

Effect of Exogenous Melatonin Treatment on Nonenzymatic Antioxidant System, Nutritional Value, and Visual Quality of Mature Physalis (*Physalis peruviana* L.) Fruit

L. Taghipour^{1*}, P. Hayati², M. Hosseinifarahi^{2,3}, P. Assar¹

1- Department of Horticultural Science, College of Agriculture, Jahrom University, Jahrom, Iran

2- Department of Horticultural Science, Yas.C., Islamic Azad University, Yasuj, Iran

3- Sustainable Agriculture and Food Security Research Group, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran

(*- Corresponding author's Email: Leilataghipour@jahromu.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 25 August 2024

Revised: 28 October 2024

Accepted: 31 October 2024

Available Online: 31 October 2024

Taghipour, L., Hayati, P., Hosseinifarahi, M., & Assar, P. (2025). Effect of exogenous melatonin treatment on nonenzymatic antioxidant system, nutritional value, and visual quality of mature physalis (*Physalis peruviana* L.) fruit. *Journal of Horticultural Science*, 39(2), 299-313. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89577.1373>

Introduction

Physalis (*Physalis peruviana* L.), commonly known as Cape gooseberry or ground cherry, is a valuable member of the Solanaceae family. It is cultivated as a perennial crop in tropical regions and as an annual in temperate climates. The fruit is a spherical berry that can be consumed fresh, dried, or processed into jams and desserts. *Physalis* fruits are rich in minerals, vitamins, and phytochemicals known for their anti-tumor and anti-inflammatory properties, contributing to their reputation as a "superfood." Globally, demand for this crop is increasing due to its health benefits, including in Iran, although comprehensive data on its cultivation within the country remains limited. As a climacteric fruit, *Physalis* has a very short postharvest shelf life—typically no more than five days—highlighting the need for safe and effective postharvest treatments to preserve quality and extend its marketability. To improve the storability and maintain the postharvest quality of *physalis*, researchers are exploring natural and safe treatment options. One such promising compound is melatonin, a pleiotropic molecule derived from tryptophan and endogenously synthesized in plant, animal, fungal, and prokaryotic cells. In plants, melatonin functions as a regulatory agent involved in numerous physiological processes, particularly in response to stress. It interacts with plant hormones and reactive species like hydrogen peroxide (H₂O₂), nitric oxide (NO), and hydrogen sulfide (H₂S), contributing to improved antioxidant activity, delayed senescence, and better stress tolerance. Thus, melatonin represents a promising and eco-friendly strategy to improve the shelf life, sensory quality, and marketability of *physalis* fruit. The aim of the present study was to improve the shelf life and postharvest quality of *physalis* fruits through melatonin treatment for distribution in local markets.

Materials and Methods

Fully orange-colored *physalis* fruits with completely yellow calyxes were harvested from a commercial greenhouse in Pasargad, Fars province. The fruits were quickly transported to the lab, visually evaluated, washed with deionized water, and air-dried. The experimental design was a factorial arrangement based on a completely randomized design (CRD), consisting of 12 treatments with three replicates per treatment (20 fruits per replicate). The experimental factors included fruit immersion in four levels of melatonin solution concentration (100, 200, and 300 µM, with distilled water as the control) and sampling time at three levels (7, 14, and 21 days of storage). Following the preparation of melatonin solutions at different concentrations, sixty fruits were immersed in each solution for five minutes. The treated fruits were air-dried for 30 minutes, then packaged in



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89577.1373>

polyethylene bags with 3% perforation and stored at 10 °C under 90 ± 5% relative humidity for 21 days. Assessments were carried out at weekly intervals.

Results and Discussion

Overall, postharvest treatment with melatonin led to a reduction in respiration rate and polyphenol oxidase (PPO) activity in the juice, as well as an improvement or maintenance of skin carotenoid content, total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA), ascorbic acid, total phenols, phenylalanine ammonia-lyase (PAL) enzyme activity, and total antioxidant activity in the juice. After 21 days of storage and at the end of the experiment, the assessment of all these attributes revealed that fruits treated with 300 µM melatonin were superior in terms of nutritional value, appearance, and postharvest oxidative stress response mechanisms compared to the other experimental groups. There was no significant difference in total soluble solids and titratable acidity among the fruits treated with different concentrations of melatonin; however, fruits treated with the two higher concentrations of melatonin showed the lowest respiration rate and the highest ascorbic acid content in the juice. Furthermore, fruits treated with 300 µM melatonin exhibited higher levels of total phenols, PAL enzyme activity, total antioxidant activity, and skin carotenoids compared to all other experimental groups, while also showing the lowest PPO enzyme activity.

Conclusions

Treating physalis fruits with exogenous melatonin, especially at concentration of 300 µM, can significantly enhance their postharvest quality and storability by modulating various physiological and biochemical processes. This approach has the potential to improve the marketability and economic value of harvested physalis as a high-value horticultural crop.

Keywords: Antioxidant capacity, Carotenoid, Marketability, Phenol, Physalis

تأثیر تیمار برونزاد ملاتونین بر نظام پاداکسندۀ غیرآنزیمی، ارزش غذایی و کیفیت بصری میوه‌های بالغ عروسک پشت پرده (*Physalis peruviana* L.)

لیلا تقی پور^{۱*} - پرینسا حیاتی^۲ - مهدی حسینی‌فرهی^{۳،۲} - پدram عصار^۱ 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۰

چکیده

عروسک پشت پرده یا فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) یکی از اعضای مهم خانواده سیب‌زمینی‌سانان محسوب می‌شود. میوه‌های فیسالیس غنی از مواد معدنی، ویتامین‌ها و ترکیبات فیتوشیمیایی با خواص ضدتوموری و ضدالتهابی هستند و همین امر آن را بسیار مورد علاقه نموده است. فیسالیس میوه‌ای فرازگرا است که دارای عمر پس از برداشت بسیار کوتاه است و معمولاً حداکثر تا پنج روز ماندگاری دارد، بنابراین نیاز به استفاده از تیمارهای ایمن پس از برداشت برای حفظ کیفیت و افزایش عمر ماندگاری آن احساس می‌شود. در پژوهش حاضر، میوه‌های فیسالیس با رنگ نارنجی کامل و کاسبرگ‌های زرد از یک گلخانه تجاری در شهرستان پاسارگاد استان فارس برداشت و پس از ارزیابی ظاهری، با آب دیونیزه شسته و در هوای آزاد خشک شدند. طرح آزمایشی مورد استفاده فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل ۱۲ تیمار با سه تکرار برای هر تیمار (۲۰ میوه در هر تکرار) بود. عوامل آزمایشی شامل غوطه‌وری میوه‌ها به مدت پنج دقیقه در چهار سطح غلظت محلول ملاتونین (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ میکرومولار و آب مقطر به عنوان شاهد) و زمان نمونه‌برداری در سه سطح (روزهای ۷، ۱۴ و ۲۱ انبارمانی) بود. پس از غوطه‌وری، میوه‌های هر گروه به مدت ۳۰ دقیقه در هوای آزاد خشک شدند و در کیسه‌های پلی‌اتیلن با نسبت سوراخ سه درصد بسته‌بندی و در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 90 ± 5 درصد به مدت ۲۱ روز نگهداری شدند. ارزیابی‌های هفتگی نشان داد که به‌طور کلی و نسبت به شاهد، تیمار پس از برداشت ملاتونین منجر به کاهش نرخ تنفس و فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز (PPO) در آب‌میوه شد و همچنین موجب بهبود یا حفظ مقادیر کاروتنوئید پوست، مواد جامد محلول کل (TSS)، اسید قابل تیتر (TA)، اسید آسکوربیک، فنول کل، فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیاز (PAL) و فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل در آب‌میوه گردید. پس از ۲۱ روز انبارمانی و در پایان آزمایش، ارزیابی مجموع صفات نام‌برده نشان داد که میوه‌های تیمار شده با ۳۰۰ میکرومولار ملاتونین، در مقایسه با سایر گروه‌های آزمایشی، از نظر ارزش غذایی، ظاهر، و سازوکارهای مقابله با تنش اکسایشی پس از برداشت برتر بودند. در مورد مواد جامد محلول کل و اسیدیته قابل تیتر، تفاوت معنی‌داری بین میوه‌های تیمار شده با غلظت‌های مختلف ملاتونین مشاهده نشد، اما میوه‌های تیمار شده با دو غلظت بالاتر ملاتونین، کمینه نرخ تنفس و بیشینه مقدار اسید آسکوربیک آب‌میوه را داشتند. همچنین، میوه‌های تیمار شده با ۳۰۰ میکرومولار ملاتونین، در مقایسه با تمامی گروه‌های آزمایشی دیگر، سطوح بالاتری از فنول کل، فعالیت آنزیم PAL، فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل و کاروتنوئید پوست داشتند، و کمترین فعالیت آنزیم PPO نیز در این گروه مشاهده شد. در نهایت چنین نتیجه‌گیری شد که تیمار میوه‌های فیسالیس با ملاتونین خارجی، به‌ویژه در غلظت ۳۰۰ میکرومولار، می‌تواند با تعدیل فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مختلف، به‌طور قابل توجهی کیفیت پس از برداشت و ماندگاری آن‌ها را بهبود بخشد. این تکنیک، پتانسیل افزایش بازارپسندی و ارزش اقتصادی فیسالیس برداشت‌شده را به‌عنوان یک محصول باغی با ارزش بالا دارد.

واژه‌های کلیدی: بازارپسندی، ظرفیت پاداکسندۀ، فنول، فیسالیس، کاروتنوئید

۱- گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

۲- گروه علوم باغبانی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

۳- گروه پژوهشی کشاورزی پایدار و امنیت غذایی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

(Email: Leilataghipour@jahromu.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89577.1373>

مقدمه

گونه *Physalis peruviana* که به نام‌های فیسالیس و عروسک پشت پرده شناخته می‌شود، یکی از مهم‌ترین اعضای خانواده سیب‌زمینی‌سانان است و در مناطق گرمسیری به صورت چندساله و در مناطق معتدله به صورت یک‌ساله کشت می‌شود. میوه آن، یک سته کروی است و به صورت تازه، خشک، و در تهیه دسر و مربا استفاده می‌شود. میوه فیسالیس دارای مقادیر قابل توجهی از مواد معدنی و ویتامین‌ها مانند پتاسیم و ویتامین C و حاوی ترکیبات شیمیایی خاصی به نام ویتانولیدها است که خواص ضدتومور و ضدالتهابی دارند و به همین دلیل در طب سنتی حتی برای درمان بیماری‌هایی مانند سرطان، هپاتیت و بیماری‌های پوستی مصرف می‌شود (Fischer et al., 2011; LoNDoño, 2013; Shenstone et al., 2020). هم‌اکنون تقاضای بین‌المللی برای این محصول به عنوان یک "سوپرفود" در حال افزایش است و متناسب با آن، علاقه به کشت و پرورش این محصول به عنوان یک غذای سالم و مفید در سراسر جهان از جمله ایران روبه‌افزایش است (Goulart Júnior et al., 2017) و البته آمار دقیقی از کشت و پرورش این محصول در ایران موجود نیست.

کاسه گل فیسالیس دائمی است و در زمان برداشت به همراه میوه برداشت می‌شود. به صورت قراردادی بر اساس رنگ میوه و پوشش کاسه گل در زمان برداشت، چهار مرحله بلوغ برای میوه‌های فیسالیس وجود دارد: میوه سبز مایل به زرد با کاسه گل سبز (S1)، میوه زرد - نارنجی با کاسه گل زرد - سبز (S2)، میوه نارنجی با کاسه گل زرد (S3) و میوه نارنجی با کاسه گل قهوه‌ای خشک (S4). از نظر تظاهر و کیفیت پس از برداشت و عمر انبارمانی، میوه‌های مراحل ۱ و ۴ علی‌رغم برداشت نامناسب و غیرتجاری هستند، اما میوه‌های دو مرحله دیگر به ترتیب برای ارسال به بازارهای دوردست و بازارهای محلی مناسب هستند (Balaguera-López et al., 2016).

ملاتونین، یک مولکول پلی‌تروپیک مشتق از تریپتوفان، به صورت درون‌زا در سلول‌های حیوانی، گیاهی، قارچی و پروکاریوتی تولید می‌شود و نقش‌های متعددی در گیاهان ایفا می‌کند. این مولکول با توجه به خواص پاداکسنده خود، در بسیاری از فرآورده‌های سیگنال‌دهی مرتبط با رشد و نمو گیاهان و همچنین سازگاری با شرایط تنش نقش دارد. ملاتونین به عنوان یک هورمون و تنظیم‌کننده گیاهی، با فیتوهورمون‌ها و گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن و نیتروژن مانند هیدروژن پراکسید (H_2O_2)، نیتریک اکسید (NO) و سولفید هیدروژن (H_2S) تعامل می‌کند. تحقیقات نشان داده‌اند که ملاتونین در حفظ سبزینه و تأخیر پیری برگ‌ها، تنظیم رسیدگی میوه‌ها پس از برداشت، و مقابله با تنش‌های زیستی و غیرزیستی نظیر شوری، خشکی،

دماهای شدید و تنش فلزات سنگین نقش مؤثری دارد (Soleimani Aghdam et al., 2023; Sun et al., 2021; Xu et al., 2019). ملاتونین در حفظ کیفیت حسی و تغذیه‌ای پس از برداشت محصولات باغبانی که از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردارند، نقش کلیدی ایفا می‌کند. کاربرد برون‌زاد ملاتونین می‌تواند سطح ملاتونین درون‌زاد را افزایش دهد، آنزیم‌های پاداکسنده و پاداکسنده‌های غیرآنزیمی را تقویت کرده و به بهبود فرآورده‌های فیزیولوژیکی مختلف کمک کند. شواهد علمی نشان می‌دهند که افزایش مقدار درون‌زاد ملاتونین، چه به صورت تحریک غیرمستقیم و چه به صورت کاربرد برون‌زاد، می‌تواند به عنوان یک ابزار هدفمند برای بهبود بازاریابی و افزایش درآمد از محصولات باغبانی برداشت‌شده مورد استفاده قرار گیرد (Soleimani Aghdam et al., 2023; Sun et al., 2021; Xu et al., 2019).

به عنوان مثال، در پژوهشی کاربرد ملاتونین در غلظت ۶۰۰ میکرومولار به طور مؤثری از نرم شدن میوه گواوا (*Psidium guajava* L.) جلوگیری نمود. تیمار نام‌برده با تقویت نظام پاداکسنده آنزیمی و غیرآنزیمی، و با کاهش مقادیر آنیون‌های سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدئید، آسیب اکسیداتیو میوه را کاهش داد. در پاسخ به تیمار، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و گلوکاتایون ردوکتاز افزایش یافت. ملاتونین همچنین سبب حفظ بهتر مقادیر فلاونوئیدهای کل و اسید آسکوربیک شد (Fan et al., 2022).

در پژوهشی دیگر، تیمار میوه‌های کیوی (*Actinidia chinensis*) با غلظت ۰/۱ میلی مولار ملاتونین، نرم شدن میوه و کاهش اسید قابل تیترا را به تأخیر انداخت، افزایش محتوای مواد جامد محلول کل را مهار کرد، نرخ تنفس و تولید اتیلن را کاهش داد و محتوای بالاتری از اسید آسکوربیک را در طول نگهداری حفظ کرد و به این ترتیب سبب بهبود ماندگاری و حفظ کیفیت محصول در دوره انبارمانی شد (Luo et al., 2022).

عمر انبارمانی میوه فیسالیس که از انواع میوه‌های فسادپذیر با الگوی رسیدن فرازگرا است، بدون کاسه گل تنها چهار الی پنج روز است (Cedeño & Montenegro, 2004). از این رو، رویارویی صحیح با چالش موجود در عرضه میوه سالم و باکیفیت در بازارهای محلی به هدف مصرف بلادرنگ و تازه‌خوری ضرورت دارد، بنابراین هدف از پژوهش حاضر تلاش برای بهبود عمر انبارمانی و کیفیت پس از برداشت میوه‌های فیسالیس برداشت‌شده در مرحله سوم (S3) بود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی

میوه‌های کاملاً نارنجی گیاه فیسالیس با کاسبرگ‌های کاملاً زرد از یک گلخانه تجاری در پاسارگاد (استان فارس) برداشت شدند. این میوه‌ها به سرعت با استفاده از جعبه‌های مقوایی به آزمایشگاه منتقل شدند. میوه‌های مناسب با ارزیابی بصری انتخاب شدند که در این ارزیابی به یکنواختی اندازه، رنگ، و عدم وجود آسیب یا آلودگی توجه شد. پس از آن، میوه‌ها با آب دیونیزه شسته و در دمای اتاق خشک شدند.

تیمارها

در ابتدا، ملاتونین تهیه شده از شرکت سیگما آلدْرِیج (Sigma Aldrich) ساخت کشور اسپانیا، در اتانول حل شد و سپس با آب مقطر رقیق شد تا به غلظت‌های مورد نظر ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومولار برسد. هر تیمار شامل غوطه‌ور کردن ۶۰ میوه به مدت پنج دقیقه در محلول‌های ملاتونین بود و از آب مقطر به عنوان شاهد استفاده شد. میوه‌های تیمار شده برای ۳۰ دقیقه در دمای اتاق خشک شدند و سپس در کیسه‌های پلی اتیلن با ضخامت ۰/۰۳ میلی‌متر (ابعاد ۱۰ × ۵ × ۲۰ سانتی‌متر) با نسبت سوراخ سه درصد بسته‌بندی شدند. این میوه‌ها به مدت ۲۱ روز در دمای ۱۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی 5 ± 90 درصد انبار شدند. میوه‌ها به صورت هفتگی از انبار خارج و در طول ۲۱ روز مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین، به منظور بررسی و نه برای مقایسه‌های آماری، ویژگی‌های مد نظر در روز اول آزمایش و قبل از شروع دوره نگهداری نیز سنجش شدند.

طرح آزمایشی

طرح آزمایشی مورد استفاده فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) شامل ۱۲ تیمار با سه تکرار برای هر تیمار (۲۰ میوه در هر تکرار) بود. عوامل آزمایشی شامل غوطه‌وری میوه‌ها در چهار سطح غلظت محلول ملاتونین (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ میکرومولار و آب مقطر به عنوان شاهد) و زمان نمونه‌برداری در سه سطح (روزهای ۷، ۱۴ و ۲۱ انبارمانی) بود.

نرخ تنفس میوه

مقدار مشخصی از میوه تازه فیسالیس در یک محفظه شیشه‌ای بدون هوا قرار گرفت و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انکوبه شد. میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده توسط تنفس میوه با استفاده از حسگر دی‌اکسیدکربن Altro ساخت کشور تایوان اندازه‌گیری شد و به صورت میلی گرم دی‌اکسیدکربن به ازای کیلوگرم میوه تازه در ساعت بیان شد (Hayati et al., 2023).

مواد جامد محلول کل (TSS)، اسیدیته قابل تیتر (TA)

مواد جامد محلول کل آب میوه با استفاده از یک قندسنج دستی (ATAGO-B933475) اندازه‌گیری و به صورت درصد بیان شد. برای تعیین اسیدیته قابل تیتر، روش تیتر کردن با استفاده از سود ۰/۱ نرمال تا رسیدن به اسیدیته ۸/۲ انجام شد. نتایج به صورت درصد اسید سیتریک بیان شد (Hayati et al., 2023).

اسید آسکوربیک آب میوه

اسید آسکوربیک آب میوه با استفاده از روش تیتر کردن ۲۶- دیکلروفنول ایندوفنول اندازه‌گیری شد و به صورت میلی گرم در ۱۰۰ گرم آب میوه گزارش شد (Taghipour & Assar, 2022).

فنول کل آب میوه

میزان کل فنول با استفاده از روش رنگ‌سنجی فولین - سیوکالتیو اندازه‌گیری شد (Pennycooke et al., 2005). در این روش، ۱۳۵ میکرولیتر عصاره میوه با ۷۵۰ میکرولیتر معرف فولین - سیوکالتیو ۱۰ درصد و ۶۰۰ میکرولیتر سدیم کربنات ۷/۵ درصد ترکیب شد. مخلوط به مدت ۶۰ دقیقه در دمای اتاق انکوبه شد و سپس میزان جذب در ۷۶۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفوتومتر خوانش شد. پس از رسم منحنی کالیبراسیون با کاربرد اسید گالیک به عنوان استاندارد، میزان فنول کل به صورت میکرومول اسید گالیک در گرم وزن تازه میوه کمی سازی شد.

فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالایز (PAL) آب میوه

فعالیت PAL با استفاده از روش دی کونا و همکاران (D'Cunha et al., 1996) ارزیابی شد و به صورت واحد در هر گرم وزن تازه گزارش شد. به اختصار، یک میلی لیتر بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی مولار (اسیدیته ۷)، ۰/۵ میلی لیتر فنیل آلانین ۱۰ میلی مولار، ۰/۴ میلی لیتر آب مقطر و ۰/۱ میلی لیتر عصاره آنزیمی در دمای ۳۷ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت انکوبه شدند. واکنش با افزودن ۰/۵ میلی لیتر اسید کلریدریک شش مولار متوقف شد و جذب در طول موج ۲۹۰ نانومتر خوانش شد.

فعالیت پاداکسنده کل آب میوه

سه میلی لیتر استون ۸۰ درصد به یک گرم نمونه میوه اضافه شد و مخلوط به مدت یک شب در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. پس از سانتریفیوژ در دور ۱۰۰۰ به مدت دو دقیقه، مایع رویی جمع‌آوری شد تا میزان فنول کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی تجزیه و تحلیل شود. ظرفیت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از آزمون حذف رادیکال‌های آزاد ۲،۲-دی فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH)

داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس (ANOVA) تجزیه و تحلیل شدند و مقایسه‌های میانگین با استفاده از آزمون کمینه اختلافات معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس بیانگر اثر معنی‌دار تمام عوامل آزمایشی و برهم‌کنش آن‌ها بر تمامی صفات مورد ارزیابی بود (جدول ۱).

نرخ تنفس میوه

روند تغییر نرخ تنفس میوه‌های شاهد و تحت تیمار به‌صورت افزایش معنی‌دار تا روز ۱۴ از دوره انبارمانی و کاهش معنی‌دار متعاقب آن تا پایان دوره بود. در تمام زمان‌های نمونه‌گیری، شدت تنفس میوه‌های شاهد به‌صورت معنی‌داری بیش از میوه‌های تحت تیمار ملاتونین بود. در انتهای آزمایش، کمینه میزان نرخ تنفس به‌ترتیب با مقادیر حدود ۴۷ و ۴۹ میلی‌گرم دی‌اکسیدکربن به‌ازای کیلوگرم میوه تازه در ساعت، مربوط به میوه‌های تحت تیمار با غلظت‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومولار ملاتونین بود و میوه‌های شاهد با حدود ۷۴/۵ میلی‌گرم دی‌اکسیدکربن به‌ازای کیلوگرم میوه تازه در ساعت، بیشینه نرخ تنفس را دارا بودند (شکل ۱-الف).

مواد جامد محلول کل (TSS) آب‌میوه

در مورد میوه‌های شاهد، مقدار TSS آب‌میوه در بازه زمانی روزهای هفتم الی چهاردهم انبارمانی افزایش معنی‌دار یافت، اما در ادامه دوره دچار تغییر آماری نشد. در مورد هرکدام از گروه‌های تحت تیمار با غلظت‌های مختلف ملاتونین تا چهاردهمین روز انبارمانی، تفاوتی از نظر میزان این شاخص نسبت به روز هفتم خود مشاهده نشد، اما در ادامه به‌نحوی افزایش اتفاق افتاد که مقدار TSS روز انتهای انبارمانی به‌صورت معنی‌داری نسبت به روز هفتم بیشتر بود. به‌هرحال، در هرکدام از زمان‌های نمونه‌گیری، تفاوتی بین میزان TSS آب‌میوه‌های تیمار شده با غلظت‌های مختلف ملاتونین وجود نداشت و نسبت به شاهد TSS کمتری داشتند (شکل ۱-ب).

اسیدیتة قابل تیتراسیون (TA) آب‌میوه

روند تغییر میزان TA آب‌میوه‌های گروه‌های آزمایشی به‌صورت کاهش معنی‌دار بود، با این توضیح که در هر گروه، مقدار اندازه‌گیری‌شده در هر زمان نسبت به زمان پیشین به‌صورت معنی‌دار کمتر بود.

ارزیابی شد (Hayati et al., 2023). برای این منظور، ۹۵۰ میکرولیتر محلول DPPH متانولی ۰/۱ میلی‌مولار با ۵۰ میکرولیتر عصاره متانولی مخلوط شد. مخلوط در دمای اتاق به‌مدت ۳۰ دقیقه استراحت داده شد و میزان جذب در ۵۱۷ نانومتر اندازه‌گیری گردید. توانایی پالایش رادیکال‌های آزاد DPPH با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد.

(۱) جذب شاهد / (جذب نمونه - جذب شاهد) $\times 100 =$ توانایی پالایش رادیکال‌های آزاد DPPH (درصد بازدارندگی)

فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز (PPO) آب‌میوه

عصاره‌گیری و سنجش فعالیت آنزیمی طبق روش توضیح داده‌شده توسط تقی‌پور و همکاران (Taghipour et al., 2021) انجام شد. به‌اختصار، پنج گرم بافت تازه به‌مدت دو دقیقه در مخلوط‌کن پیش‌سردشده حاوی ۵۰ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم سرد (۰/۱ مولار، اسیدیتة ۷/۲) با یک درصد Triton X-100 همگن شد. همگن حاصل فیلتر و به‌مدت ۱۵ دقیقه در دور ۵۰۰۰ در دمای دو درجه سلسیوس سانتریفیوژ شد. مایع رویی برای آزمایش فعالیت آنزیمی نگهداری شد. برای سنجش فعالیت PPO، نرخ اولیه افزایش جذب در ۴۲۰ نانومتر مد نظر قرار گرفت. مخلوط واکنش شامل ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم (اسیدیتة ۶)، ۰/۳ میلی‌لیتر کاتکول ۰/۵ مولار به‌عنوان پیش‌ماده و ۰/۲ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی بود و حجم کل به سه میلی‌لیتر رسید. بلانک شامل سه میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات (اسیدیتة ۶) بود. دو شاهد استفاده شد: ۲/۷ میلی‌لیتر بافر و ۰/۳ میلی‌لیتر پیش‌ماده و دیگری ۲/۸ میلی‌لیتر بافر و ۰/۲ میلی‌لیتر پیش‌ماده. جذب شاهدها از جذب نمونه کسر شد. یک واحد فعالیت آنزیمی به‌عنوان افزایش در جذب به‌مقدار ۰/۰۰۱ در دقیقه تعریف شد و فعالیت ویژه آنزیم به‌صورت واحد در هر گرم وزن تازه بیان شد.

کاروتنوئید پوست

برای تعیین میزان کاروتنوئید، ۰/۱ گرم پوست میوه با هفت میلی‌لیتر دی‌متیل سولفوکساید به‌عنوان حلال عصاره‌گیری شد. مخلوط به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد انکوبه شد و سپس حجم عصاره به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. میزان جذب در طول موج‌های ۴۴۵، ۶۶۳ و ۴۷۰ نانومتر خوانش شد. میزان کاروتنوئید با استفاده از معادلات مربوطه محاسبه شد و به‌صورت میکروگرم به‌ازای هر گرم وزن تازه بیان شد (Hiscox & Israelstam, 1979).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر تیمار برون‌زاد ملاتونین بر برخی ویژگی‌های میوه فیسالیس چین انبارمانی.
Table 1- ANOVA for the effect of exogenous melatonin treatment on some fruit characteristics of physalis during storage.

منابع تغییر Source of variation	درجه df	میانگین مربعات Mean squares									
		نرخ تنفس میوه Fruit respiration rate	مواد جامد محلول Juice TSS	کل آب میوه Juice TSS	اسید قابل تیتر Juice TA	اسید اسکوربیک Juice ascorbic acid	میوه Juice total phenol	فعالیت فنیل آلانین Juice PAL activity	فعالیت پاداکسندگی آب میوه Juice antioxidant activity	فعالیت پلی فنول Juice PPO activity	کاروتنوئید پوست Peel carotenoid
غوطه‌وری در ملاتونین Dip in melatonin (DM)	3	1370.87**	3.98**	0.06**	2735.98**	4.20**	182.53**	225.32**	28.88**	12.61**	
زمان Time (T)	2	1743.29**	1.78**	0.29**	29702.77**	7.71**	4.75**	366.49**	4.60**	36.91**	
DM×T	6	43.18**	0.17*	0.01**	452.82**	0.11*	4.75**	4.21**	0.32*	0.24*	
خطا Error	24										
ضریب تغییرات CV (%)		4.66	1.44	1.44	3.61	2.23	2.67	2.38	4.86	4.87	

***، **، * و : به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و عدم معنی داری.
***، **، * and ns: significantly different at 1%, 5% and no significant differences, respectively.

غلظت ملاتونین و شاهد وجود نداشت. در دو زمان نمونه‌برداری ابتدایی نیز تفاوتی بین فنول کل آب‌میوه‌های شاهد و تیمار شده با غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار ملاتونین نبود (شکل ۱-ث).

فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین آمونیالایز (PAL) آب‌میوه

سطح فعالیت آنزیم PAL در شروع آزمایش ۲۱/۵۵ واحد در هر گرم وزن تازه بود. مقدار این شاخص در میوه‌های شاهد با گذشت زمان انبارمانی با کاهش معنی‌دار در هر زمان نمونه‌گیری نسبت به زمان قبلی همراه بود و در نهایت به ۱۴/۴۴ واحد در هر گرم وزن تازه رسید. در مورد میوه‌های تیمار شده با دو غلظت ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار ملاتونین علی‌رغم افزایش اولیه به‌ترتیب حدود ۲/۵ و ۳/۵ واحدی فعالیت آنزیم در روز هفتم نسبت به شروع آزمایش، تغییری در میزان شاخص نام‌برده با گذشت بیش‌تر زمان مشاهده نشد. روند تغییر فعالیت آنزیمی در میوه‌های تحت تیمار با غلظت ۳۰۰ میکرومولار ملاتونین به‌صورت افزایشی بود، به‌گونه‌ای که در نهایت در انتهای دوره انبارمانی، مقدار این شاخص (۲۷/۶۹ واحد در هر گرم وزن تازه) نسبت به روز هفتم (۲۶/۴۱ واحد در هر گرم وزن تازه) به‌صورت معنی‌دار بیشتر بود. البته سطح این شاخص در میوه‌های تحت تیمار با بالاترین غلظت ملاتونین همواره بیش از میوه‌های سایر گروه‌های آزمایشی بود (شکل ۱-ج).

فعالیت پاداکسنده آب‌میوه

روند تغییر سطح فعالیت پاداکسنده تمام گروه‌های آزمایشی به‌صورت کاهش معنی‌دار در طول زمان انبارمانی بود، با این توضیح که در مورد هر گروه در هر زمان نمونه‌برداری نسبت به زمان قبلی کاهش معنی‌دار مشاهده شد. استثناء میوه‌های تیمار شده با بالاترین غلظت ملاتونین بودند که تا روز ۱۴ از انبارمانی، سطح فعالیت پاداکسنده بی‌تغییر بود و پس از آن کاهش معنی‌دار اتفاق افتاد، اما به هر حال در تمام زمان‌های نمونه‌برداری، میوه‌های تحت تیمار با غلظت‌های بالاتر ملاتونین نسبت به سایر گروه‌های آزمایشی فعالیت پاداکسنده آب‌میوه بیشتری داشتند. در انتهای دوره انبارمانی، میوه‌های تحت تیمار با غلظت ۳۰۰ میکرومولار ملاتونین با حدود ۴۰ درصد بیش‌ترین و میوه‌های شاهد با حدود ۲۸ درصد کم‌ترین مقادیر این شاخص را دارا بودند (شکل ۱-چ).

فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز (PPO) آب‌میوه

روند تغییر فعالیت آنزیم PPO در تمام گروه‌های آزمایشی به‌صورت کاهش معنی‌دار در تمام زمان‌های نمونه‌برداری نسبت به زمان پیشین بود. به‌طور کلی، تیمار میوه‌ها با غلظت‌های بالاتر ملاتونین با کاهش بیش‌تر سطح فعالیت آنزیم PPO همراه بود.

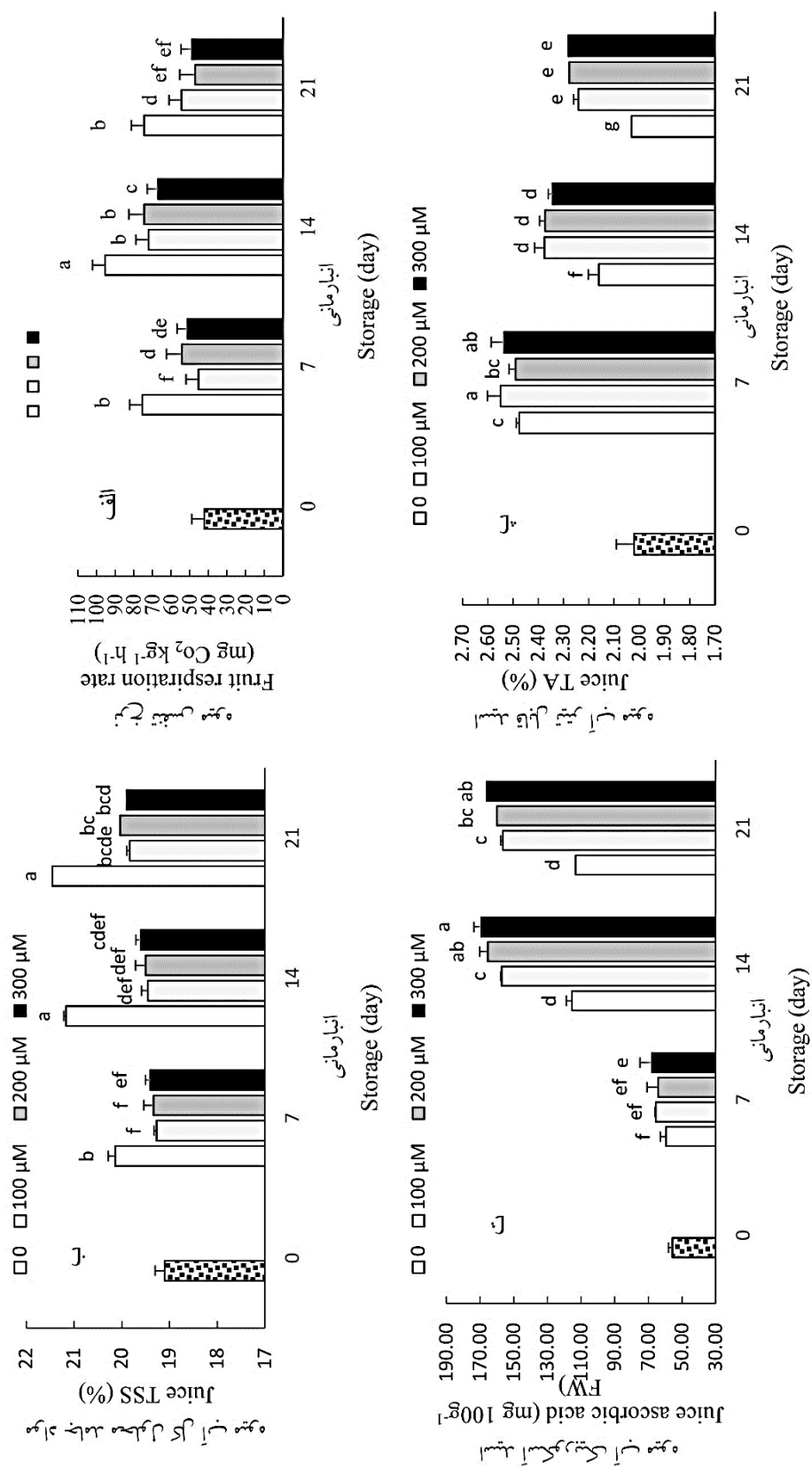
اما تفاوت عمده‌ای بین میزان TA آب‌میوه‌های تحت تیمار با ملاتونین و میوه‌های شاهد وجود داشت و در تمام زمان‌های نمونه‌گیری میوه‌های تحت تیمار میزان TA بیشتری نسبت به گروه شاهد داشتند. در دو زمان نمونه‌گیری انتهایی آزمایش، تفاوتی بین خود میوه‌های تحت تیمار با غلظت‌های مختلف ملاتونین وجود نداشت (شکل ۱-پ).

اسید آسکوربیک آب‌میوه

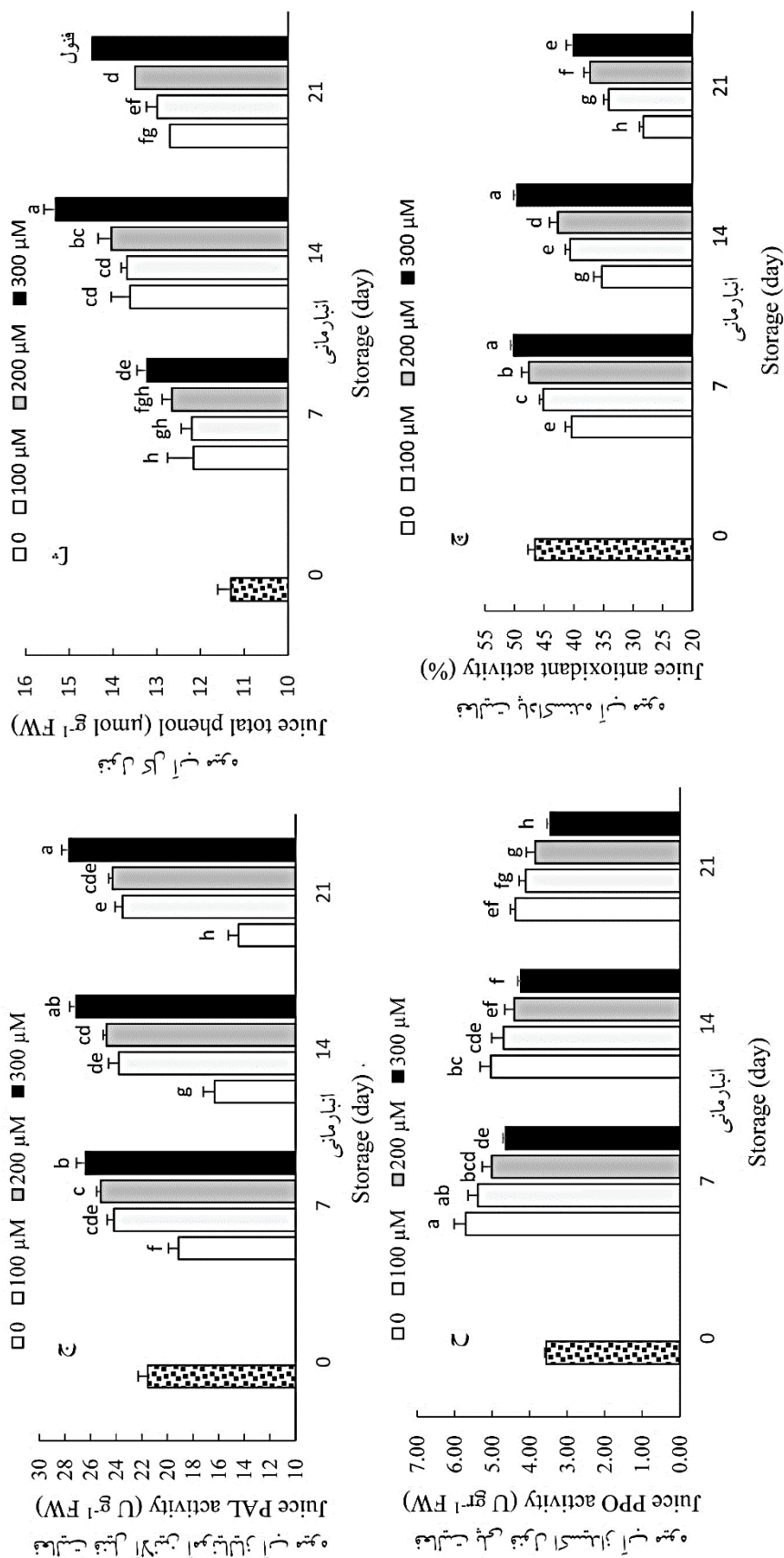
در هفتمین روز انبارمانی، میزان اسید آسکوربیک میوه‌های تحت تیمار با غلظت‌های مختلف ملاتونین مشابه هم و مشابه با میوه‌های شاهد بود و تنها استثناء میوه‌های تیمار شده با ۳۰۰ میکرومولار ملاتونین (حاوی ۶۸ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم آب‌میوه) بود که نسبت به شاهد (حاوی ۵۹/۵ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم آب‌میوه) اسید آسکوربیک بیشتری داشتند. روند تغییر این شاخص در ادامه دوره انبارمانی و در همه گروه‌های آزمایشی به‌صورت افزایش معنی‌دار تا روز چهاردهم و عدم تغییر معنی‌دار تا انتهای دوره انبارمانی بود. بیش‌ترین مقدار این شاخص در بیست و یکمین روز انبارمانی (حدود ۱۶۶ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم آب‌میوه) مربوط به میوه‌های تحت تیمار با ۳۰۰ میکرومولار ملاتونین بود که مشابه با میوه‌های تحت تیمار با ۲۰۰ میکرومولار ملاتونین بود، اما نسبت به سایر گروه‌ها به‌ویژه میوه‌های شاهد (حدود ۱۱۳ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم آب‌میوه) به‌صورت معنی‌دار بیش‌تر بود (شکل ۱-ت).

فنول کل آب‌میوه

روند تغییر محتوای فنول کل آب‌میوه در تمام گروه‌های آزمایشی به‌صورت افزایش معنی‌دار در بازه زمانی روزهای ۷ الی ۱۴ دوره انبارمانی و کاهش معنی‌دار در طی بازه هفت روزه انتهای دوره بود. در تمام زمان‌های نمونه‌برداری، میوه‌های تحت تیمار با بالاترین غلظت ملاتونین با اختلاف معنی‌داری بیش‌ترین محتوای فنول کل آب‌میوه را در بین همه گروه‌های آزمایشی دارا بودند و تفاوت بین سایر گروه‌های آزمایشی نیز در انتهای دوره انبارمانی مشهود شد، با این توضیح که هر چه غلظت تیمار به‌کاررفته بیش‌تر بود، سطح فنول کل آب‌میوه نیز با اختلاف معنی‌دار بیش‌تر از سطح مربوط به غلظت‌های کمتر بود. به عبارت دیگر، میوه‌های تیمار شده با غلظت ۳۰۰ میکرومولار ملاتونین با حدود ۱۴/۵ میکرومول اسید گالیک در گرم وزن تازه بیش‌ترین و میوه‌های تحت تیمار با غلظت‌های ۲۰۰ و ۱۰۰ میکرومولار ملاتونین با حدود ۱۳/۵ و ۱۳ میکرومول اسید گالیک در گرم وزن تازه میوه در رتبه‌های بعدی مقدار شاخص نام‌برده قرار گرفتند و از نظر آماری تفاوتی بین میوه‌های تحت تیمار با کم‌ترین



شکل ۱- اثر غلظت‌های مختلف ملاتونین بر برخی ویژگی‌های میوه فیسالیس طی ۲۱ روز انبارمانی.
Figure 1- The effect of melatonin concentrations on some fruit characteristics of physalis during 21 days of storage. (LSD, $p \leq 0.05$).



ادامه شکل ۱ - اثر غلظت‌های مختلف ملاتونین بر برخی ویژگی‌های میوه فیسالیس طی ۲۱ روز انبارمانی.
Figure 1 (continued) - The effect of melatonin concentrations on some fruit characteristics of physalis during 21 days of storage. (LSD, $p \leq 0.05$).

میزان اسیدیته قابل تیتراسیون کمتر می‌شود. همان‌طور که در بخش نتایج شرح داده شده است، به‌طور کلی تیمار ملاتونین پس از برداشت منجر به کاهش تنفس و فعالیت PPO آب‌میوه، و بهبود یا حفظ مقادیر کاروتنوئید پوست، TSS، TA، اسید آسکوربیک، فنول کل، فعالیت آنزیم PAL و فعالیت پاداکسنده کل در آب‌میوه شد.

ملاتونین به‌عنوان یک هورمون گیاهی، ترکیبی ایمن و بی‌خطر برای محیط‌زیست شناخته می‌شود و به‌عنوان یک مولکول اصلی سیگنال‌دهی حین رویارویی با تنش‌های زیستی و غیرزیستی عمل می‌کند و خود به‌عنوان یک خنثی‌کننده قوی رادیکال‌های آزاد عمل می‌کند (Arnao & Hernández-Ruiz, 2014; Tan et al., 1993). ملاتونین محرک بیان ژن‌های مرتبط با پاداکسندها، و تقویت‌کننده سازوکار مهار و خنثی‌سازی ROS است. علاوه بر این، ملاتونین ترکیب اسیدهای چرب غشاء را تغییر داده و نسبت اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع (unSFA/SFA) را افزایش داده و سختی غشاء را کاهش می‌دهد (Jannatizadeh et al., 2019; Luo et al., 2020). کاربرد برون‌زاد ملاتونین موجب افزایش محتوای ملاتونین درون‌زاد میوه و فعالیت ژن‌های بیوسنتز آن شده و به حفظ کیفیت در شرایط تنش پس از برداشت کمک می‌کند (Dubbels et al., 1995; Hu et al., 2017).

پیرو کاربرد ملاتونین، تأخیر در پیری و کندشدن نرخ تنفس میوه اتفاق می‌افتد (Onik et al., 2021; Rastegar et al., 2020; Tian, 2013). توانایی ملاتونین در مهار تنفس و تولید اتیلن و هم‌سویی با مهار فعالیت PPO به حفظ شاخص‌های کیفیت مانند TSS و TA و جلوگیری از قهوه‌ای شدن و تغییر رنگ پوست و بافت گوشت میوه می‌انجامد، همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شده است (Bravo & Osorio, 2016; Kumar et al., 2014; Xu et al., 2007; Zhang et al., 2018).

علاوه بر حذف ROS اضافی از طریق نظام پاداکسنده آنزیمی، چندین پاداکسنده غیر آنزیمی نیز نقش مهمی در کاهش سمیت ROS و کاهش پراکسیداسیون چربی‌ها ایفا می‌کنند. ملاتونین می‌تواند به‌عنوان یک مولکول سیگنال‌دهنده عمل کند که بیان ژن‌های دفاعی بالادست و پایین‌دست را که کدکننده بسیاری از پاداکسندهای غیر آنزیمی هستند، تنظیم می‌کند (Xu et al., 2019).

اسید آسکوربیک (ASA) یک پاداکسنده غیر آنزیمی معمول است که می‌تواند ROS را به‌طور مستقیم پاک‌سازی کند (Liu et al., 2015). همسو با یافته‌های این پژوهش، بهاردواج و همکاران (Bhardwaj et al., 2022) گزارش کردند که تیمار ملاتونین منجر به افزایش سطح اسید آسکوربیک در آب‌میوه انبه (Mangifera indica) شد. بخشی از این افزایش به نقش مهم ملاتونین در

از نظر آماری در هر زمان نمونه‌برداری، سطح فعالیت آنزیمی میوه‌های تحت تیمار با ۲۰۰ میکرومولار ملاتونین نسبت به میوه‌های شاهد به‌صورت معنی‌دار کمتر بود و میوه‌های تحت تیمار با ۱۰۰ میکرومولار ملاتونین، حد واسط این دو گروه و با هر دو مشابه بودند. تا چهاردهمین روز از دوره انبارمانی، سطح فعالیت آنزیمی میوه‌های دو گروه تیمار شده با غلظت‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومولار ملاتونین مشابه هم بود، اما در ادامه دوره انبارمانی، میوه‌های تیمار شده با بالاترین غلظت ملاتونین کمینه سطح فعالیت آنزیمی (۳/۴۶ واحد در هر گرم وزن تازه) و میوه‌های شاهد بیشینه سطح آن را (۴/۳۹ واحد در هر گرم وزن تازه) دارا بودند (شکل ۱-ح).

کاروتنوئید پوست میوه

با گذشت زمان انبارمانی، سطح کاروتنوئید پوست میوه‌های همه گروه‌های آزمایشی با افزایش معنی‌دار همراه بود. در تمامی زمان‌های نمونه‌گیری، میزان کاروتنوئید پوست میوه‌های تحت تیمار نسبت به میوه‌های شاهد بیشتر بود و از نظر عددی میوه‌هایی که تحت تیمار غلظت‌های بالاتر ملاتونین بودند، میزان کاروتنوئید بیشتری داشتند. در انتهای دوره انبارمانی، تفاوت بین میزان کاروتنوئید پوست میوه‌های تحت تیمار با بالاترین غلظت ملاتونین (حدود ۱۵ میکروگرم به‌ازای هر گرم وزن تازه) و سایر گروه‌ها، به‌ویژه شاهد (حدود ۱۲ میکروگرم به‌ازای هر گرم وزن تازه) به‌طور واضح‌تر مشهود شد (شکل ۲).

بحث

میوه‌ها همانند سایر محصولات باغبانی در مرحله پس از برداشت دچار تنش اکسایشی می‌شوند که برآیند آن تخریب مولکول‌های درشت، اسیدهای نوکلئیک، چربی‌ها، پروتئین‌ها، کاهش عمر انبارمانی و افت کیفیت پس از برداشت است (Tian, 2013).

میوه‌ها نظام‌های پاداکسنده غیر آنزیمی شامل ترکیباتی مانند اسید آسکوربیک، آنتوسیانین‌ها و کاروتنوئیدها را برای مبارزه با گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر (ROS)، به‌عنوان عامل وقوع آبشار تخریب ساختارها و مولکول‌های حیاتی، توسعه داده‌اند (Miranda et al., 2019; Zheng et al., 2018; Zhang et al., 2020). این نظام‌ها، تجمع ROS و پراکسیداسیون چربی‌ها را کاهش می‌دهند و عمر پس از برداشت را با تقویت تمامیت سلولی افزایش می‌دهند (Noctor & Foyer, 1998).

بالاگوترا-لوپز و همکاران (Balaguera-López et al., 2016) دریافتند که با افزایش بلوغ میوه‌های فیسالیس، مقادیر تولید اتیلن، شدت تنفس، رنگ‌گیری و محتوای TSS بیشتر می‌شود، درحالی‌که

تحریک تولید متابولیت‌های ثانویه مانند فنول‌ها، فلاونوئیدها و اسید آسکوربیک مربوط می‌شود (Hayati et al., 2023). عامل دیگر توانایی ملاتونین در مهار فعالیت‌های متابولیک، کاهش تنفس و تأخیر در پیری میوه است که به حفظ سطح اسید آسکوربیک کمک می‌کند (Rastegar et al., 2020). چنین گزارش شده است که کاربرد ملاتونین خارجی با افزایش رونویسی آنزیم‌های مرتبط با پاداکسندها، چرخه اسید آسکوربیک-گلوتاتیون را در هلو (*Prunus persica*) در دوره پس از برداشت فعال می‌کند که منجر به افزایش سطح اسید آسکوربیک و طولانی‌تر شدن عمر انبارمانی محصول می‌شود (Cao et al., 2018; Song et al., 2016). اثرات مشابه ملاتونین بر چرخه نام‌برده در مورد خیار (*Cucumis sativus*) نیز مشاهده شده است (Zhao et al., 2016).

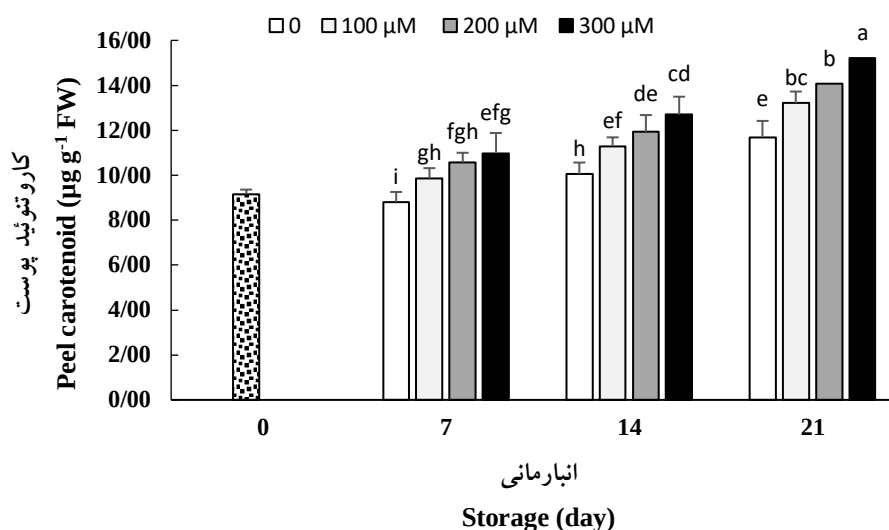
تیمار با ملاتونین به‌طور قابل توجهی ظرفیت پاداکسنده میوه‌های هسته‌دار را در طول نگهداری بهبود می‌بخشد که به‌طور مثبت با محتوای فنول کل مرتبط است (Liu et al., 2018; Puerta-Gomez & Cisneros-Zevallos, 2011). تنظیم بالادستی بیان ژن‌های مسیر فنیل‌پروپانویید توسط ملاتونین باعث افزایش مقادیر فنولیک‌ها می‌شود، همان‌طور که در برخی محصولات باغبانی تیمار شده با ملاتونین گزارش شده است (Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2018). گزارش شده است که ملاتونین می‌تواند فعالیت فنیل‌آلانین آمونیا لایز را که به انباشت فنول‌ها کمک می‌کند، افزایش دهد که برای مهار پوسیدگی قارچی و افزایش عمر انبارمانی هلو و توت‌فرنگی (*Fragaria × ananassa*) در دوره پس از برداشت مفید است (Gao et al., 2018; Seifi et al., 2013).

ترکیبات فنولی می‌توانند با جلوگیری از وقوع و گسترش واکنش‌های زنجیره‌ای اکسیداتیو، از چربی‌های غشایی در برابر پراکسیداسیون محافظت کنند (Pennycooke et al., 2005). علاوه بر این، افزایش تأخیری آنزیم‌های مرتبط با قهوه‌ای شدن مانند پلی‌فنول اکسیداز در میوه‌های لیچی (*Litchi chinensis*) پس از تیمار با ملاتونین با افزایش محتوای فنول کل، فلاونوئیدها، و آنتوسیانین‌ها هم‌خوانی داشت که نشان می‌دهد، ملاتونین می‌تواند اکسیداسیون فنولی آنزیمی را مهار کند و قهوه‌ای شدن پوست را به تأخیر بیندازد (Zhang et al., 2018). افزایش متابولیت‌های ثانویه اساسی، شامل فنولیک‌ها، فلاونوئیدها و اسید آسکوربیک در پاسخ به تیمار ملاتونین به حفظ انرژی درون‌سلولی و حذف ROS کمک می‌کند (Gao et al., 2018; Wang et al., 2019).

یکی از چالش‌های کلیدی در مدیریت و فراوری پس از برداشت میوه فیسالیس، به‌ویژه میوه‌های ترک‌خورده، قهوه‌ای شدن آنزیمی

است که مشکلی رایج در صنعت میوه و سبزی‌ها است و به‌طور منفی بر کیفیت محصول تأثیر می‌گذارد (Bravo & Osorio, 2016; Falguera et al., 2012). آنزیم مسئول این فرآیند، آنزیم پلی‌فنول اکسیداز (PPO) است که کاتالیزور هیدروکسیلاسیون مونو فنول‌ها به 0-دی فنول‌ها و اکسیداسیون بعدی 0-دی فنول‌ها به 0-کینون‌ها است (Falguera et al., 2012; Jiang et al., 2004). این کینون‌ها با آمینواسیدها و پروتئین‌ها واکنش داده و رنگدانه‌های قهوه‌ای تشکیل می‌دهند. فعالیت آنزیمی PPO در طول بلوغ میوه فیسالیس به‌طور قابل توجهی دچار تغییر می‌شود. به این صورت که بالاترین سطح فعالیت آن در مراحل اولیه نمو و کاهش تدریجی حدود ۶۳ درصد از مرحله نارس تا مرحله بیش از حد رسیده گزارش شده است. با این حال، این مقدار هنوز برای قهوه‌ای شدن میوه کافی است (Bravo & Osorio, 2016). در مطالعه حاضر، میوه‌های تیمار شده با ملاتونین به‌طور مداوم فعالیت آنزیمی کم‌تری نشان دادند و غلظت‌های بیشتر ملاتونین اثربخشی بیش‌تری داشتند، بنابراین این تیمار می‌تواند نه تنها برای حفظ کیفیت میوه‌های سالم، بلکه برای استفاده از میوه‌های ترک‌خورده در محصولات فراوری شده مانند آب‌میوه و پالپ، بدون به خطر انداختن ارزش غذایی و خواص ارگانولپتیک آن‌ها مفید باشد. براوو و اسوریو (Bravo & Osorio, 2016) گزارش کردند که مهار مؤثر فعالیت PPO برای حفظ کیفیت فیسالیس در طول نگهداری و فراوری آن الزامی است و ارزش تجاری و قابلیت فروش محصول را افزایش می‌دهد.

ملاتونین تأثیر قابل توجهی بر سنتز کاروتنوئیدها در انواع مختلف گونه‌های گیاهی دارد که اثرات آن به شدت وابسته به گونه و رقم گیاه و شرایط محیطی است. ملاتونین به‌طور مشخص سنتز کاروتنوئیدها را در میوه‌های گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum*) از طریق سازوکاری وابسته به اتیلن تحریک می‌کند و مقادیر α -کاروتن، β -کاروتن و لیکوپن (به عنوان کاروتنوئیدهای حیاتی برای سلامت گیاه و تغذیه انسان) را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. افزایش بیان ژن‌های بیوسنتز کاروتنوئیدها به عنوان منشأ این تغییرات گزارش شده است (Sun et al., 2020). در مقایسه با تأثیر مورد اشاره در گوجه‌فرنگی، تیمار ملاتونین در کلم بروکلی (*Brassica oleracea* var. *italica*) به کاهش مقادیر چندین نوع کاروتنوئید، از جمله β -کاروتن، β -کرپتوکسانتین، زآگزانتین و لوتئین، منجر شده است که به تأخیر در فرآیند زرد شدن بروکلی کمک می‌کند. سرکوب ژن‌های بیوسنتز کاروتنوئیدها، از جمله BoZDS، BoPDS، BoPSY، BoZEP و BoLCY β نقش کلیدی در این رخداد ایفا کرده است (Lou et al., 2023).



شکل ۲- اثر غلظت‌های مختلف ملاتونین بر محتوی کاروتنوئید پوست میوه فیسالیس طی ۲۱ روز انبارمانی.
Figure 2- The effect of melatonin concentrations on the peel carotenoid content of physalis fruit during 21 days of storage. (LSD, $p \leq 0.05$).

نتیجه‌گیری

به‌عنوان یک راهکار مؤثر می‌تواند در حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری میوه فیسالیس پس از برداشت مورد استفاده قرار گیرد و در نتیجه، عرضه محصول سالم و تازه به بازار را برای بازه زمانی طولانی‌تر امکان‌پذیر سازد.

مطالعه حاضر نشان داد که تیمار برون‌زاد میوه فیسالیس با ملاتونین در غلظت‌های ۱۰۰ تا ۳۰۰ میکرومولار موجب بهبود ویژگی‌های کیفی و افزایش عمر انبارمانی این محصول در مقایسه با گروه شاهد می‌شود. این بدان معنا است که استفاده از ملاتونین

References

1. Arnao, M.B., & Hernández-Ruiz, J. (2014). Melatonin: Plant growth regulator and/or biostimulator during stress? *Trends in Plant Science*, 19(12), 789–797. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.006>
2. Balaguera-López, H.E., Martínez-Cárdenas, C.A., & Herrera-Arévalo, A. (2016). Effect of the maturity stage on the postharvest behavior of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits stored at room temperature. *Bioagro*, 28(2), 117–124.
3. Bhardwaj, R., Pareek, S., Mani, S., Domínguez-Ávila, J.A., & González-Aguilar, G.A. (2022). A melatonin treatment delays postharvest senescence, maintains quality, reduces chilling injury, and regulates antioxidant metabolism in mango fruit. *Journal of Food Quality*, 2022, 2379556. <https://doi.org/10.1155/2022/2379556>
4. Bravo, K., & Osorio, E. (2016). Characterization of polyphenol oxidase from cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruit. *Food Chemistry*, 197, 185–190. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.126>
5. Cao, S., Shao, J., Shi, L., Xu, L., Shen, Z., Chen, W., & Zhenfeng, Y. (2018). Melatonin increases chilling tolerance in post-harvest peach fruit by alleviating oxidative damage. *Scientific Reports*, 8, 806. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19363-5>
6. Cedeño, M.M., & Montenegro, D.M. (2004). *Export, logistics and marketing plan for cape gooseberry to the United States market for Frutexpo SCI LTDA* (MSc. Thesis). Santo Tomas University. USTA Institutional Repository.
7. D'Cunha, G.B., Satyanarayan, V., & Madhusudan Nair, P. (1996). Purification of phenylalanine ammonia lyase from *Rhodotorula glutinis*. *Phytochemistry*, 42(1), 17–20. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(95\)00914-0](https://doi.org/10.1016/0031-9422(95)00914-0)
8. Dubbels, R., Reiter, R.J., Klenke, E., Goebel, A., Schnakenberg, E., Ehlers, C., Schiwar, H.W., & Schloot, W. (1995). Melatonin in edible plants identified by radioimmunoassay and by high performance liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of Pineal Research*, 18(1), 28–31. <https://doi.org/10.1111/j.1600-079x.1995.tb00136.x>
9. Falguera, V., Sánchez-Riaño, A.M., Quintero-Cerón, J.P., Rivera-Barrero, C.A., Méndez-Arteaga, J.J., & Ibarz, A. (2012). Characterization of polyphenol oxidase activity in juices from 12 underutilized tropical fruits with high agroindustrial potential. *Food Bioprocess Technology*, 5, 2921–2927. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0521-y>

10. Fan, S., Xiong, T., Lei, Q., Tan, Q., Cai, J., Song, Z., Yang, M., Chen, W., Li, X., & Zhu, X. (2022). Melatonin treatment improves postharvest preservation and resistance of guava fruit (*Psidium guajava* L.). *Foods*, 11(3), 262. <https://doi.org/10.3390/foods11030262>
11. Fischer, G., Herrera, A., & Almanza, P.J. (2011). *Cape Gooseberry (Physalis peruviana L.)*. In E. M. Yahia (Ed.), *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*. Woodhead Publishing. pp. 374-397e. <https://doi.org/10.1533/9780857092762.374>
12. Gao, H., Lu, Z., Yang, Y., Wang, D., Yang, T., Cao, M., & Cao, W. (2018). Melatonin treatment reduces chilling injury in peach fruit through its regulation of membrane fatty acid contents and phenolic metabolism. *Food Chemistry*, 245, 659–666. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.008>
13. Goulart Júnior, R., Mondardo, M., & Waintuch Reiter, J.M. (2017). *Relatório sobre a fruticultura catarinense: Fruticultura em números – Safra 2014/15*. Epagri Documentos No. 271, 114 pp. Epagri.
14. Hayati, P., Hosseinifarahi, M., Abdi, G., Radi, M., & Taghipour, L. (2023). Melatonin treatment improves nutritional value and antioxidant enzyme activity of *Physalis peruviana* fruit during storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(4), 2782–2791. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01819-6>
15. Hiscox, J., & Israelstam, G.F. (1979). A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Botany*, 57(11), 1332–1334.
16. Hu, W., Yang, H., Tie, W., Yan, Y., Ding, Z., Liu, Y., Wu, C., Wang, J., Reiter, R.J., Tan, D.X., Shi, H., Xu, B., & Jin, Z. (2017). Natural variation in banana varieties highlights the role of melatonin in postharvest ripening and quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(43), 9987–9994. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03354>
17. Jannatizadeh, A., Aghdam, M.S., Luo, Z., & Razavi, F. (2019). Impact of exogenous melatonin application on chilling injury in tomato fruits during cold storage. *Food Bioprocess Technology*, 12(5), 741–750. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-2247-1>
18. Jiang, Y., Duan, X., Joyce, D., Zhang, Z., & Li, J. (2004). Advances in understanding of enzymatic browning in harvested litchi fruit. *Food Chemistry*, 88, 443–446. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.02.004>
19. Kumar, R., Khurana, A., & Sharma, A.K. (2014). Role of plant hormones and their interplay in development and ripening of fleshy fruits. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4561–4575. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru277>
20. 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. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.01.016>
21. Liu, N., Jin, Z., Wang, S., Gong, B., Wen, D., Wang, X., Wei, M., & Shi, Q. (2015). Sodic alkaline stress mitigation with exogenous melatonin involves reactive oxygen metabolism and ion homeostasis in tomato. *Scientia Horticulturae*, 181, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.049>
22. LoNDoño, J. (Ed.). (2013). *Physalis Peruviana: Fruta Andina Para El Mundo: Cultivo, Recurso Genético, Agroindustria, Normativa Y Mercado*. Madrid, Spain: Editorial Académica Española.
23. Lou, J., Wu, C., Wang, H., Cao, S., Wei, Y., Chen, Y., Jiang, S., Shao, X., & Xu, F. (2023). Melatonin treatment delays postharvest senescence of broccoli with regulation of carotenoid metabolism. *Food Chemistry*, 408, 135185. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135185>
24. Luo, S., Hu, H., Wang, Y., Zhou, H., Zhang, Y., Zhang, L., & Li, P. (2020). The role of melatonin in alleviating the postharvest browning of lotus seeds through energy metabolism and membrane lipid metabolism. *Postharvest Biology and Technology*, 167, 111243. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111243>
25. Luo, Z., Zhang, J., Xiang, M., Zeng, J., Chen, J., & Chen, M. (2022). Exogenous melatonin treatment affects ascorbic acid metabolism in postharvest 'Jinyan' kiwifruit. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1081476. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1081476>
26. Miranda, S., Vilches, P., Suazo, M., Pavez, L., García, K., Méndez, M.A., González, M., Meisel, L.A., Defilippi, B.G., & del Pozo, T. (2020). Melatonin triggers metabolic and gene expression changes leading to improved quality traits of two sweet cherry cultivars during cold storage. *Food Chemistry*, 319, 126360. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126360>
27. Noctor, G., & Foyer, C.H. (1998). Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control. *Annual Review of Plant Biology*, 49, 249–279.
28. Onik, J.C., Wai, S.C., Li, A., Lin, Q., Sun, Q., Wang, Z., & Duan, Y. (2021). Melatonin treatment reduces ethylene production and maintains fruit quality in apple during postharvest storage. *Food Chemistry*, 337, 127753. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127753>
29. Pennycooke, J.C., Cox, S., & Stushnoff, C. (2005). Relationship of cold acclimation, total phenolic content, and antioxidant capacity with chilling tolerance in petunia (*Petunia × hybrida*). *Environmental and Experimental Botany*, 53(3), 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.04.002>

30. Puerta-Gomez, A.F., & Cisneros-Zevallos, L. (2011). Postharvest studies beyond fresh market eating quality: Phytochemical antioxidant changes in peach and plum fruit during ripening and advanced senescence. *Postharvest Biology and Technology*, 60(3), 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.01.005>
31. Rastegar, S., Hassanzadeh Khankahdani, H., & Rahimzadeh, M. (2020). Effects of melatonin treatment on the biochemical changes and antioxidant enzyme activity of mango fruit during storage. *Scientia Horticulturae*, 259, 108835. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108835>
32. Seifi, H.S., Curvers, K., De Vleeschauwer, D., Delaere, I., Aziz, A., & Höfte, M. (2013). Concurrent overactivation of the cytosolic glutamine synthetase and the GABA shunt in the ABA-deficient sitiens mutant of tomato leads to resistance against *Botrytis cinerea*. *New Phytologist*, 199(2), 490–504. <https://doi.org/10.1111/nph.12283>
33. Shenstone, E., Lippman, Z., & Van Eck, J. (2020). A review of nutritional properties and health benefits of *Physalis* species. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75(3), 316–325. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00821-3>
34. Soleimani Aghdam, M., Mukherjee, S., Flores, F.B., Arnao, M.B., Luo, Z., & Corpas, F.J. (2023). Functions of melatonin during postharvest of horticultural crops. *Plant & Cell Physiology*, 63(12), 1764–1786. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab175>
35. Song, L., Wang, J., Shafi, M., Liu, Y., Wang, J., Wu, J., & Wu, A. (2016). Hypobaric treatment effects on chilling injury, mitochondrial dysfunction, and the ascorbate-glutathione (AsA-GSH) cycle in postharvest peach fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(22), 4665–4674. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00623>
36. Sun, C., Liu, L., Wang, L., Li, B., Jin, C., & Lin, X. (2021). Melatonin: A master regulator of plant development and stress responses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 63(1), 126–145. <https://doi.org/10.1111/jipb.12993>
37. Sun, Q., Liu, L., Zhang, L., Lv, H., He, Q., Guo, L., Zhang, X., He, H., Ren, S., Zhang, N., Zhao, B., & Guo, Y.D. (2020). Melatonin promotes carotenoid biosynthesis in an ethylene-dependent manner in tomato fruits. *Plant Science*, 298, 110580. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110580>
38. Taghipour, L., & Assar, P. (2022). The effect of postharvest polyamine application on the physicochemical traits, bioactive compounds, and antioxidant activity of sweet lime fruit. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, 23(1), 167–178. (In Persian with English abstract). <https://journal-irshs.ir/article-1-589-en.html>
39. Taghipour, L., Rahemi, M., Assar, P., Mirdehghan, S.H., & Ramezani, A. (2021). Intermittent warming as an efficient postharvest treatment affects the enzymatic and non-enzymatic responses of pomegranate during cold storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(1), 12–22. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00607-w>
40. Tan, D.X., Chen, L.D., Poeggeler, B., Manchester, L.C., & Reiter, R.J. (1993). Melatonin: A potent, endogenous hydroxyl radical scavenger. *Endocrine Journal*, 1(1), 57–60.
41. Tian, S. (2013). Molecular mechanisms of fruit ripening and senescence. *Chinese Bulletin of Botany*, 48(5), 481. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1259.2013.00481>
42. Wang, F., Zhang, X., Yang, Q., & Zhao, Q. (2019). Exogenous melatonin delays postharvest fruit senescence and maintains the quality of sweet cherries. *Food Chemistry*, 301, 125311. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125311>
43. Xu, B.Y., Su, W., Liu, J.H., Wang, J.B., & Jin, Z.Q. (2007). Differentially expressed cDNAs at the early stage of banana ripening identified by suppression subtractive hybridization and cDNA microarray. *Planta*, 226(2), 529–539. <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0502-6>
44. Xu, T., Chen, Y., & Kang, H. (2019). Melatonin is a potential target for improving post-harvest preservation of fruits and vegetables. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1388. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01388>
45. Zhang, N., Sun, Q., Li, H., Li, X., Cao, Y., Zhang, H., Li, S., Zhang, L., Qi, Y., Ren, S., Zhao, B., & Guo, Y.D. (2016). Melatonin improved anthocyanin accumulation by regulating gene expressions and resulted in high reactive oxygen species scavenging capacity in cabbage. *Frontiers in Plant Science*, 7, 197. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00197>
46. Zhang, Y., Huber, D.J., Hu, M., Jiang, G., Gao, Z., Xu, X., Jiang, Y., & 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(30), 7475–7484. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01922>
47. Zhao, H., Ye, L., Wang, Y., Zhou, X., Yang, J., Wang, J., Cao, K., & Zou, Z. (2016). Melatonin increases the chilling tolerance of chloroplast in cucumber seedlings by regulating photosynthetic electron flux and the ascorbate-glutathione cycle. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1814. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01814>
48. 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. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125116>