($p > 0.05$). بر اساس ضرایب رگرسیون معنی‌دار (جدول ۴)، مدل پیش‌بینی ساده‌شده برای ضخامت پوست به شرح رابطه (۴) است.

$$\text{Peel thickness} = 0.14 - 0.06X_1 - 0.056X_1^2 \quad (4)$$

که در آن، X_1 ، توان ساطع‌کننده‌ی مادون قرمز (W) است.

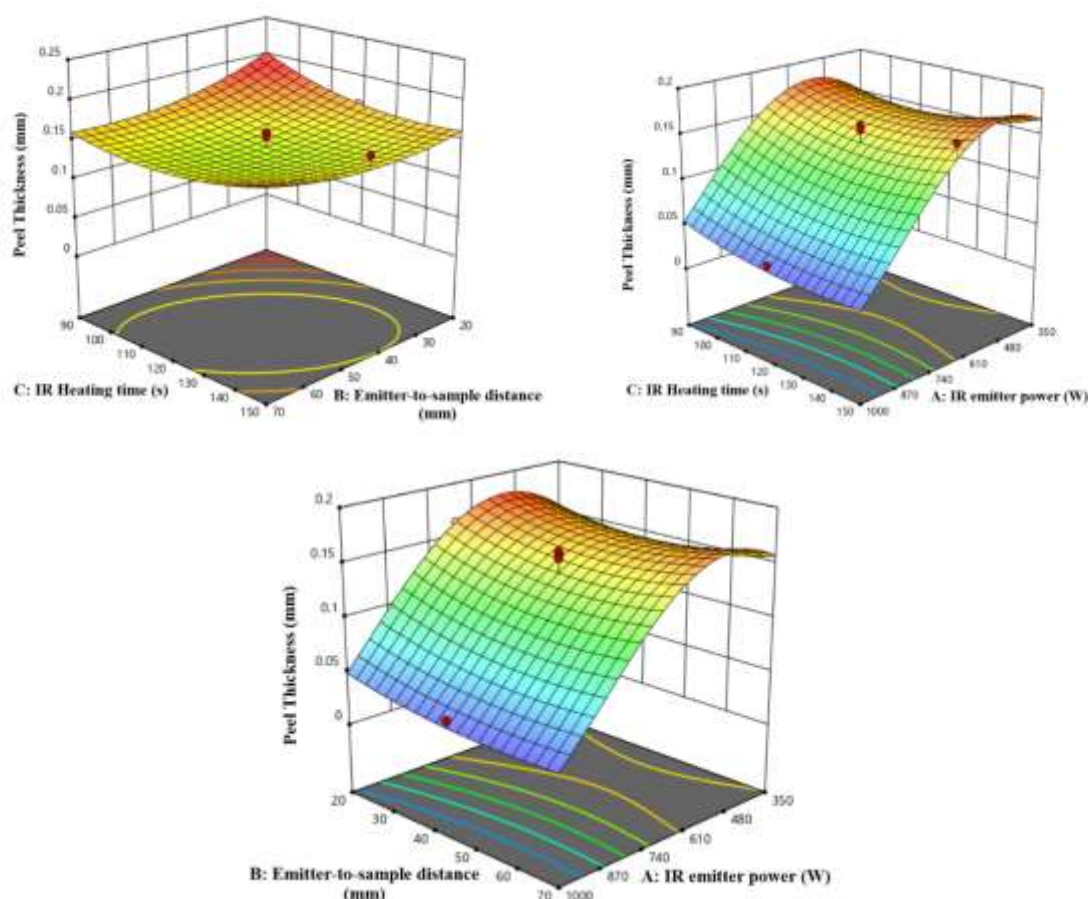


Fig. 3. The effect of infrared peeling operating parameters on peel thickness

فرآوری آلو تأثیر می‌گذارد. ANOVA نشان داد که توان ساطع‌کننده، فاصله، اثر متقابل توان×فاصله و جمله درجه دوم فاصله اثر معنی‌داری بر رطوبت از دست‌رفته دارند (p

۳-۲-۲- رطوبت از دست‌رفته

رطوبت از دست‌رفته، شاخصی کلیدی در عملکرد پوست‌گیری IR است که بر کیفیت، ماندگاری و پایداری

فاصله ۷۰ میلی‌متر مشاهده شد. این روند به افزایش شار انرژی در توان بالاتر و فواصل کوتاه‌تر نسبت داده می‌شود که باعث ایجاد ترک‌ها و شکاف‌های ریز در اپیدرم مومی آلو گردیده و تبخیر رطوبت را تسهیل می‌کند [۴]. اثر متقابل معنی‌دار توان × فاصله، نشان می‌دهد که تأثیر ترکیبی توان و فاصله، میزان رطوبت از دست‌رفته را تشدید می‌کند، زیرا شدت تابش بیشتر در فواصل نزدیک‌تر، افزایش فشار بخار سطحی را تسریع می‌نماید [۱۶]. نفوذ سطحی (۱/۱ - ۱ میلی‌متر) تابش IR با هدف قرار دادن اگزوکارپ، یکپارچگی مزوکارپ را حفظ کرده و کاهش رطوبت را محدود می‌سازد [۴]. این یافته‌ها با مطالعات پوست‌گیری به روش IR برای گوجه‌فرنگی، کیوی، زنجبیل و فندق همسو است [۱۹، ۱۸، ۱۵، ۴].

در حالی که زمان حرارت‌دهی و اثرات متقابل مربوط به آن معنی‌دار نبودند ($p > 0.05$). بر اساس ضرایب رگرسیون معنی‌دار، مدل درجه دوم ساده‌شده برای رطوبت از دست‌رفته در رابطه (۵) ارائه شده است.

$$\text{Moisture loss} = 0.43 + 0.89X_1 - 0.61X_3 - 0.50X_1X_3 + 0.59X_3^2 \quad (5)$$

که در آن، X_1 ، توان ساطع‌کننده مادون قرمز (W)، X_3 فاصله ساطع‌کننده (میلی‌متر) است.

شکل ۴ نشان می‌دهد که افزایش توان IR و کاهش فاصله ساطع‌کننده، رطوبت از دست‌رفته را افزایش می‌دهد. بیشترین مقدار (۳/۱۵ درصد) در توان ۱۰۰۰ وات و فاصله ۲۰ میلی‌متر و کمترین مقدار (۰/۰۵ درصد) در توان ۳۵۰ وات و

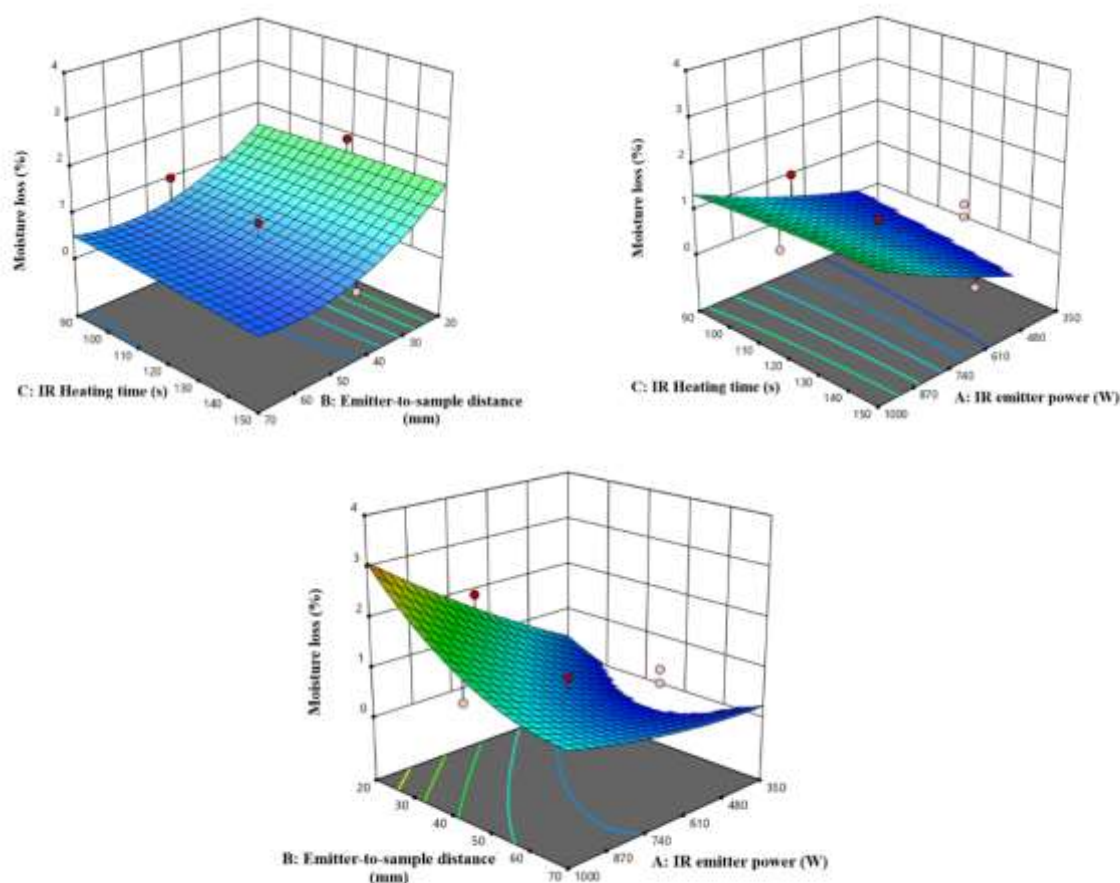


Fig. 4. The effect of infrared peeling operating parameters on moisture loss.

همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، دمای سطح با افزایش توان و زمان گرمایش افزایش می‌یابد. بیشترین دما (۹۰ درجه سلسیوس) در توان ۱۰۰۰ وات، فاصله ۲۰ میلی‌متر و زمان ۱۵۰ ثانیه ثبت شد. تابش IR با طول موج ۶-۲/۵ میکرومتر تنها تا عمق ۱-۰/۱ میلی‌متر نفوذ کرده و با هدف قرار دادن برون‌بر، از گرمایش بیش از حد میان‌بر جلوگیری می‌کند [۱۶، ۶]. این گرمایش کنترل‌شده، برخلاف روش قلیایی (۸۵ درجه سلسیوس)، اسید اسکوربیک را حفظ می‌کند. اثر متقابل معنی‌دار توان و زمان نشان‌دهنده تجمع گرما بوده و با یافته‌های مطالعات هلو، کیوی، انگور و عناب همسو است [۲۱، ۲۰، ۱۵، ۶].

بر اساس جدول ۴، اثرات خطی توان و زمان گرمایش در سطح ۱٪ ($p < 0.01$) و همچنین اثر درجه دوم توان و اثر متقابل توان × زمان در سطح ۵٪ ($p < 0.05$) بر دمای سطح آلو معنی‌دار بودند. مدل درجه دوم ساده‌شده دمای سطح پس از حذف عبارات غیرمعنی‌دار در رابطه (۶) ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \text{Surface temperature} \\ = 39.80 + 13X_1 \\ + 10X_2 + 6.49X_1X_2 \\ + 12X_1^2 \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن X_1 : توان ساطع‌کننده‌ی مادون قرمز (W)، X_2 : مدت زمان گرمایش (ثانیه) است.

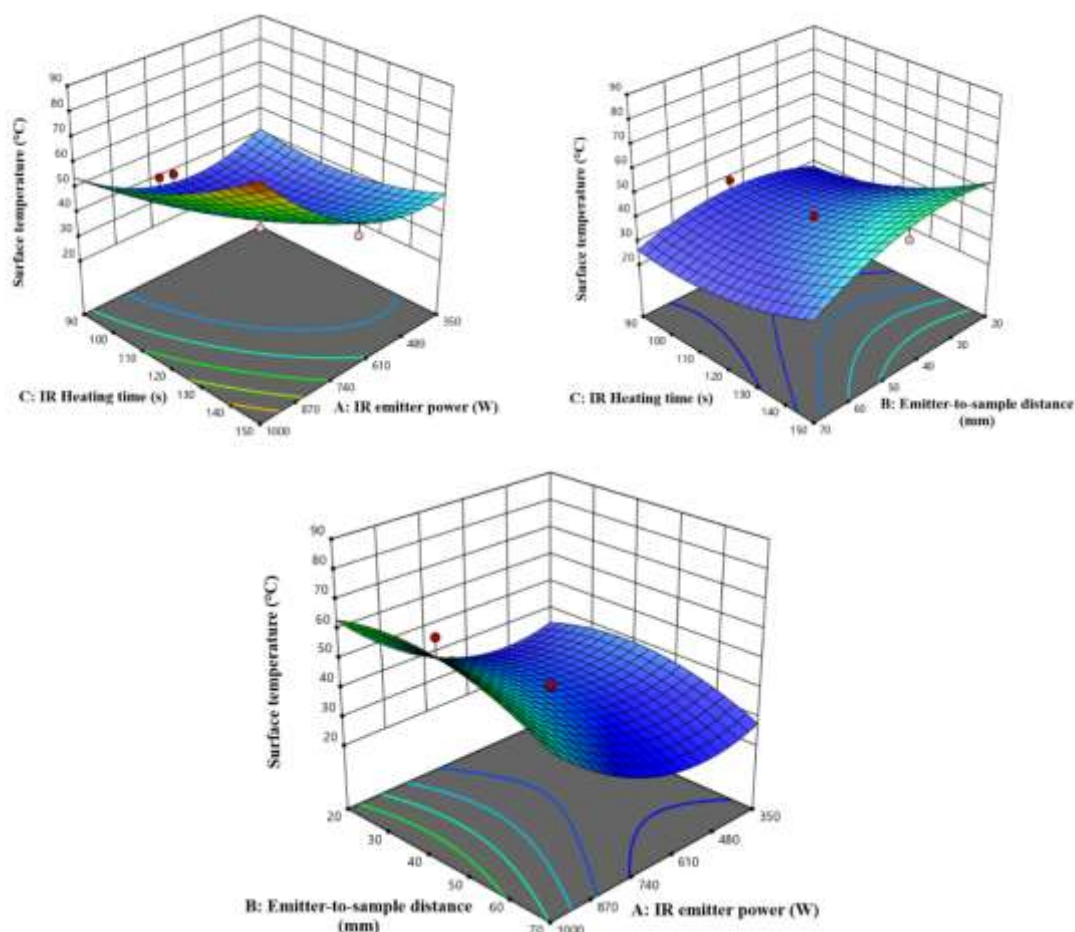


Fig. 5. The effect of infrared peeling operating parameters on surface temperature

بصری محصول می‌باشد. بر اساس جدول ۴، ANOVA اثرات معنی‌داری را بر ΔE نشان داد: اثرات خطی معنی‌دار توان در سطح ۰/۰۱ درصد ($p < 0.0001$)، اثرات درجه دوم

۳-۲-۶- ویژگی رنگی

ویژگی رنگی ΔE شاخصی کلیدی از کیفیت آلو پوست‌گیری شده است که بیانگر تغییرات بافتی و پذیرش

شکل ۶ نشان می‌دهد که ΔE با افزایش توان IR افزایش می‌یابد: از ۹/۷۹ در ۳۵۰ وات (۲۰ میلی‌متر، ۶۰ ثانیه) به ۱۶/۲۷ در ۱۰۰۰ وات (۲۰ میلی‌متر، ۱۵۰ ثانیه) که به قهوه‌ای شدن شدیدتر بافت نسبت داده می‌شود. افزایش فاصله ساطع‌کننده در توان‌های بالا باعث کاهش ΔE می‌شود، در حالی که زمان گرمایش تأثیر ناچیزی دارد. نفوذ سطحی تابش IR (۱/۰-۱ میلی‌متر) با محدود کردن تخریب حرارتی و کاهش واکنش‌های میلارد، پایداری رنگ را حفظ می‌کند [۱۶، ۴]. این یافته‌ها با نتایج پوست‌گیری هلو، کیوی، انگور و عناب همسو است [۲۱، ۲۰، ۱۵، ۶].

توان، زمان و فاصله در سطح ۱٪ ($p < 0.01$) و اثر متقابل توان و فاصله در سطح ۵٪ ($p < 0.05$). سایر اثرات متقابل و همچنین اثرات خطی زمان و فاصله غیرمعنی‌دار بودند ($p > 0.05$). مدل درجه دوم ساده‌شده برای اختلاف رنگی در رابطه (۷) ارائه شده است.

$$\begin{aligned}
 \text{Color difference } \Delta E &= 13.82 + 2.9X_1 \\
 &- 0.38X_1X_3 - 0.80X_1^2 \\
 &- 0.43X_2^2 + 0.41X_3^2
 \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن: X_1 توان ساطع‌کننده مادون قرمز (W)، X_2 مدت زمان گرمایش (ثانیه)، X_3 فاصله ساطع‌کننده (میلی‌متر) است.

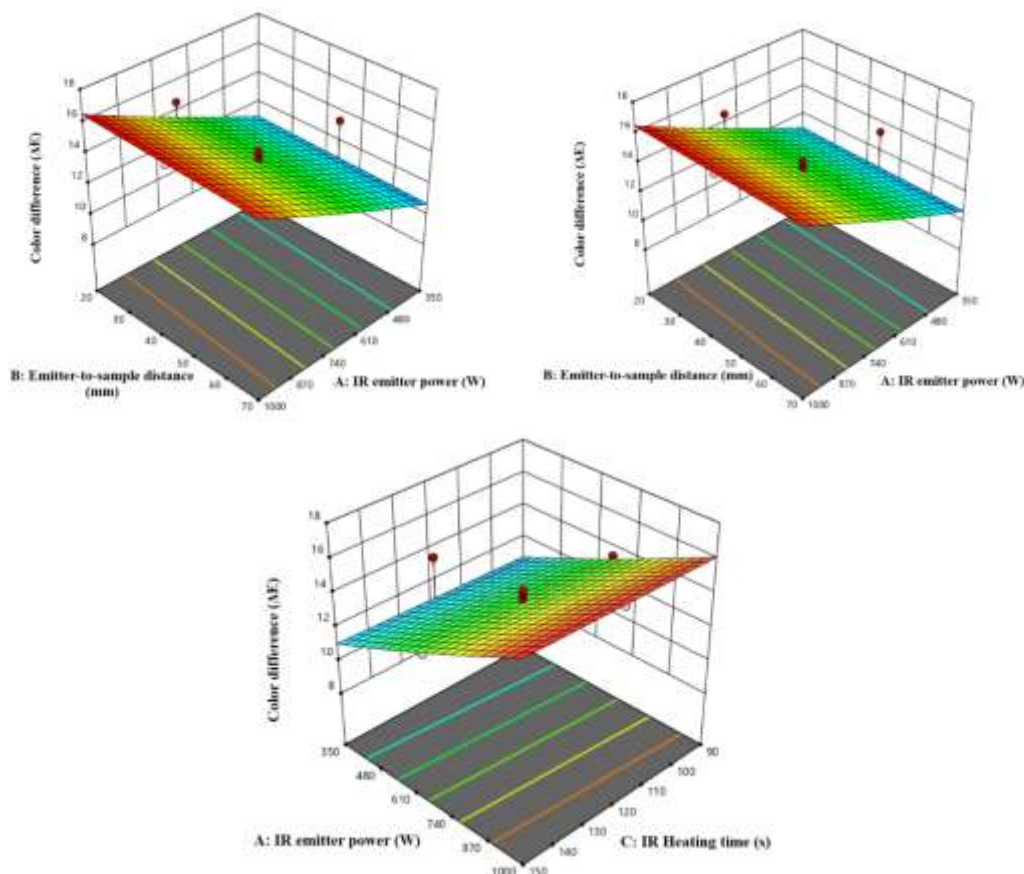


Fig. 6. The effect of infrared peeling operating parameters on color difference

همزمان رطوبت از دست‌رفته، ضخامت پوست، دمای سطح و ΔE انجام شد. بالاترین مطلوبیت (۰/۵۵) در شرایط توان ۷۹۷/۴۶ وات، فاصله ۷۰ میلی‌متر و زمان ۱۰۷ ثانیه حاصل گردید که بیانگر توازن بین شل شدن مؤثر پوست و حداقل آسیب حرارتی به گوشت است [۴]. مطلوبیت نسبتاً پایین

۳-۳- بهینه‌سازی سیستم پوست‌گیری مادون قرمز
 هدف اصلی این مطالعه تعیین شرایط عملیاتی بهینه برای پوست‌گیری خشک آلو با IR با استفاده از RSM بود. بهینه‌سازی با رویکرد تابع مطلوبیت و با هدف حداقل‌سازی

برای مطالعات آتی، استفاده از رویکردهای ترکیبی مانند روش سطح پاسخ - شبکه عصبی مصنوعی (RSM-ANN)، اعمال روش‌های اعتبارسنجی متقاطع (Cross-Validation) و افزایش تعداد نقاط آزمایشی در طراحی مرکب مرکزی پیشنهاد می‌شود. برای اعتبارسنجی، سه آزمایش تکراری در شرایط بهینه انجام شد. جدول ۵ تطابق بالای مقادیر پیش‌بینی‌شده و تجربی را نشان می‌دهد ($R^2 > 0.92$) که بیانگر استحکام و قابلیت اطمینان مدل‌های درجه دوم است.

(۰/۵۵) ناشی از تضاد ذاتی بین پاسخ‌ها است. به عبارت دیگر، شرایط بهینه برای کاهش ضخامت پوست (توان بالا) با شرایط بهینه برای حفظ رنگ و کاهش رطوبت (توان پایین‌تر) همخوانی کامل ندارد. این پدیده در مطالعات مشابه پوست‌گیری گوجه‌فرنگی و هلو نیز گزارش شده است [۶،۴]. با وجود کارایی روش RSM در بهینه‌سازی چندپاسخه، محدودیت مدل‌های درجه دو در برآزش روابط غیرخطی پیچیده و همچنین حجم محدود داده‌های تجربی (۲۰ آزمایش) از عوامل مؤثر بر مطلوبیت حاصله می‌باشند.

Table 5. Predicted versus experimental values of IR peeling performance parameters under optimal condition

Independent variable	Value	Response variable	Predicted	Experimental
IR emitter power (W)	46.797	Moisture loss (%)	0.60	0.30 ± 0.05
Irradiation duration (s)	107	Peel thickness (mm)	0.16	0.12 ± 0.01
Emitter distance to sample (mm)	70	Surface temp. (°C)	35.53	40 ± 1
		Color difference (ΔE)	14.97	13.50 ± 0.5

غوطه‌وری طولانی‌تر در محلول قلیایی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (جدول ۶). برعکس، زاویه هیو با غوطه‌وری طولانی‌تر کاهش یافت که نشان‌دهنده تغییر رنگ به سمت قرمز است. این تغییر رنگ احتمالاً به دلیل اثرات ترکیبی انتشار جرم و واکنش‌های بیوشیمیایی پیچیده، از جمله فرآیندهای قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی مانند واکنش میلارد و کاراملی شدن است که توسط دمای بالا و محیط قلیایی تسریع می‌شوند.

۳-۴- تأثیر روش قلیایی بر عملکرد و کیفیت آلو

جدول ۶ اثرات پوست‌گیری با قلیایی با استفاده از محلول ۱۰ درصد وزنی / حجمی NaOH (۱۰۰ گرم در لیتر) در دمای ۸۵ درجه سلسیوس بر عملکرد و ویژگی‌های کیفی آلو را نشان می‌دهد. تأثیر زمان غوطه‌وری با استفاده از آنالیز واریانس یک‌طرفه ($p < 0.05$) تجزیه و تحلیل شد و تفاوت‌های معنی‌داری را در پارامترهای کلیدی نشان داد. نتایج نشان می‌دهد که از دست دادن رطوبت با زمان

Table 6. Analysis of variance (ANOVA) results for lye peeling performance parameters

Source of variations	degrees of freedom (df)	Mean squares	
		Moisture loss	Hue angle
Immersion time	2	52.13*	3121.28**
Error	6	0.39	0.51
Coefficient of variation (%)	-	6.71	1.65

پوست‌گیری دشوار بود، اما در ۱۰۰ و ۱۲۰ ثانیه به طور قابل توجهی آسان‌تر شد. با این حال، غوطه‌وری ۱۲۰ ثانیه باعث تغییر رنگ قابل توجه (قهوه‌ای شدن و قرمزی سطح) گردید

شکل ۷ تفاوت بصری آلوهای پوست‌گیری شده با قلیای داغ را در زمان‌های مختلف غوطه‌وری نشان می‌دهد. در ۷۰ ثانیه،

که با کاهش شدید زاویه هیو در جدول ۷ تأیید می‌شود. این پدیده به دمای بالای محلول قلیایی نسبت داده می‌شود که باعث تنش حرارتی در مزوکارپ، تجزیه اسید اسکوربیک و تسریع واکنش‌های قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی (میلارد و کاراملیزاسیون) می‌گردد. این یافته‌ها با مطالعات پوست‌گیری قلیایی کیوی، گوجه‌فرنگی و عناب همسو است [۲۲، ۲۱، ۱۰].

Table 7. Impact of immerse on time in hot lye on plum peeling performance metrics

Immersion time (s)	Moisture loss(%)	Hue angle (degree)
70	16.5 ± 0.44 c	81.79 ± 0.50 a
100	9.56 ± 0.35 b	55.50 ± 0.51 b
120	13.5 ± 0.29 a	23.46 ± 0.01 c



Fig. 7. Peeled plums after hot lye treatment at immersion times of 70 s, 100 s, and 120 s, illustrating changes in peelability and browning.

شرایط بهینه پوست‌گیری قلیایی آلو شامل محلول ۱۰ درصد NaOH، دمای ۸۵ درجه سلسیوس و زمان غوطه‌وری ۱۰۰ ثانیه تعیین شد. جدول ۸ عملکرد و خواص فیزیکوشیمیایی آلو را در این شرایط خلاصه می‌کند. اگرچه این روش باعث پوست‌گیری کامل (۱۰۰ درصد) به دلیل هیدرولیز شیمیایی چسبندگی پوست-گوشت می‌شود، اما با معایب کیفی قابل توجهی همراه است: افزایش رطوبت از دست‌رفته (۹/۵۶٪)، حذف پوست ضخیم‌تر (ناشی از هیدرولیز بافت)، رنگ تیره‌تر (زاویه هیو ۵۵/۵ درجه) و کاهش میزان اسید اسکوربیک (۱۰/۵ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم).

Table 8. Peeling performance and physicochemical properties of plums under selected hot lye peeling conditions

Peeling performance	Value	Physicochemical characteristics	Value
Moisture loss (%)	9.56	Hue angle (Degree)	55.50
Peel thickness (mm)	0.14	Ascorbic acid content (mg/100 g)	10.50

معنی‌داری در ضخامت پوست بین دو روش مشاهده نشد (به ترتیب 0.12 ± 0.01 و 0.14 ± 0.02 میلی‌متر). با این حال، پوست حاصل از روش IR یکنواخت و دست‌نخورده بود، در حالی که روش قلیایی منجر به پوست تخریب‌شده و ناهموار گردید که برای تولید محصولات جانبی مانند لواشک میوه مناسب‌تر است [۲۳]. همچنین شکل ۸ تفاوت‌های معنی‌داری ($p < 0.01$) را در دمای سطح، رطوبت از

۳-۵- مقایسه پوست‌گیری خشک با مادون‌قرمز و روش قلیایی

عملکرد روش بهینه IR ($797/46$ وات، 70 میلی‌متر، 107 ثانیه) با روش قلیایی مرسوم ($10\% \text{ NaOH}$ ، 85°C ، 100 ثانیه) مقایسه شد. پارامترهای کلیدی با آنالیز واریانس یک‌طرفه و آزمون دانکن ($p < 0.05$) ارزیابی گردیدند. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، هیچ تفاوت

[۲۵] همسو است. روش IR با حذف فاضلاب شور-قلیایی، مطابق با اصول اقتصاد چرخشی است [۹]. همچنین در مقایسه با پوست‌گیری با بخار (که ۱۵-۲۰٪ از دست دادن مواد مغذی در هلو گزارش شده [۶])، روش IR تخریب آنتوسیانین کمتری ($\Delta E = 13/5$ در مقابل ۱۶/۲) و حفظ اسید اسکوربیک بالاتری نشان داد که اثربخشی آن را برای میوه‌های حساس به حرارت مانند آلو تأیید می‌کند.

دست‌رفته و اسید اسکوربیک بین دو روش وجود داشت. روش IR نسبت به روش قلیایی دمای سطح پایین‌تری (1 ± 40 در مقابل 85 ± 2 درجه سلسیوس)، رطوبت از دست‌رفته کمتر (0.30 ± 0.05 ٪ در مقابل 0.956 ± 0.08 ٪) و حفظ اسید اسکوربیک بالاتری (14.0 ± 0.5 در مقابل 10.0 ± 0.4 میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم) داشت. این یافته‌ها با مطالعات قبلی در مورد گوجه‌فرنگی [۲۴] و خشک‌کردن آلو

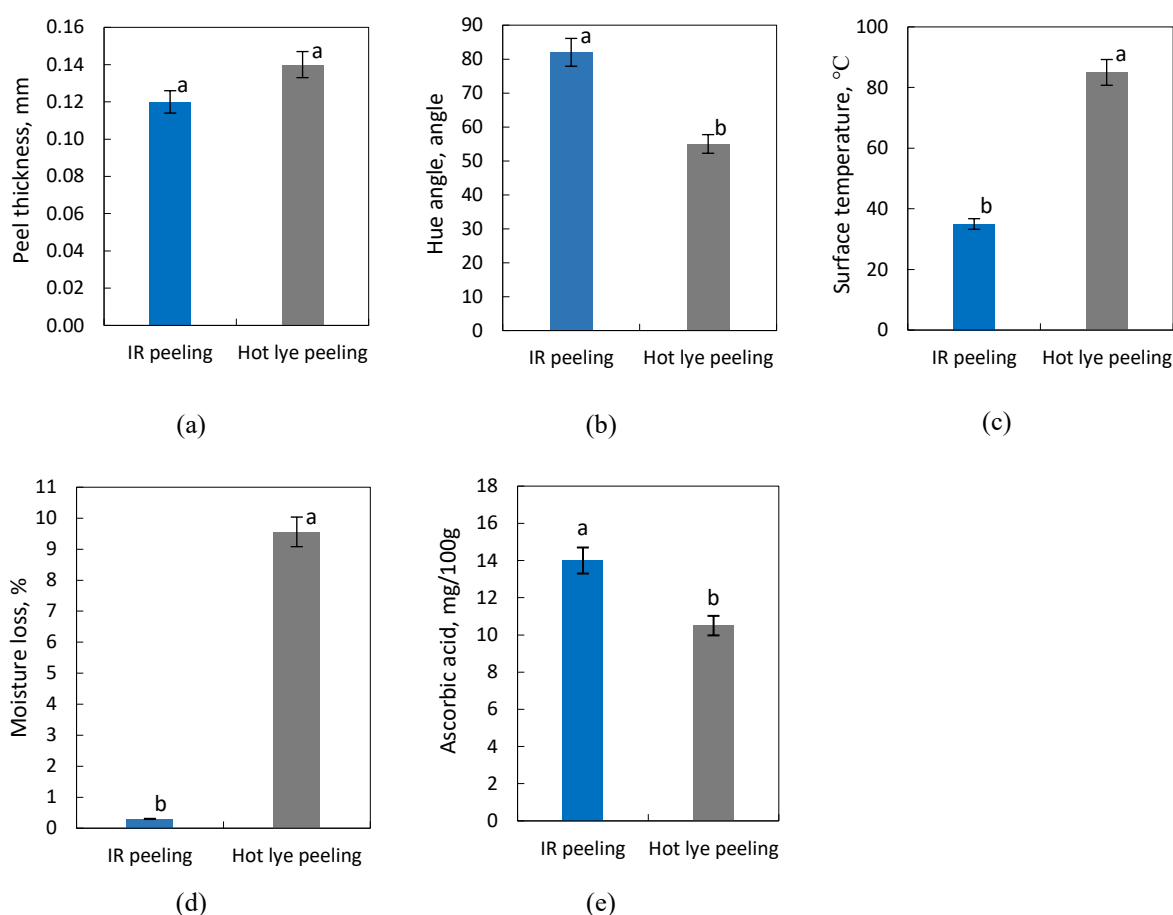


Fig. 8. Comparison of peeling performance parameters between dry-IR and lye methods: (a) Peel thickness, (b) Hue angle, (c) Surface temperature, (d) Moisture loss, (e) Ascorbic acid content.

سلسیوس دمای سطح، و $\Delta E = 13/50$ گردید ($R^2 > 0.92$). در مقایسه با روش قلیایی (۱۰٪ NaOH، 85°C ، ۱۰۰ ثانیه)، روش IR عملکرد بهتری در شاخص‌های کلیدی داشت: کاهش رطوبت کمتر (0.30 ٪ در مقابل 0.956 ٪)، دمای سطح پایین‌تر (40 در مقابل 85 درجه سلسیوس) و حفظ اسید اسکوربیک بالاتر (۱۴ درصد در مقابل $10/5$ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم). همچنین روش IR با حذف فاضلاب شیمیایی،

۴-نتیجه‌گیری

این مطالعه امکان‌سنجی پوست‌گیری خشک با مادون‌قرمز (IR) را به عنوان جایگزینی پایدار برای روش قلیایی در فرآوری آلو تأیید کرد. شرایط بهینه با روش RSM شامل توان ساطع‌کننده مادون‌قرمز $797/46$ وات، فاصله 70 میلی‌متر از میوه و زمان حرارت‌دهی 107 ثانیه بود، که منجر به 0.30 ٪ تلفات رطوبت، $0/12$ میلی‌متر ضخامت پوست، 40 درجه

بیانیه تأمین مالی

ین پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خاصی از نهادهای دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

داریوش شاطرآبادی: نگارش نسخه اولیه، نرم‌افزار، تحلیل داده‌ها؛ علی‌ماشاءالله کرمانی: نگارش، بازبینی و ویرایش، ایده‌سازی، استاد راهنما، روش‌شناسی، تحلیل داده‌ها، مدیر پروژه، روش‌شناسی؛ حجت‌الله اکبری: روش‌شناسی، تحلیل داده‌ها، نرم‌افزار.

۵-منابع

- [۱] Akbari, H. (2022). Investigation of peeling of stewed plums using infrared heating. Master of Science Thesis in Biosystem mechanical Engineering, Department of Agrotechnology, College of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran.
- [۲] Kohli, D. Champawat, P. S. Mudgal, V. D. Jain, S. K., & Tiwari, B. K. (2021). Advances in peeling techniques for fresh produce. *Journal of Food Process Engineering*, 44(10): e13826.
- [۳] Hedayatzadeh, M., & Chaji, H. (2016). A review on plum drying. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56: 362-367.
- [۴] Pan, Z., Li, X., Bingol, McHugh, G. T. H., & Atungulu, G. G. (2009). Development of infrared radiation heating method for sustainable tomato peeling. *Applied Engineering Agriculture*, 25(6): 935-941.
- [۵] Pan, Z., Li, X., Khir, R., El-Mashad, H. M., Atungulu, G. G., McHugh, T. H., et al. (2015). A pilot scale electrical infrared dry-peeling system for tomatoes: Design and performance evaluation. *Biosystems Engineering*, 137, 1-8.
- [۶] Li, X., Zhang, A., Atungulu, G., Delwiche, M., Milczarek, R., Wood, D., & Pan, Z. (2014). Effects of infrared radiation heating on peeling performance and quality attributes of clingstone peaches. *LWT - Food Science and Technology*, 55(1) 34-42.
- [۷] Wu, B., Ma, Y., Guo, Y., Zielinska, M., Gao, K., Song, C., Bouhile, Y., Qiu, C., Pan, Z., & Ma, H.

اثرات زیست‌محیطی را به حداقل رساند. برای کاربرد صنعتی، مطالعات آتی باید بر بهینه‌سازی آرایه ساطع‌کننده، افزایش بهره‌وری انرژی و ارزیابی هزینه‌های سرمایه‌ای و نگهداری سیستم متمرکز شوند. به طور کلی، فناوری مادون قرمز IR به عنوان راه‌حلی سبز و مؤثر برای فرآوری میوه، همسو با روندهای جهانی تولید مواد غذایی بدون مواد شیمیایی، معرفی می‌گردد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش از طریق درخواست از نگارندگان در دسترس است. تمام داده‌های مورد استفاده در این پژوهش در سراسر متن و در جدول‌ها و شکل‌ها ارائه شده‌اند.

تضاد منافع

هیچ موردی برای اعلام وجود ندارد.

- (2024). Research progress in the application of catalytic infrared technology in fruit and vegetable processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23, e13291.
- [۸] Niu, X. X., Deng, L. Z., Wang, H., Wang, Q. H., Xu, M. Q., Li, S. B., ... & Xiao, H. W. (2024). Transformation of cell wall pectin profile during postharvest ripening process alters drying behavior and regulates the sugar content of dried plums. *Food Chemistry*, 458, 140093.
- [۹] Eslami, E., Landi, G., Benedetti, M., & Pataro, G. (2024). Economic and Environmental Impact Analysis of Innovative Peeling Methods in the Tomato Processing Industry. *Sustainability*, 16(24): 11272.
- [۱۰] Garcia, E., & Barrett, D. M. (2006). Peelability and yield of processing tomatoes by steam or lye. *Journal of Food Processing Preservation*, 30(1): 3-14.
- [۱۱] AOAC. (2005). Official methods of analysis (17th ed.). Arlington, VA: Association of Official Analytical Chemists.
- [۱۲] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons.
- [۱۳] Li, X., & Pan, Z. (2014). Dry peeling of tomato by infrared radiative heating: Part II. Model validation and sensitivity analysis. *Food Bioprocessing Technology*, 7(7): 2005-2013.

- [۱۴] Shen, Y., Khir, R., Wood, D., McHugh, T. H., & Pan, Z. (2020). Pear peeling using infrared radiation heating technology. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 65: 102474.
- [۱۵] Mohammadi, Z., Kashaninejad, M., Ziaifar, A. M., & Ghorbani, M. (2019). Peeling of kiwifruit using infrared heating technology: A feasibility and optimization study. *LWT-Food Science and Technology*, 99: 128-137.
- [۱۶] Zhao, S., Wang, S., Ding, H., Guo, Z., Simelane, M. B. C., Liu, Q., et al. (2023). Heat transfer modelling for novel infrared peeling of potato. *Journal of Food Engineering*, 357: 111631.
- [۱۷] Li, X., & Pan, Z. (2014). Dry-peeling of tomato by infrared radiative heating: part I. Model development. *Food Bioprocess Technology*, 7(7): 1996-2004.
- [۱۸] Kate, A. E., & Sutar, P. P. (2018). Development and optimization of novel infrared dry peeling method for ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) rhizome. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 48: 111-121.
- [۱۹] 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-Food Science and Technology*, 90: 570-576.
- [۲۰] Zhang, Y., Suo, K., Feng, Y., Yang, Z., Zhu, Y., Wang, J., & et al. (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.
- [۲۱] Wang, B., Venkitasamy, C., Zhang, F., Zhao, L., Khir, R., & Pan, Z. (2016). Feasibility of jujube peeling using novel infrared radiation heating technology. *LWT-Food Science and Technology*, 69: 458-467.
- [۲۲] Guldass, M. (2003). Peeling and the physical and chemical properties of kiwi fruit. *Journal of Food Processing and Preservation*, 27(4): 271-284.
- [۲۳] Garcia, E., & Barrett, D. M. (2006). Evaluation of processing tomatoes from two consecutive growing seasons: quality attributes, peelability and yield. *Journal of Food Processing and Preservation*, 30(1): 20-36.
- [۲۴] Ayub, H., Nadeem, M., Mohsin, M., Ambreen, S., Khan, F. att, Oranab, S., ... Ullah, S. (2023). A comprehensive review on the availability of bioactive compounds, phytochemicals, and antioxidant potential of plum (*Prunus Domestica*). *International Journal Food Production*, 26(1): 2388-2406.
- [۲۵] Li, X., Pan, Z., Atungulu, G. G., Zheng, X., Wood, D., Delwiche, M., & McHugh, T. H. (2014). Peeling of tomatoes using novel infrared radiation heating technology. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 21, 123-130.
- [25] Doymaz, İ. (2004). Effect of dipping treatment on air drying of plums. *Journal of Food Engineering*, 64(4): 465-470.



Scientific Research

Optimization of dry-peeling method for plums using infrared radiation heating with response surface methodology and evaluation of physicochemical characteristics in compare of lye peeling method

Dariush Shaterabadi¹, Ali Mashaallah Kermani², Hojatollah Akbari³

1- Ph. D. Student of Biosystem mechanical Engineering, Department of Agrotechnology, College of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran

2*- Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran

3- Graduated Student of Biosystem mechanical Engineering, Department of Agrotechnology, College of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2026/03/10

Review: 2026/05/23

Accepted: 2026/05/25

Keywords:

Plum,

Dry peeling,

Infrared heating,

Physicochemical characteristics,

Response surface methodology,

Optimization,

Lye peeling

DOI: 10.48311/fsct.2026.119647.83085

*Corresponding Author E-

amkermani@ut.ac.ir

Peeling is a key stage from post-harvest processing for plum fruit, which traditional methods (using lye solution) meets to some challenges such as a high peeling loss, low efficiency of process, high consumption of water and energy, chemical waste water production that finally led to reduction of product quality. This study investigates the feasibility and optimization of dry-peeling for plums using infrared radiation heating as a sustainable alternative to conventional lye peeling. A laboratory-scale system including a ceramic IR emitter and the rotating fruit rollers for plum processing was designed. The effects of IR emitter power (350-1000 W), heating time (90-150 s), and emitter distance (20-70 mm) on physicochemical properties and peeling performance (moisture loss, peel thickness, surface temperature, color properties, and Ascorbic acid) were evaluated using Response Surface Methodology (RSM). The results showed that optimal conditions (797.48 W, 70 mm, 107 s) achieved 0.30% moisture loss, 0.12 mm peel thickness, 40°C surface temperature, 13.5 ΔE color change, and 14 mg/100 g ascorbic acid retention. In compare with conventional lye peeling method (10% NaOH, 85°C, 100 s), IR peeling significantly reduced moisture loss (0.30% vs. 9.56%), preserved bright yellow hue (Hue angle 82 vs. 55°), and enhanced ascorbic acid retention (14 vs. 10.5 mg/100 g), while eliminating chemical wastewater. These findings proved the high potential of infrared radiation heating as a green method, effective with high quality for plum processing.