مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی_پژوهشی

اثر تیمار ملاتونین بر قهوه‌ای شدن آنزیمی، کیفیت تغذیه‌ای و ماندگاری میوه سیب تازه-برش

بیوک‌آقا فرمانی*[1] و مرتضی سلیمانی اقدم[2]

[1]دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی اهر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

[2]دانشیار گروه مهندسی علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

کلمات کلیدی:

تیمار ملاتونین،

شاخص قهوه‌ای شدن،

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی،

میوه سیب تازه-برش

DOI: 10.48311/fsct.2026.84022.0

* مسئول مکاتبات:

bfarmani@tabrizu.ac.ir

چکیده

تاثیر تیمار ملاتونین بر کیفیت تغذیه‌ای و قهوه‌ای‌شدن آنزیمی میوه سیب تاره-برش بررسی شد. در مرحله اول، برش‌های سیب تازه-برش در ملاتونین با غلظت‌های ۰، ۱، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ µM برای ۵ min تیمار شدند. با بررسی شاخص قهوه‌ای‌شدن در نمونه‌های نگهداری در یخچال (۴ °C) طی ۷ روز، غلظت ۱۰ µM ملاتونین با کمترین شاخص قهوه-ای‌شدن (۵۰/۷۷) برای ادامه آزمایشات انتخاب شد. در مرحله دوم، سیب‌های تازه-برش با ۱۰ µM ملاتونین تیمار شدند تا طی ۷ روز نگهداری در ۴ °C، خصوصیات کیفی نمونه‌های تیماری در مقایسه با شاهد ($P < ۰/۰۵$) نشان داد تیمار نمونه‌ها به‌طور معنی‌دار باعث کاهش محتوای مالوندی‌آلدئید از روز صفر (۱/۴ µmol kg^{-1} FW) به روز ۷ام (۱/۳ µmol kg^{-1} FW) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) از روز صفر (۳۷ mmol kg^{-1} FW) به روز ۷ام (۳۱ mmol kg^{-1} FW) کاهش یافت. این تیمار طی دوره نگهداری، روند افزایشی در محتوای فنول کل از روز صفر (۴۷۵ mg GAE kg^{-1} FW) به روز ۷ام (۵۲۵ mg GAE kg^{-1} FW)، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی از روز صفر (۴۷٪) تا روز ۷ام (۶۴٪) و مهار کاهش آسکوربیک اسید در نمونه‌ها را باعث شده بود. بعلاوه، تیمار ملاتونین باعث افزایش فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین آمونیالیاز از روز صفر (۲۳ U g^{-1} FW) تا روز ۷ام (۳۱ U g^{-1} FW) و کاهش فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز از روز صفر (۲۱ U g^{-1} FW) تا روز ۷ام (۳ U g^{-1} FW) طی نگهداری داشت ($P < ۰/۰۵$).

۱-مقدمه

سیب گرانی اسمیت (*Malus domestica* L.)، به خاطر ارزش تغذیه‌ای و خواص حسی، میوه محبوب بین مصرف‌کنندگان است. اخیرا، سیب تازه-برش به دلیل راحتی مصرف، مغذی و تازه‌گی، رشد سریع را در دسته‌بندی مواد غذایی مهم شامل شده است [۱]. آسیب‌های مکانیکی از طریق تهیه میوه‌های تازه-برش باعث یک سری تغییرات بیولوژیکی و شیمیایی مانند قهوه‌ای شدن، بدطعمی، پیری، نرم‌شدگی و فساد را موجب شده و در نهایت بر ماندگاری کوتاه‌تر منجر می‌گردد. بنابراین، توسعه کیفیت و طولانی کردن ماندگاری از تکنولوژی‌های کلیدی برای فرآوری میوه‌های تازه-برش می‌باشد [۲]. قهوه‌ای شدن سطح، علت اصلی فساد میوه‌های تازه-برش طی جابجایی پس از برداشت می‌باشد، مخصوصا در میوه سیب که غنی از ترکیبات پلی‌فنولی و حساس به قهوه‌ای شدن آنزیمی است. آزمایشات زیادی برای نگهداری میوه سیب در مقابل قهوه‌ای شدن آنزیمی مانند پیش‌تیمار نیمه حرارتی، کنترل اتمسفر، اصلاح اتمسفر داخل بسته، پوشش باصمغ گزانتان-سینامیک اسید و کیتوزان-عصاره روزماری انجام شده است [۳]. با این وجود، برخی از این تیمارها قابل‌کاربرد به‌صورت تجاری نبوده و توسعه یک تکنیک موثر جهت کنترل قهوه‌ای شدن و بهبود کیفیت تغذیه‌ای میوه تازه-برش ضروری می‌باشد. ملاتونین یا ان-استیل-۵-متوکسی‌ترپتامین از هورمون‌های کشف‌شده در انواع مختلف میوه‌ها و سبزی‌های مانند سیب، گیلاس، انگور، گلابی، گوجه‌فرنگی و غیره هستند [٤].

ملاتونین می‌تواند از ساختار سلول حفاظت، آسیب رسیدن به DNA جلوگیری، با حذف رادیکال‌های آزاد سطح پراکسید را کاهش و در نتیجه باعث افزایش مقاومت به اکسیداسیون و کاهش پراکسیداسیون لیپید را موجب گردد [۵]. همچنین گزارش شده ملاتونین، قهوه‌ای شدن بافت گیاهی را مهار و به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان موثر در جلوگیری از اکسیداسیون ترکیبات فنولی پیشنهاد شده است [٦]. مطالعات در سال‌های اخیر نشان داده است تیمار ملاتونین می‌تواند رسیدگی میوه گوجه‌فرنگی را رواج داده و کیفیت ذخیره‌سازی آن را توسعه دهد [۷]. ملاتونین آسیب سرمایی در میوه هلو را از طریق کاهش محتوای اسید چرب و متابولیسم ترکیبات فنولی کاهش داده و از تخریب فیزیولوژیکی محصول جلوگیری می‌کند [۸].

مطالعات زیادی در میوه‌های مختلف تازه-برش برای افزایش ماندگاری انجام شده است، اما بررسی در مورد اثرات ملاتونین برون‌زا بر قهوه‌ای شدن آنزیمی و کیفیت تغذیه‌ای میوه سیب تازه-برش محدود است. بنابراین، پژوهش موجود به انتخاب غلظت مناسب ملاتونین جهت بررسی اثرات آن بر قهوه‌ای شدن آنزیمی، محتوای ترکیبات فنولی و آسکوربیک اسید، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و فعالیت آنزیم‌های PAL و PPO در میوه سیب تازه-برش طی ذخیره‌سازی در دمای یخچال است.

۲-مواد و روش‌ها

تیمار برش‌های سیب: سیب‌های گرانی اسمیت با اندازه، رنگ، شکل تقریبا یکنواخت و بدون آسیب از بازار محلی خرید و فورا به آزمایشگاه منتقل شدند. سیب‌ها با $\mu L\ L^{-1}$ ۲۰۰ محلول هیپوکلرید سدیم (NaClO) برای ۲ min ضدعفونی و سپس با آب مقطر ۳ بار آبکشی و در دما اتاق خشک شدند. همچنین همه ابزارهای مورد استفاده برای جلوگیری از آلودگی‌های بعدی با محلول هیپوکلرید سدیم ضدعفونی شدند. سیب‌ها پوست‌گیری شده و بعد از حذف قسمت مرکزی، هر سیب را به ۱۲ برش یکسان بریده در ۱۵ گروه ۱۲ تای دسته‌بندی گردیدند. برش‌های تازه فورا در غلظت‌های مختلف محلول ملاتونین (۰، ۱، ۱۰، ۱۰۰ و µM ۱۰۰۰) برای ۵ min (در ۳ تکرار) تیمار شدند. سیب‌های تازه-برش تیمار شده در کیسه‌های پلاستیکی پلی‌اتیلنی بسته‌بندی و در دما ٤ °C با رطوبت نسبی ۹۵٪ ذخیره شدند تا آزمایشات لازم طی روزهای ۰، ۲، ۳، ٤، ۵، ٦ و ۷ انجام گیرد. برای سایر آزمایشات، نمونه‌ها با نیتروژن مایع منجمد و در دمای ۸۰- °C نگهداری شدند.

اندازه‌گیری شاخص قهوه‌ای شدن: تغییرات رنگ سطح سیب‌های تازه-برش با روش آنالیز تصویر انجام شد [۹]. برای این کار با استفاده از دستگاه هانترلب شبیه‌سازی شده

از برش‌های سیب با دوربین دیجتالی عکس گرفته و در نرم‌افزار فتوشاپ مقادیر شاخص‌های رنگ (L^*, a^*, b^*) استخراج و در ادامه، شاخص و درصد قهوه‌ای شدن با استفاده از معادلات زیر محاسبه شد. شاخص استاندارد در آزمایشات رنگ سولفات باریم پودری بود.

$$BI = \frac{(X-0.31)}{0.172} \times 100$$

(۱

$$X = \frac{a* + 1.75 \times L*}{5.645 \times L* + a* - 3.012 \times b*}$$

$$\%\ BI\ increase = \frac{(BIx-BI0)}{BI0} \times 100$$

(۲

اندازه‌گیری مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن

۱) محتوای مالون‌دی‌آلدئید (MDA) با روش سون و همکاران (۲۰۱۱) اندازه‌گیری شد [۱۰]. برای شروع، ۰/۱ g سیب تازه‌برش در ۱ mL تری‌کلرواستیک اسید سرد (۱ g در لیتر) هموژن شده و برای ۱۰ min در ۴ °C سانتریفیوژ (۱۲۰۰۰ rpm) گردید. در ادامه، ۰/۶ mL عصاره با ۱ mL تیوباربیتوریک اسید (۶/۷ g L^{-1}) مخلوط و برای ۲۰ min در ۹۵ °C واکنش انجام و به طور سریع در یخ سرد گردید، سپس برای ۱۰ min در ۴ °C سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ rpm) شد. مقدار جذب به ترتیب در ۴۵۰، ۵۳۲ و ۶۰۰ nm قرائت و از فرمول زیر برای محاسبه MDA استفاده شد و نتیجه به‌صورت واحد μmol kg^{-1} FW[1] بیان گردید.

$$MDA\ (\mu mol\ g^{-1}) = 6.45 \times (A_{532}-A_{600}) - 0.56 \times A_{450} \quad (۳$$

۲) محتوای پراکسیدهیدروژن (H_2O_2) مطابق با روش لیو و همکاران (۲۰۱۸) اندازه‌گیری شد [۱۱]. برای شروع، ۰/۹ mL تری‌کلرواستیک اسید ۱٪ سرد روی ۰/۱ g سیب تازه‌برش منجمد افزوده و ۱۰ min بعد از مخلوط برای ۱۵ min در ۴ °C سانتریفیوژ (۱۲۰۰۰ rpm) شد. سپس ۱ mL یدید پتاسیم (۱ mol L^{-1}) و ۱ mL بافر فسفات پتاسیم (۱۰ mM، pH ۷) به داخل ۰/۶ mL فاز بالایی اضافه و همگن شدند. جذب در ۳۹۰ nm با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید. محتوای H_2O_2 بر پایه منحنی استاندارد H_2O_2 محاسبه و نتیجه به‌صورت واحد mmol kg^{-1} FW بیان شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های فنیل‌آلانین آمونیالیاز و پلی‌فنول اکسیداز

۱) فعالیت آنزیم‌های فنیل‌آلانین آمونیالیاز (PAL) و پلی‌فنول اکسیداز (PPO) مطابق با روش گاأ و همکاران (۲۰۱۷) ارزیابی شد [۱۲]. برای فعالیت آنزیم PAL، ۰/۱ g سیب تازه‌برش با ۰/۹ mL بافر بورات ۰/۲ M (pH ۸/۸) مخلوط برای ۱۰ min در ۴ °C سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ rpm) شد. در ادامه، ۰/۲ mL از فاز بالایی با ۱/۲۸ mL بافر بورات و ۰/۴ mL ال‌-فنیل‌آلانین ۵۰ mM مخلوط و برای ۳۰ min در ۳۰ °C اینکوبه شدند. سپس ۸۰ μL هیدروکلریک اسید ۶ M برای توقف واکنش افزوده، جذب در ۲۹۰ nm اندازه‌گیری و نتیجه با واحد U g^{-1} FW (U = 0.1 Δ290 nm min^{-1}) بیان گردید.

۲) برای فعالیت آنزیم PPO، ۰/۲ g سیب تازه‌برش با ۱ mL بافر فسفات ۰/۱ M (pH ۶/۵) مخلوط برای ۱۰ min در ۴ °C سانتریفیوژ (۸۰۰۰ rpm) شد. در ادامه، ۰/۲ mL فاز بالایی با ۰/۶ mL بافر فسفات و ۰/۲ mL کاتچول ۰/۲ M مخلوط شده و در ابتدا برای ۱۰ min در ۳۷ °C و سپس برای ۵ min در ۹۵ °C اینکوبه شدند. سپس ۸۰ μL هیدروکلریک اسید ۶ M برای توقف واکنش افزوده، جذب در ۴۲۰ nm اندازه‌گیری و نتیجه با واحد U g^{-1} FW (U = 0.1 Δ420 nm min^{-1}) بیان گردید [۱۲].

اندازه‌گیری محتوای فنول کل: محتوای فنول کل برش‌های سیب با روش فولین‌-سیوکالتو ارزیابی شد [۱۲]. بعد از استخراج و تهیه عصاره از سیب تازه‌برش و افزودن محلول‌های شیمیایی مورد نظر، مقدار جذب نمونه‌ها در nm

1-Fresh Weight

۷۵۰ با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری و فنول کل به‌صورت FW $mg\ GAE\ kg^{-1}$ بیان گردید.

اندازه‌گیری محتوای آسکوربیک اسید: محتوای آسکوربیک اسید عصاره‌های استخراجی از نمونه‌های سیب تازه–برش با روش تیتراسیون اکسیداسیون–احیا با استفاده از محلول ید اندازه‌گیری شد. از طریق منحنی استاندارد یدات پتاسیم–آسکوربیک اسید، مقدار آسکوربیک اسید به‌صورت $mg\ kg^{-1}$ FW محاسبه شد [۱۳].

اندازه‌گیری ظرفیت آنتی‌اکسیدانی: ظرفیت آنتی‌اکسیدانی با روش حذف رادیکال‌های آزاد DPPH اندازه‌گیری شد [۱٤]. مقدار جذب نمونه‌ها (شاهد و عصاره) در ۵۱۷ nm با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی به‌صورت درصد ظرفیت روبش DPPH از معادله زیر محاسبه شد:

$$\text{ظرفیت روبش } DPPH\ (\%) = \frac{Ac-As}{Ac} \times 100 \quad (۳$$

که Ac مقدار جذب شاهد (محلول DPPH) و As مقدار جذب عصاره نمونه.

آنالیز آماری: این پژوهش در قالب طرح کاملا تصادفی به روش فاکتوریل انجام شد که در آن اثرات فاکتورهای غلظت ملاتونین و زمان نگهداری بر ویژگی‌های کیفی سیب‌های تازه–برش مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها با روش دانکن برای انتخاب تیمار ملاتونین بهینه و آزمون t-student برای بررسی اثر تیمار بهینه بر ویژگی‌های کیفی، تغذیه‌ای و ماندگاری انجام گرفت. برای آنالیز آماری در سطح احتمال ۵٪ ($P < ۰/۰۵$) از نرم‌افزار SPSS (Version 22 SPSS Inc. Chicago, USA) استفاده شد.

۳–نتایج و بحث

تاثیر تیمار ملاتونین بر BI سیب تازه–برش: برای تعیین غلظت مناسب ملاتونین برون‌زا بر کیفیت برش‌های تازه سیب، ۵ غلظت ملاتونین همراه با شاهد مورد آزمایش قرار گرفت. قهوه‌ای شدن سریع آنزیمی عامل اصلی محدودکننده فرآوری و فروش تازه–برش‌های سیب است. در سیب تازه–برش، BI به‌عنوان یک شاخص کیفی مهم در فرآیند قهوه‌ای شدن مورد توجه می‌باشد. نتایج شکل ۱ نشان می‌دهد شاخص قهوه‌ای شدن از ۱ µM به ۱۰ µM ملاتونین (کمترین مقدار) کاهش یافته و از ۱۰ µM به ۱۰۰ و ۱۰۰۰ µM روند افزایشی را داشته است. به‌طوری که نمونه شاهد (بدون تیمار ملاتونین) بیشترین (۷۷/۵۵) و نمونه تیماری با ۱۰ µM ملاتونین کمترین (۵۰/۷۷) شاخص قهوه‌ای شدن را داشتند ($P < ۰/۰۵$).

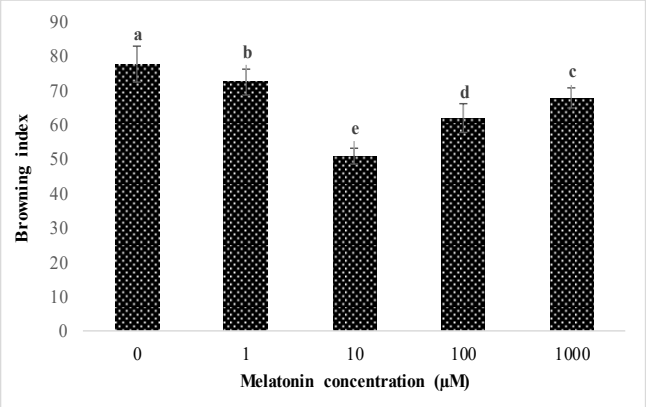

Fig. 1. Effects of melatonin concentration on browning index of fresh-cut apple fruit.
Values with different small letters are different at $P < 0.05$.

بعد از مشخص شدن غلظت مناسب ملاتونین تیماری برون–زا، ادامه تیمار و نگهداری سیب‌های تازه–برش برای مدت ۷ روز با ۱۰ µM ملاتونین تیمار و مقایسه آن با شاهد مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به شکل ۲، شاخص قهوه‌ای شدن به تدریج در نمونه‌های تیماری و شاهد افزایش یافته است، اما در مقایسه با شاهد، تیمار ملاتونین، شاخص قهوه–ای شدن را طی نگهداری مهار کرده است. به طوری که بعد

از ۷ روز، BI سیب‌های تازه-برش تیمارشده با ملاتونین به-طور معنی‌دار کمتر (٦١/٥٣) از سیب تازه-برش کنترل (٨٦/٤١) بودند ($P < ۰/۰۵$). نتایج مشابهی نیز توسط زانگ و همکاران (۲۰۱۸) و زنگ و همکاران (۲۰۱۹) به ترتیب برای میوه‌های لیتچی و گلابی تیمارشده با ملاتونین مشاهده شدند [۱۵ و ١٦].

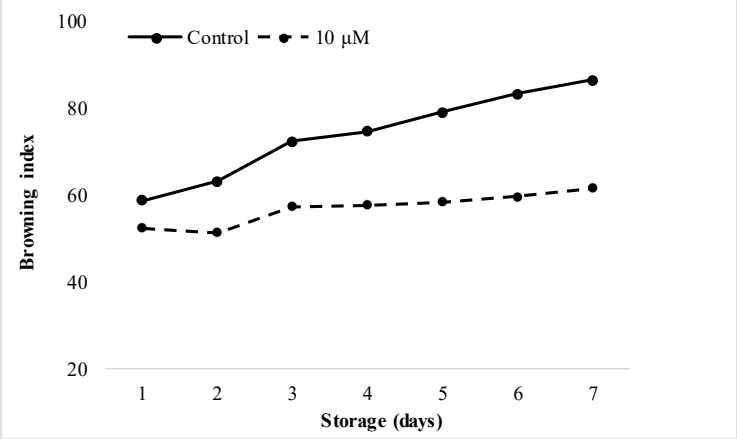

Fig. 2. Effects of storage time on browning index of fresh-cut apple fruit.

تاثیر تیمار ملاتونین بر محتوای MDA و H_2O_2 سیب تازه-برش: پراکسیداسیون لیپید یک نشانگر مهم برای آسیب سیستم غشایی و تخریب متابولیسم سلولی است. برای تعیین پراکسیداسیون لیپید در غشا سلول گیاهی، MAD و H_2O_2 را مورد بررسی قرار می‌دهند [۸]. تجمع MAD و H_2O_2 می-تواند باعث تخریب ترکیب غشاء سلولی و گسترش تجمع پلی‌مرهای قهوه‌ای و قهوه‌ای شدن پریکارپ را منجر گردد [۱۷]. در شکل ۳الف تغییرات محتوای MDA در میوه سیب برش-تازه را نشان می‌دهد. محتوای MDA در نمونه شاهد از روز صفر (۱/۵ µmol kg^{-1} FW) تا ۷ام (۳/۹ µmol kg^{-1} FW) به تدریج افزایش یافته است، اما در سیب تازه-برش تیمارشده با ۱۰ µM ملاتونین از روز صفر (µmol kg^{-1} FW ١/٤) تا روز ۵ام (۱/۷ µmol kg^{-1} FW) افزایش و در ادامه روند کاهشی (۱/۳ µmol kg^{-1} FW) را طی نگهداری داشته است. بنابراین، در سیب‌های تازه-برش تیماری با ملاتونین در مقایسه با نمونه شاهد، طی نگهداری در دمای یخچال به خاطر بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی همواره محتوای MDA پایین‌تری داشته است ($P < ۰/۰۵$).

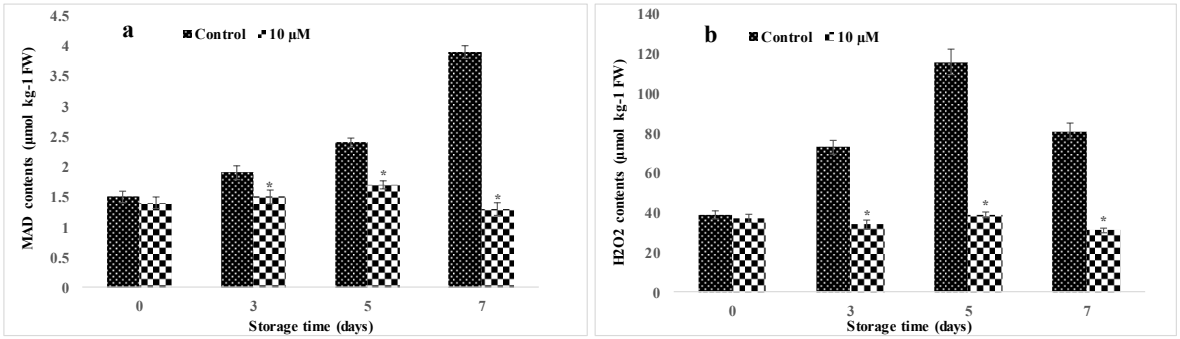

Fig. 3. Effects of melatonin treatment on content of MDA (a) and H_2O_2 (b) in fresh-cut apple fruit.
Statistical significance was confirmed at *$P < 0.05$.

با بررسی شکل ۳ب، محتوای H_2O_2 شاهد تا روز ۵ام افزایش (١١٦ mmol kg^{-1} FW) و سپس در روز ۷ام کاهش (۸۱ mmol kg^{-1} FW) یافته است. در حالیکه، محتوای H_2O_2 سیب تازه-برش تیمارشده با ملاتونین (۱۰ µM) در مقایسه با نمونه شاهد طی دوره نگهداری از روز صفر (mmol kg^{-1} FW ٣٧) تا روز ۷ام (۳۱ mmol kg^{-1} FW) پایین‌تر مانده بود ($P < ۰/۰۵$). نتایج مشابه با محتوای MDA و H_2O_2 در

توت‌فرنگی تیمارشده با ملاتونین که به‌طور معنی‌دار کمتر از نمونه‌های شاهد بودند [۱۱]. مطالعات قبلی نشان داد تیمار ملاتونین محتوای ملاتونین درون‌زای گوجه‌فرنگی و توت‌فرنگی را افزایش می‌دهد [۱۸]. بعلاوه، گزارش شده تیمار ملاتونین می‌توانست فعالیت آنزیم‌های روبش‌کننده گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند سوپراکسیددسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD) و آسکوربات پراکسیداز (APX) را افزایش دهد. بنابراین، سطوح H_2O_2 در خیار و هلوی تیمارشده با ملاتونین پایین‌تر بودند [٦]. نتایج ما نشان داد تیمار ملاتونین با غلظت ۱۰ µM، تجمع H_2O_2 را در سیب تازه‌برش به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از طریق گسترش تجمع ملاتونین درون‌زا و رهایش فعالیت آنزیم‌های روبش‌کننده ROS رواج داده است.

تاثیر تیمار ملاتونین بر محتوای فنول کل، اسکوربیک اسید و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی سیب تازه‌برش: برخی ترکیبات زیست‌فعال با فعالیت آنتی‌اکسیدانی مانند ترکیبات فنولی، اثرات سودمندی بر سلامت انسان دارند. گزارش شده محتوای فنولی با قهوه‌ای شدن آنزیمی در میوه سیب ارتباط داشت [۳]. با توجه به شکل ٤الف، ترکیبات فنولی در سیب تازه‌برش بدون تیمار ملاتونین (شاهد) طی مدت ۷ روز نگهداری به تدریج از ٤٦۰ mg GAE kg^{-1} FW در روز صفر به ۳۹۰ mg GAE kg^{-1} FW در روز ۷ام کاهش یافته است، در مقابل، نمونه‌های تیماری با ملاتونین، مقدار ترکیبات فنولی طی مدت نگهداری به تدریج از mg GAE kg^{-1} FW ٤۷۵ در روز صفر به ۵۲۵ mg GAE kg^{-1} FW در روز ۷ام روند افزایشی را نشان داده است ($P < ۰/۰۵$). بنابراین، نتیجه‌گیری می‌شود تیمار ملاتونین (۱۰ µM) به طور عالی محتوای ترکیبات فنولی سیب تازه‌برش طی نگهداری در دمای یخچال را تحت تاثیر قرار داده است که با نتایج تحقیقات زو و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد [۱۹].

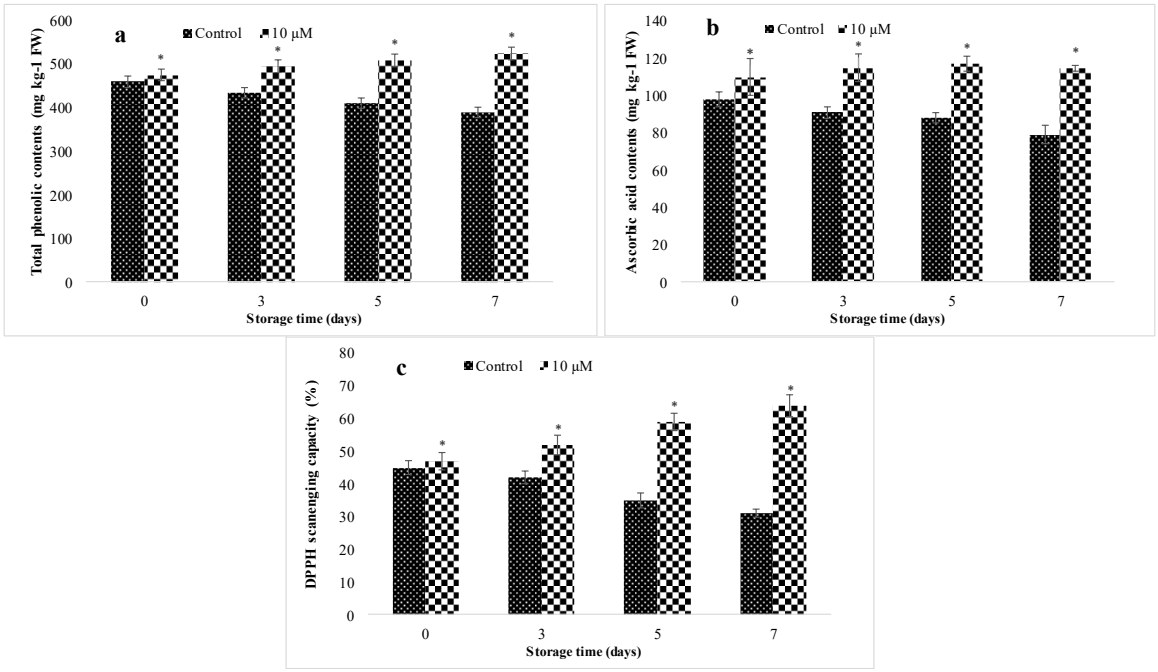

Fig. 4. Effects of melatonin treatment on total phenolic content (a), ascorbic acid content (b) and DPPH scavenging capacity (c) in fresh-cut apple fruit.
Statistical significance was confirmed at *P < 0.05.

به‌طوری که در شکل ٤ب ارایه شده است، محتوای آسکوربیک اسید در نمونه‌های شاهد به تدریج طی مدت نگهداری در یخچال کاهش یافته و از ۹۸ mg kg^{-1} FW در روز صفر به ۷۹ mg kg^{-1} FW در روز ۷ام رسیده است که این تغییر می‌تواند به خاطر تخریب ساختار غشاء سلولی در میوه سیب تازه‌برش باشد. ترکیبات فنولی به طور سریع اکسید می‌شوند و آسکوربیک اسید به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان قوی قابلیت‌کاهش دادن قهوه‌ای شدن در گوست نمونه‌ها را دارد. بنابراین، محتوای آسکوربیک اسید در نمونه‌های شاهد

سریعا طی ذخیره کاهش می‌یابد، اما در سیب‌های تازه-برش تیمارشده با ملاتونین، محتوای اسکوربیک اسید را از ۱۱۰ mg kg^{-1} FW در روز صفر به ۱۱۵ mg kg^{-1} FW در روز ۷ام در سطح پایدار نگه‌داشت، به همین خاطر محتوای آسکوربیک اسید به‌طور معنی‌دار بالاتر از شاهد بودند ($P < 0.05$).

آزمون DPPH برای ارزیابی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی سیب‌های تازه-برش در این مطالعه استفاده شد. تغییرات در ظرفیت روبشی رادیکال DPPH در نمونه‌ها طی ذخیره‌سازی دمای یخچال در شکل ٤ث آمده است. فعالیت روبشی DPPH به‌طور معنی‌دار در سیب تازه-برش شاهد از روز صفر (٤٥٪) تا روز ۷ام (۳۱٪) طی نگهداری کاهش یافته است که با تحقیقات قبلی در مورد توت‌فرنگی مطابقت دارد [۲۰]. اما در نمونه‌های تیمارشده با ملاتونین، از روز صفر (٤۷٪) تا روز ۷ام (٦٤٪) طی نگهداری روند افزایشی داشته است ($P < ۰/۰۵$). همچنین نتایج نشان داد روند مشخصی بین افزایش ترکیبات فنولی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در نمونه‌های تیمارشده با ملاتونین وجود داشت. مکانیسم تیمار ملاتونین برای کاهش قهوه‌ای شدن از طریق حذف محتوای رادیکال آزاد در سیب‌های تازه-برش با مهار فرآیند تبدیل ترکیبات اُ-دی‌فنولیک به کیوینون‌ها می‌باشد [۱۵].

تاثیر تیمار ملاتونین بر فعالیت PAL و PPO سیب تازه-برش: آنزیم PAL در متابولیسم ترکیبات فنولی نقش کلیدی دارد [۲۱]. شکل ۵الف، مقایسه فعالیت آنزیم PAL در نمونه شاهد و تیماری با ملاتونین (۱۰ µM) را نشان می‌دهد. در سیب‌های تازه-برش تیمارشده از روز صفر (۲۳ U g^{-1} FW) تا روز ۷ام (۳۱ U g^{-1} FW) فعالیت آنزیم PAL به‌طور معنی-دار افزایش یافته است، اما این حالت در نمونه شاهد روند کاهشی را از روز صفر (۱۹ U g^{-1} FW) تا ۷ام (۸ U g^{-1} FW) طی ذخیره‌سازی در دمای یخچال مشخص کرده است ($P < 0.05$).

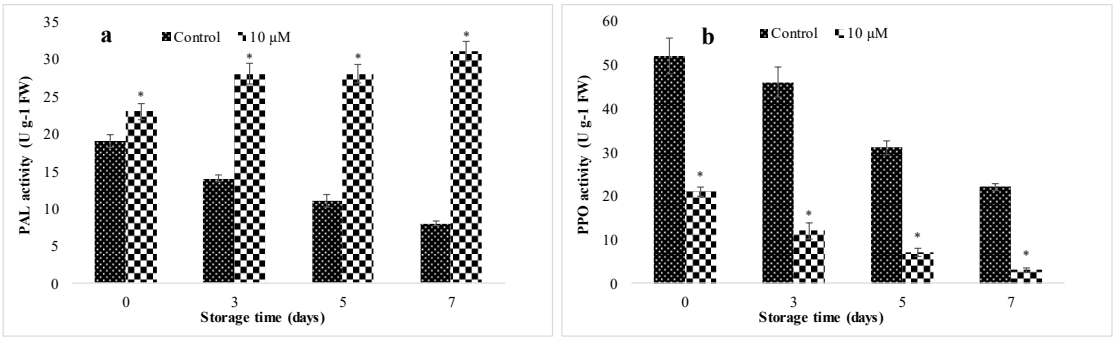

Fig. 5. Effects of melatonin treatment on the enzyme activity of PAL (a) and PPO (b) in fresh-cut apple fruit. Statistical significance was confirmed at *P < 0.05.

آنزیم PPO نقش کلیدی و اصلی در قهوه‌ای شدن آنزیمی دارد [۲۲]. نتایج شکل ۵ب نشان داد فعالیت آنزیم PPO در نمونه‌های شاهد و تیمارشده با ملاتونین طی دوره ذخیره-سازی در دمای یخچال کاهش یافته است. به هر حال، تیمار ملاتونین به‌طور معنی‌دار فعالیت آنزیم PPO را در سیب‌های تازه-برش تیماری در مقایسه با نمونه شاهد به طور معنی‌دار طی ذخیره‌سازی از روز صفر (۲۱ U g^{-1} FW) تا روز ۷ام (۳ U g^{-1} FW) کاهش داده است ($P < 0.05$).

٤-نتیجه‌گیری

قابل‌نتیجه‌گیری است تیمار ملاتونین در غلظت ۱۰ µM موثرترین مقدار برای کنترل قهوه‌ای شدن آنزیمی و نگهداری کیفی سیب تازه-برش بود. در این تیمار، محتوای MDA و H_2O_2 به‌طور معنی‌دار طی ذخیره‌سازی در دمای یخچال در مقایسه با شاهد کاهش یافت. محتوای فنول کل، اسکوربیک اسید و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در این غلظت ملاتونین به‌طور معنی‌دار روند افزایش داشت. همچنین نتایج نشان داد در طول نگهداری سیب‌های تازه-برش در مقایسه با نمونه شاهد، فعالیت آنزیم PAL (مسیر بیوسنتز ترکیبات فنولی) افزایش و در مقابل فعالیت آنزیم PPO (عامل قهوه‌ای شدن

آنزیمی) کاهش یافت. بنابراین، تیمار ملاتونین می‌تواند یک استراتژی مفید برای نگهداری کیفیت و مهار قهوه‌ای شدن آنزیمی در سیب تازه-برش باشد.

سپاسگزاری

مقاله استخراجی از طرح پژوهشی به شماره ۹۳۱ بند ٦ مورخ ۱٤۰۰/۰۷/۰۳ و تامین مالی از محل تامین گرانت دانشگاه تبریز می‌باشد.

رضایت‌نامه کتبی

رضایت نامه کتبی و آگاهانه از تمامی شرکت کنندگان در مطالعه اخذ شده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

بیانیه دسترسی‌ها

داده‌های پژوهش به اشتراک گذاشته نمی‌شوند.

۵-منابع

[1] Abbott, J. A., Saftner, R. A., Gross, K. C., Vinyard, B. T., & Janick, J. (2004). Consumer evaluation and quality measurement of fresh-cut slices of 'Fuji,''Golden Delicious,''GoldRush,'and 'Granny Smith'apples. Postharvest biology and technology, 33(2), 127-140.

[2] Wong, J. X., Ramli, S., Desa, S., & Chen, S. N. (2021). Use of Centella asiatica extract in reducing microbial contamination and browning effect in fresh cut fruits and vegetables during storage: A potential alternative of synthetic preservatives. LWT, 151, 112229.

[3] Arnold, M., & Gramza-Michałowska, A. (2022). Enzymatic browning in apple products and its inhibition treatments: A comprehensive review. Comprehensive Reviews in food science and food safety, 21(6), 5038-5076.

[4] Shah, H. M. S., Singh, Z., Afrifa-Yamoah, E., Hasan, M. U., Kaur, J., & Woodward, A. (2024). Insight into the role of melatonin in mitigating chilling injury and maintaining the quality of cold-stored fruits and vegetables. Food Reviews International, 40(5), 1238-1264.

[5] Posmyk, M. M., & Janas, K. M. (2009). Melatonin in plants. Acta Physiologiae Plantarum, 31, 1–11.

[6] Iqbal, S., Hayat, F., Hussain, M., Mushtaq, N., Rehman, M., Asif, A., ... & Shahid, M. A. (2024). Melatonin supplementation alleviates drought stress in peach (Prunus persica) seedlings by improving photosynthesis, root morphological traits, and antioxidant defense system. Acta Physiologiae Plantarum, 46(2), 18.

[7] Aghdam, M. S., Luo, Z., Jannatizadeh, A., Sheikh-Assadi, M., Sharafi, Y., Farmani, B., ... Razavi, F. (2019). Employing exogenous melatonin applying confers chilling tolerance in tomato fruits by upregulating ZAT2/6/12 giving rise to promoting endogenous polyamines, proline, and nitric oxide accumulation by triggering arginine pathway activity. Food Chemistry, 275, 549–556.

[8] Li, S., Ma, R., Xu, J., Shen, Z., & Yu, M. (2024). Effect of melatonin treatment on improving jasmonates content and cell wall stability involved in enhanced chilling tolerance of peach fruit during cold storage. Postharvest Biology and Technology, 213, 112957.

[9] Lakke, M. M., Seefeldt, H. F., Skov, T., & Edelenbos, M. (2013). Color and textural quality of packaged wild rocket measured by multispectral imaging. Postharvest Biology and Technology, 75, 86-95.

[10] Sun, J., You, X., Li, L., Peng, H., Su, W., Li, C., & Liao, F. (2011). Effects of a phospholipase D inhibitor on postharvest enzymatic browning and oxidative stress of litchi fruit. Postharvest Biology and Technology, 62, 288–294.

[11] Liu, C., Zheng, H., Sheng, K., Liu, W., & Zheng, L. (2018). Effects of melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit. Postharvest Biology and Technology, 139, 47–55.

[12] Gao, H., Chai, H., Cheng, N., & Cao, W. (2017). Effects of 24-epibrassinolide on enzymatic browning and antioxidant activity of fresh-cut lotus root slices. Food Chemistry, 217, 45-51.

[13] Satpathy, L., Pradhan, N., Dash, D., Baral, P. P., & Parida, S. P. (2021). Quantitative determination of vitamin C concentration of common edible food sources by redox titration using iodine solution. Letters in Applied NanoBioScience, 10(3), 2361-2369.

[14] Sheng, K., Zheng, H., Shui, S., Yan, L., Liu, C., & Zheng, L. (2018). Comparison of postharvest UV-B and UV-C treatments on table grape: Changes in phenolic compounds and their transcription of biosynthetic genes during storage. Postharvest Biology and Technology, 138, 74–81.

[15] Zhang, Y., Huber, D. J., Hu, M., Jiang, G., Gao, Z., Xu, X., & Zhang, Z. (2018). Delay of postharvest browning in litchi fruit by melatonin via the enhancing of antioxidative processes and oxidation repair. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66, 7475–7484.

[16] Zheng, H., Liu, W., Liu, S., Liu, C., & Zheng, L. (2019). Effects of melatonin treatment on the

enzymatic browning and nutritional quality of fresh-cut pear fruit. Food Chemistry, 299, 125116.
[17] Lin, Y., Lin, H., Lin, Y., Zhang, S., Chen, Y., & Jiang, X. (2016). The roles of metabolism of membrane lipids and phenolics in hydrogen peroxide-induced pericarp browning of harvested longan fruit. Postharvest Biology & Technology, 111, 53–61.
[18] Huang, S., & Jin, S. (2024). Melatonin Interaction with Other Phytohormones in the Regulation of Abiotic Stresses in Horticultural Plants. Antioxidants, 13(6), 663.
[19] Xu, L., Yue, Q., Bian, F., Zhai, H., & Yao, Y. (2018). Melatonin treatment enhances the polyphenol content and antioxidant capacity of red apple. Horticultural Plant Journal, 4, 144–150.
[20] Aghdam, M. S., & Fard, J. R. (2017). Melatonin treatment attenuates postharvest decay and maintains nutritional quality of strawberry fruits (Fragaria × anannasa cv. Selva) by enhancing GABA shunt activity. Food Chemistry, 221, 1650–1657.
[21] Kobyletska, M., Kavulych, Y., Romanyuk, N., Korchynska, O., & Terek, O. (2022). Exogenous salicylic acid modifies cell wall lignification, total phenolic content, PAL-activity in wheat (Triticum aestivum L.) and buckwheat (Fagopyrum esculentum Moench) plants under cadmium chloride impact. Biointerface Res. Appl. Chem, 13(117), 10-33263.
[22] Tilley, A., McHenry, M. P., McHenry, J. A., Solah, V., & Bayliss, K. (2023). Enzymatic browning: The role of substrates in polyphenol oxidase mediated browning. Current research in food science, 7, 100623.

Journal of Food Science and Technology (Iran)

Homepage:www.fsct.modares.ir

Scientific Research

Effect of melatonin treatment on enzymatic browning, nutritional quality and shelf life of fresh-cut apple fruit

Boukaga Farmani*[1] and Morteza Soleimani Aghdam[2]

[1]Associate Professor Department of Food Science and Technology, Ahar Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
[2]Associate Professor Department of Horticultural Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2025/04/13

Review: 2025/10/28

Accepted: 2025/11/10

Keywords:

Melatonin treatment,
browning index,
antioxidant capacity,
fresh-cut apple fruit.

DOI: **10.48311/fsct.2026.84022.0**

*Corresponding Author E-

bfarmani@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

Effect of melatonin treatment on nutritional quality and enzymatic browning of fresh-cut apple fruit was investigated. In the first stage, apple slices were treated with melatonin at concentrations of 0, 1, 10, 100 and 1000 µM for 5 min. By investigating the browning index in treated samples and stored at refrigerated temperature for 7 days, concentration of 10 µM melatonin with the lowest browning index (50.77) was selected for further experiments. In the second stage, fresh-cut apples were treated with 10 µM melatonin to determine the quality characteristics of treated samples compared to the control during 7 days of storage at 4 °C ($P < 0.05$). Results showed that treated samples significantly reduced the content of malondialdehyde from day 0 (1.4 µmol kg^{-1} FW) to day 7 (1.3 µmol kg^{-1} FW) and hydrogen peroxide (H_2O_2) from day 0 (37 mmol kg^{-1} FW) to day 7 (31 mmol kg^{-1} FW). Treatment with melatonin during 7-day storage caused an increasing trend in total phenol content from day 0 (475 mg GAE kg^{-1} FW) to day 7 (523 mg GAE kg^{-1} FW), antioxidant capacity from day 0 (47%) to day 7 (64%) and inhibition of ascorbic acid reduction in samples. In addition, melatonin treatment increased activity of phenylalanine ammonia lyase from day 0 (23 U g^{-1} FW) to day 7 (31 U g^{-1} FW) and decreased the activity of polyphenol oxidase from day 0 (21 U g^{-1} FW) to day 7 (3 U g^{-1} FW) during storage ($P < 0.05$).