

Comparison of the Effect of *Mentha × piperita* L. Essential Oil in Free and Nanoencapsulated Forms on Some Physicochemical Properties of Cherry Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Fruit

M. Vakili-Ghartavol¹, H. Arouiee^{1*}, Sh. Golmohammadzadeh², M. Naseri³, L. Bandian¹

- 1- Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
 - 2- Department of Pharmaceutics, School of Pharmacy, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran and Nanotechnology Research Center, Pharmaceutical Technology Institute, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran
 - 3- Department of Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran
- (* - Corresponding author's Email: arouiee@um.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 09 September 2024
Revised: 01 January 2025
Accepted: 07 January 2025
Available Online: 07 January 2025

Vakili-Ghartavol, M., Arouiee, H., Golmohammadzadeh, Sh., Naseri, M., & Bandian, L. (2025). Comparison of the Effect of *Mentha × piperita* L. Essential Oil in Free and Nanoencapsulated Forms on Some Physicochemical Properties of Cherry Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Fruit. *Journal of Horticultural Science*, 39(3), 421-440. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.89741.1377>

Introduction

Cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.), an annual plant with significant economic value, are a popular and nutritious fruit commonly used in salads. They are rich in essential nutrients such as sugars, acids, vitamins, minerals, phenolic compounds, lycopene, and other carotenoids, making them a vital component of diets worldwide. However, their climacteric nature causes a rapid decline in quality, resulting in physicochemical changes such as softening and alterations in color. Due to their perishable nature, they have a short shelf life of only 2 to 3 weeks. Therefore, it is crucial to explore methods for extending their freshness, for extending their shelf life while maintaining their quality, both for local consumption and exportation.

Materials and Methods

This study aimed to investigate the impact of varying concentrations (0.025%, 0.05%, 0.075%, 0.1%, and 0.2%) of peppermint essential oil and solid lipid nanoparticles containing peppermint essential oil on the quality of cherry tomato fruit (*Solanum lycopersicum* cv. Santiago F1). The research was conducted using a completely randomized factorial design with three replications and sample of ten fruits per replication during a 28-day storage period at 8 °C at the laboratories of the Faculty of Pharmacy at Mashhad University of Medical Sciences and the Horticulture Science Laboratory at Ferdowsi University of Mashhad. On April 19, 2021, cherry tomatoes were harvested from a greenhouse at commercial maturity when 75% of the fruit surface color had turned red. Then the fruits were transferred to the horticultural science laboratory. The selection process focused on uniformity of shape, size, color, and absence of external damage, pests, and diseases. Then they were immersed in 1% sodium hypochlorite solution for 1 minute to disinfect the surface and afterwards rinsed with distilled water. Finally, the fruits were placed in different coating solutions. Distilled water was used to treat control fruits. The quality parameters studied included fruit juice percentage, juice density, soluble solids, fruit juice



©2025 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.2025.89741.1377>

acidity, fruit juice pH, total chlorophyll content, carotenoid levels, lycopene levels, anthocyanin content, flavonoid levels, flavonol levels, and electrolyte leakage in the fruits.

Results and Discussion

The results of this study indicated that fruits treated with solid lipid nanoparticles containing peppermint essential oil, particularly at a concentration of 0.2%, showed significantly higher levels of juice percentage (approximately 85%), acidity (around 51%), total chlorophyll content, as well as anthocyanin, flavonoid and flavonol content compared to those treated with free peppermint essential oil or the control group. However, the amount of soluble solids (approximately 54%), juice density (about 75%), juice pH, and lycopene and carotenoid content were found to be lower in comparison with those treated with free peppermint essential oil or the control group. This indicates that the application of this coating may slow down the ripening process, thereby preserving the fruit's color. This treatment also effectively reduced the amount of electrolyte leakage of fruit cell membranes (about 56%). However, free peppermint essential oil treatment at 0.1% and 0.2% concentrations had higher electrolyte leakage compared to the control group. This suggests that while peppermint essential oil can have a positive effect on preserving fruit quality, using it at higher concentrations may cause tissue damage and accelerate the softening process. These findings suggest that incorporating peppermint essential oil into solid lipid nanoparticles can enhance the overall quality and nutritional value of fruits, making them a healthier option for consumption. Additionally, the use of solid lipid nanoparticles may also help in controlling the release of peppermint essential oil, leading to a more sustained effect on fruit preservation. Therefore, incorporating the essential oil into solid lipid nanoparticles could be a more effective approach as it slows down the ripening process and helps maintain overall fruit quality.

Conclusions

In conclusion, our study has demonstrated the potential of solid lipid nanoparticles containing peppermint essential oil in preserving the quality and extending the shelf life of fruits. The use of these nanocapsules not only maintained the color, TA, and soluble solids of fruits but also prevented tissue damage and delayed the ripening process. This innovative approach could revolutionize fruit preservation methods and benefit both producers and consumers by reducing food waste and ensuring continuous availability of fresh, high-quality fruits. Further research on development of nanocapsules with different essential oils could open new horizons for enhancing the shelf life of various fruits and other perishable food products.

Keywords: Cold storage, Electrolyte leakage, Juice density, Lycopene

مقایسه اثر اسانس نعناع فلفلی (*Mentha × piperita* L.) به دو صورت آزاد و نانوکپسوله شده بر برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی میوه گوجه فرنگی گیلاسی (*Solanum lycopersicum* L.)

معصومه وکیلی قرطاول^۱ - حسین آروئی^{۱*} - شیوا گل محمدزاده^۲ - محبوبه ناصری^۳ - لیلا بندیان^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸

چکیده

گوجه فرنگی گیلاسی (*Solanum lycopersicum* L.) به دلیل داشتن مواد مغذی ضروری مانند قندها، اسیدها، ویتامین‌ها، مواد معدنی، ترکیبات فنلی، کاروتنوئیدهایی مانند لیکوپن نقش کلیدی در رژیم غذایی انسان دارند. با این حال، این میوه به دلیل خاصیت پسرسی، فسادپذیر بوده و ماندگاری کوتاهی دارد. این مطالعه با هدف بررسی اثر غلظت‌های مختلف (۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد) اسانس نعناع فلفلی و نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی بر خواص فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی میوه گوجه فرنگی گیلاسی رقم سانتیاگوی هلندی به مدت ۲۸ روز نگهداری در سردخانه با دمای هشت درجه سلسیوس انجام شد. نتایج نشان داد که میوه‌های تیمار شده با تیمار نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس به ویژه در غلظت ۰/۲ درصد، میزان آب میوه (حدود ۸۵ درصد)، اسیدیته کل (حدود ۵۱ درصد)، محتوای کلروفیل کل، محتوای آنتوسیانین، فلاونوئید و فلاونول بیشتری در مقایسه با میوه‌های تیمار شده با اسانس آزاد و گروه شاهد داشتند. با این حال، این تیمار میزان مواد جامد محلول (حدود ۵۴ درصد)، چگالی آب میوه (حدود ۷۵ درصد)، محتوای کاروتنوئید، لیکوپن و pH آب میوه کمتری در مقایسه با میوه‌های تیمار شده با اسانس آزاد و گروه شاهد داشتند. این تیمار همچنین به طور مؤثری میزان نشت الکترولیت غشاء سلولی میوه (حدود ۵۶ درصد) را کاهش داد، ولی میزان نشت الکترولیت میوه‌های تیمار شده با اسانس آزاد نعناع فلفلی در غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۲ درصد در مقایسه با گروه شاهد بالاتر بود. بنابراین، ترکیب اسانس با نانوذرات لیپیدی جامد می‌تواند کیفیت میوه را حفظ کرده و از آسیب بافتی جلوگیری کرده و فرایند رسیدن را به تأخیر بیندازد.

واژه‌های کلیدی: چگالی آب میوه، لیکوپن، نشت الکترولیت، نگهداری سرد

مقدمه

به عنوان مکمل غذایی مورد مصرف قرار می‌گیرد (Vats et al., 2022). کاروتنوئیدها رنگدانه‌های گیاهی هستند که به عنوان آنتی-اکسیدان عمل می‌کنند (Park et al., 2018). لیکوپن، کاروتنوئید اصلی موجود در گوجه فرنگی است که حدود ۸۰ درصد از کل کاروتنوئیدهای تولید شده را تشکیل می‌دهد و مؤثرترین آنتی‌اکسیدان برای از بین بردن رادیکال‌ها در بین کاروتنوئیدها محسوب می‌شود (Park et al., 2018). یکی از ویژگی‌های اصلی مرحله رسیدن گوجه فرنگی، تغییر رنگ میوه به وسیله سنتز کاروتنوئیدهایی مانند لیکوپن است که حتی در طول مدت انبارمانی نیز ادامه دارد (Choi & Park, 2023). با این حال، این میوه در طی مدت پس از برداشت عمر کوتاهی از خود نشان می‌دهد. گوجه فرنگی به عنوان میوه‌ای فرازگرا، در طول مدت حمل و نقل و نگهداری دچار تغییرات فیزیولوژیکی قابل

گوجه فرنگی گیلاسی (*Solanum lycopersicum* L.) منبع غنی از مواد مغذی ضروری از جمله ویتامین‌ها، مواد معدنی، کاروتنوئیدها، ترکیبات پلی فنولی و آنتی‌اکسیدان‌ها است که بیشتر در سالاد یا

۱- گروه مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه نانوفناوری دارویی و مرکز تحقیقات نانوفناوری، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران

۳- گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: aroiee@um.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.89741.1377>

توجهی می‌شود. برای کاهش این تغییرات فیزیولوژیکی، از اتمسفر کنترل‌شده، روش‌های شیمیایی و پوشش‌های مختلف استفاده می‌شود (Pérez-Soto et al., 2021). پوشش‌های خوراکی لایه نازکی هستند که روی میوه قرار می‌گیرند و به‌عنوان سد بین میوه و محیط پیرامون عمل می‌کنند (Sharma et al., 2019).

امروزه، استفاده از مواد زیست‌فعال^۱، که به‌عنوان پوشش برای محصولات استفاده می‌شود، به‌دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن، ایمنی و دوستدار محیط زیست بودن، توجه بسیار زیادی را به خود جلب کردند (Álvarez-Hernández et al., 2021; Vakili-Ghartavol et al., 2024a). در این مطالعه از اسانس نعناع فلفلی *Mentha × piperita* L. (PEO) استفاده شد که دارای خواص ضدعفونی‌کنندگی، اشتهاآوری، محرک معده، ضدتهوع و ضدخارش و همچنین مؤثر علیه بیمارگرهای مختلف گیاهی است (Mahendran & Rahman, 2020). فعالیت ضدقارچی این اسانس ممکن است به‌دلیل اثر هم‌افزایی تمام اجزاء آن، از جمله منتول، منتون، منتوفوران، ۱-۸-سینئول و مشتقات آن‌ها باشد (Oliveira et al., 2020; Passos Braga et al., 2020). برخی از مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از اسانس به‌عنوان پوشش خوراکی برای میوه‌ها ممکن است اثرات منفی بر یکپارچگی بافت میوه و غشاء سلولی داشته باشد. به‌عنوان مثال، استفاده از اسانس *Thymus kotschymanus* که عمدتاً از کارواکرول تشکیل شده است، روی میوه‌های گلایی و تیمول روی گریپ‌فروت «Ruby Red» منجر به کاهش سفتی و نرم شدن بافت میوه در مقایسه با گروه شاهد شد (Marandi et al., 2011; Yan et al., 2020). علاوه بر این‌ها، استفاده مؤثر از اسانس‌ها به‌دلیل تبخیر و تجزیه در شرایط نامناسب محیطی و شیمیایی (نور، اکسیژن، رطوبت، pH) دشوار است. بنابراین، تنظیم انتشار اسانس‌ها در فضای بسته-بندی برای جلوگیری از آسیب به محصولات باغبانی و تنظیم غلظت اسانس‌ها در بسته‌بندی برای جلوگیری از طعم نامطلوب در میوه‌ها بسیار مهم است (Álvarez-Hernández et al., 2021). برای به حداقل رساندن اثرات منفی احتمالی اسانس‌ها، شیوه نانوذرات لیپیدی جامد (SLN) استفاده شد (Vakili-Ghartavol et al., 2024a)، درحالی‌که برخی مطالعات برای بررسی اثربخشی SLN‌های حاوی اسانس‌ها بر مهار پوسیدگی قارچی انجام شده است، اکثر این مطالعات در شرایط آزمایشگاهی انجام شده است (Svetlichny et al., 2015; Nasser et al., 2016; Fazly Bazzaz et al., 2018). با این حال، مطالعات محدودی با استفاده از SLN‌های حاوی مواد فعال زیستی مختلف به‌طور مستقیم روی میوه انجام شده است (Zambrano-Zaragoza et al., 2013; Laein et al., 2022). مروری بر مقالات

اخیر نشان داده است که شیوه‌های کپسوله‌سازی مختلف و مواد فعال زیستی به‌عنوان پوشش‌های خوراکی بالقوه برای میوه‌ها و سبزیجات مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده ظرفیت آن‌ها در جلوگیری از رشد بیمارگر و حفظ کیفیت محصول است (Mirtalebi et al., 2020; Ansarifard et al., 2021; Locali-Pereira et al., 2020; Moradinezhad, 2022).

این مطالعه برای اولین بار با هدف ارزیابی اثر اسانس نعنای فلفلی آزاد، نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی، و غلظت‌های مختلف آن‌ها و امکان مقایسه آن‌ها بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گوجه‌فرنگی گیلاسی برای بررسی چگونگی تأثیر تیمارها در یک دوره ۲۸ روزه ارائه شده است. پیامدهای عملی این پژوهش می‌تواند برای کسانی که در مدیریت پس از برداشت و نگهداری مواد غذایی درگیر هستند، مفید باشد.

مواد و روش‌ها

اسانس نعناع فلفلی

مقادیر مختلف اسانس نعناع فلفلی (۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد) و پلی‌سوربات ۸۰ (۲/۵ درصد به‌عنوان سورفکتانت، سیگما، آلمان) مخلوط و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد و با استفاده از یک مخلوط‌کن (هدلف رکس تاپ، آلمان) در ۱۵۰ دور در دقیقه به مدت پنج دقیقه مخلوط شدند و بدین ترتیب محلول‌های پوششی تهیه گردید. گروه شاهد (غلظت صفر) تنها با استفاده از آب مقطر آماده شد. اجزاء موجود در اسانس نعناع فلفلی (*Mentha × piperita* L.) عمدتاً از مونوترپن‌های اکسیژن‌دار مانند منتول، منتون و مشتقات آن‌ها تشکیل شده‌اند که تقریباً ۹۴/۸ درصد از اسانس را تشکیل می‌دهند (Vakili-Ghartavol et al., 2022).

فرمولاسیون نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی

نانوذرات لیپیدی جامد حاوی/یا بدون اسانس نعناع فلفلی با استفاده از روش همگن‌سازی با برش بالا و روش اولتراسونیک فرموله شدند (Vakili-Ghartavol et al., 2024c). فاز لیپیدی حاوی پرسیرول (Gattefossé، فرانسه) با غلظت ۵ درصد به‌عنوان یک لیپید و پلی‌سوربات ۸۰ با غلظت ۲.۵ درصد به‌عنوان سورفکتانت، و فاز آبی شامل آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. هرکدام به‌طور جداگانه در داخل حمام آب گرم در دمای ۷۰-۷۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. پس از ذوب شدن فاز لیپید، فوراً اسانس نعناع فلفلی اضافه شد. سپس این ترکیبات به‌سرعت مخلوط شدند و فاز آبی داغ به فاز لیپیدی مذاب در حمام آب گرم با همان دما اضافه شد. این مخلوط با

سلسیوس به مدت ۲۸ روز نگهداری شدند. مشخصه‌های کیفی پس از برداشت میوه‌ها هر هفت روز یک بار در طول دوره نگهداری مورد ارزیابی قرار گرفت.

مشخصه‌های کیفی میوه در دوره پس از برداشت

میزان آب میوه و چگالی آب میوه

مقدار دو گرم بافت میوه پس از خشک شدن در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس با ترازوی با دقت ۰/۰۰۱ توزین شد و میزان درصد آب میوه براساس معادله زیر به دست آمد. سپس حجم دو میلی‌لیتر عصاره میوه با ترازو وزن شد و چگالی آب میوه براساس معادله ۱ و ۲ به دست آمد.

$$\text{درصد آب میوه} = \frac{\text{وزن ثانویه} - \text{وزن اولیه}}{\text{وزن اولیه}} \times 100 \quad (۱)$$

$$\text{چگالی آب میوه} = \frac{\text{وزن آب میوه (گرم)}}{\text{حجم آب میوه (میلی‌لیتر)}} \quad (۲)$$

میزان مواد جامد محلول، pH آب میوه و اسید آلی غالب آب میوه

برای اندازه‌گیری میزان مواد جامد محلول و میزان pH آب میوه به ترتیب از رفراکتومتر و دستگاه pH متر استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان اسید آلی غالب آب میوه، حدود ۲/۵ میلی‌لیتر آب میوه با چکاندن یک قطره معرف فنول فتالین یک درصد به آن، به وسیله سود ۰/۲ نرمال تیترا شد تا pH آب میوه به عدد ۸/۲ برسد و میزان سود مصرفی ثبت گردید. میزان اسید آلی غالب آب میوه (اسید سیتریک) برحسب گرم اسید در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب میوه یا درصد محاسبه و گزارش شد.

$$\text{میزان اسید غالب} = \frac{\text{اکی والان اسید غالب} \times \text{نرمالیتة سود} \times \text{حجم مصرفی}}{\text{حجم عصاره}} \times 100 \quad (۳)$$

میزان کلروفیل کل و کاروتنوئید میوه

پس از آسیاب کردن ۰/۱ گرم وزن تر نمونه با ازت مایع در هاون، مجدداً با پنج میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد آسیاب شد. سپس عصاره به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۲۷۰۰ سانتریفیوژ و محلول روشن‌آور برداشته و در یخچال نگهداری شد. سپس میزان سه میلی‌لیتر از محلول رویی را در کووت ریخته و میزان جذب آن در طول موج ۴۷۰، ۴۴۷ و ۶۶۳ نانومتر به وسیله اسپکتروفتومتری خوانده شد و غلظت کاروتنوئید و مقدار کلروفیل a, b و کل با فرمول زیر محاسبه گردید (Chen et al., 2018). غلظت رنگیزه‌های گیاهی (میلی گرم بر لیتر) با استفاده از معادله ۴ به دست آمد و نتایج به صورت میلی گرم بر گرم وزن تر میوه بیان شد.

استفاده از هموژنایزر دیاکس ۹۰۰ (هدلف، آلمان) به مدت ۴/۵ دقیقه همگن شد. پس از آن، امولسیون به دست آمده با استفاده از دستگاه پروپ سونیکاتور (Branson, ایالات متحده آمریکا) در پنج سیکل، با هر سیکل شامل ۶۰ ثانیه فراصوت با فواصل ۱۵ ثانیه‌ای انجام شد. پس از سرد شدن نمونه‌ها تا دمای اتاق، محلول‌های نانو ذرات لیپیدی جامد به دست آمد. علاوه بر این، فرمولاسیون نانو ذرات لیپیدی جامد بدون اسانس نعنای فلفلی با استفاده از روش مشابه تهیه شد.

آماده‌سازی میوه‌ها، اعمال پوشش‌ها و سردخانه

در روز سیام فروردین ۱۴۰۰، میوه‌های گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم سانتیاگوی هلندی (Solanum lycopersicum cv. Dutch) (Santiago) در زمان بلوغ تجاری که ۷۵ درصد سطح میوه قرمز شده بود، از گلخانه برداشت شد. سپس این میوه‌ها به سرعت به آزمایشگاه علوم باغبانی منتقل شدند. فرآیند انتخاب بر یکنواختی شکل، اندازه، رنگ و عدم وجود آسیب خارجی، آفات و بیماری‌ها متمرکز بود. در مجموع، ۱۴۷۰ میوه انتخاب و به طور کامل شسته شد تا هرگونه آلودگی سطحی از بین برود. سپس جهت ضد عفونی سطحی، میوه‌ها به مدت یک دقیقه در محلول هیپوکلریت سدیم یک درصد غوطه‌ور و سپس با آب مقطر شست‌وشو شدند. در نهایت، میوه‌ها به سرعت در محلول‌های پوششی مختلف قرار گرفتند. برای تیمار میوه‌های شاهد از آب مقطر استفاده شد.

غلظت‌های مختلفی از فرمولاسیون‌های اسانس نعنای فلفلی به صورت آزاد و کپسوله شده به صورت نانو ذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعنای فلفلی (صفر، ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد) آماده گردید. این غلظت‌ها براساس مطالعه قبلی نویسندگان و اثرات سمیت سلولی^۱ شناخته شده اسانس‌ها انتخاب شدند. مطالعه قبلی نشان داد که غلظت ۲۰۰۰ و ۱۰۰۰ میکرولیتر بر لیتر اسانس نعنای فلفلی به ترتیب رشد سوبه‌های قارچی *Rhizoctonia solani* و *Rhizopus stolonifer* را در شرایط آزمایشگاهی به طور کامل مهار کرد (Vakili-Ghartavol et al., 2022). علاوه بر این، با توجه به خواص سمیت سلولی اسانس‌ها (Yuan et al., 2019; Landi et al., 2021)، غلظت‌های بالاتر و پایین‌تر برای ارزیابی تأثیر آن‌ها بر بافت میوه‌های گوجه‌فرنگی و تعیین مؤثرترین غلظت برای حفظ کیفیت میوه مورد آزمایش قرار گرفت.

میوه‌ها در هر محلول به مدت تقریبی ۹۰ ثانیه غوطه‌ور شدند و سپس اجازه داده شد تا محلول اضافی تخلیه شود. پس از خشک شدن سطح میوه‌ها به مدت ۹۰ دقیقه در دمای اتاق در هوا، میوه‌ها در ظروف پلی اتیلنی بسته‌بندی شدند و در سردخانه با دمای هشت درجه

میزان فلاونول میوه

مقدار ۲۰۰ میکرولیتر عصاره متانولی با دو میلی لیتر متانول و ۱۰۰ میکرولیتر آلومینیوم کلرید پنج درصد در متانول مخلوط شد و سپس به وسیله متانول به حجم پنج میلی لیتر رسانده شد و پس از ۳۰ دقیقه میزان جذب در طول موج ۴۲۵ نانومتر قرائت گردید (Popova et al., 2004). برای رسم منحنی استاندارد از کوئرتستین با غلظت‌های صفر، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ میکروگرم بر میلی لیتر استفاده شد.

میزان فلاونوئید میوه

مقدار ۲۵۰ میکرولیتر از عصاره متانولی با سدیم نیتريت ۵ درصد مخلوط شد، بعد از گذشت پنج دقیقه، ۳۰۰ میکرولیتر کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد و پس از شش دقیقه ۲۰۰۰ میکرولیتر سود یک مولار به مخلوط اضافه شد. بلافاصله پس از اضافه کردن ۲۴۰۰ میکرولیتر آب مقطر، ظرف واکنش به خوبی هم زده شد. سپس میزان جذب در طول موج ۵۱۰ نانومتر خوانده شد (Kim et al., 2003). برای رسم منحنی استاندارد از کاتچین با غلظت‌های صفر، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ میکروگرم بر میلی لیتر استفاده شد.

نشت الکترولیت میوه

برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت، قطعات میوه به میزان دو گرم تهیه و در لوله فالكون حاوی ۱۰ میلی لیتر آب مقطر روی شیکر به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت و در این مرحله هدایت الکتریکی اول (EC1) به وسیله دستگاه هدایت‌سنج اندازه‌گیری و سپس لوله فالكون جهت کشته شدن سلول‌های میوه به اتوکلاو با دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱/۲ اتمسفر به مدت ۲۰ دقیقه منتقل شد و هدایت الکتریکی دوم (EC2) پس از سرد شدن محتویات داخل لوله اندازه‌گیری گردید، در نهایت مقدار نشت الکترولیت از طریق معادله ۷ به دست آمد (Zhao et al., 2009).

$$EL = \left(\frac{EC1}{EC2} \right) \times 100 \quad (7)$$

آنالیز داده‌ها

این پژوهش در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و ۱۰ میوه در هر تکرار انجام شد. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 24.0 تجزیه و تحلیل گردید. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ استفاده شد. شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2013 رسم شدند.

$$C_a = 12.25 A_{663.2} - 2.79 A_{646.8} \quad (4)$$

$$C_b = 21.21 A_{646.8} - 5.1 A_{663.2}$$

$$C_T = C_a + C_b$$

$$Car = \frac{1000 A_{470} - 1.8 C_a - 85.02 C_b}{198}$$

میزان لیکوپین میوه

مقدار ۰/۶ گرم نمونه تر با ازت مایع در هاون چینی پودر شده و مقدار پنج میلی لیتر استون، پنج میلی لیتر اتانول ۹۶ درصد و ۱۰ میلی لیتر هگزان به فالكون ریخته شد و فالكون حاوی عصاره و مواد الکلی درون ظرف یخ قرار داده شد. فالكون‌ها به مدت ۲۰ دقیقه روی شیکر با سرعت ملایم (۱۵۰ دور در دقیقه) قرار گرفتند و آن‌گاه به هر فالكون میزان سه میلی لیتر آب مقطر دوبار تقطیر اضافه شد و پس از شیک شدن به مدت پنج دقیقه، فالكون‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در جای ثابت قرار گرفتند تا فازهای محلول جدا شود (دوفاز شود). پس از آن، قسمت روشن‌ر (همان قسمت هگزانی) به سل کوارتز برای قرائت ریخته شد، پس از کالیبره نمودن دستگاه اسپکتوفتومتری با حلال هگزان (به عنوان بلانک) مقدار جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۰۳ نانومتر خوانده شد و براساس معادله ۵ مقدار لیکوپین برحسب میکروگرم بر گرم بافت تر میوه محاسبه گردید (Wójtowicz et al., 2018).

$$Lycopene \left(\frac{mg}{kgFW} \right) = \frac{A_{503} \times 31.2}{g \text{ tissue}} \quad (5)$$

میزان آنتوسیانین میوه

میزان ۰/۱ گرم بافت میوه را با دقت وزن شد و در هاون حاوی ۱۰ میلی لیتر متانول اسیدی (متانول و اسید کلریدریک به نسبت ۹۹ به ۱)، خوب سائیده، سپس در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی قرار داده شد و پس از سانتریفیوژ شدن به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه، محلول رویی برداشته شد و شدت جذب آن در طول موج ۵۵۰ نانومتر به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. برای بلانک از متانول اسیدی استفاده شد و غلظت آنتوسیانین از معادله ۶ محاسبه گردید (Nadernejad et al., 2013).

$$A = \varepsilon BC \quad (6)$$

که در آن، A: مقدار عدد جذب خوانده شده، B: عرض کووت (یک سانتی متر)، ε: ضریب خاموشی (33000 cm⁻¹mol⁻¹) و C: غلظت آنتوسیانین است. عدد به دست آمده در ۱۰^۶ ضرب شد تا نتایج برحسب میکرومول بر گرم وزن تر (بر حسب میلی گرم بر ۱۰۰ گرم وزن تر) ارائه گردد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از میانگین مربعات (جدول ۱) نشان داد که اثر ساده فرمولاسیون، غلظت، زمان، اثر متقابل فرمولاسیون در غلظت، اثر متقابل فرمولاسیون در زمان، اثر متقابل غلظت در زمان و اثر متقابل فرمولاسیون و غلظت و زمان بر چگالی آب میوه، مقدار آب میوه، مواد جامد محلول، اسید قابل تیتر، میزان pH، میزان کلروفیل کل، کاروتنوئید، لیکوپن، آنتوسیانین، فلاونوئید، فلاونول و میزان نشت الکترولیت میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم سانتیاگوی هلندی در سطح اطمینان یک و پنج درصد معنی‌دار بودند.

میزان آب میوه‌ها و چگالی آب میوه‌ها

نتایج نشان داد که در طول مدت نگهداری میوه‌ها در سردخانه، میزان آب میوه‌ها به تدریج کاهش و میزان چگالی آب میوه‌ها به تدریج افزایش یافت (شکل ۱). با این حال، میوه‌های تیمار شده درصد آب میوه

بیشتر و میزان چگالی آب کمتری نسبت به گروه شاهد داشتند. پس از ۲۸ روز نگهداری، گوجه‌فرنگی‌های گیلاسی تیمار شده با غلظت ۰/۲ درصد نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی (PEO-SLN-) ۰.۲ دارای بیشترین درصد آب میوه (۷۹/۸۱ درصد، شکل A۱) و کمترین میزان چگالی آب (۰/۹۸ گرم بر میلی‌لیتر، شکل B۱) بودند که به‌طور قابل توجهی ۸۵ درصد آب میوه بیشتر و ۷۵/۱ درصد چگالی آب کمتری نسبت به میوه‌های شاهد داشتند. این تفاوت در میزان درصد آب میوه و میزان چگالی آب میوه را می‌توان به استفاده از تیمارهای پس از برداشت نسبت داد که احتمالاً پوشش‌ها با ایجاد یک مانع فیزیکی روی پوست میوه از تبخیر و تعرق جلوگیری کرده و میزان آب میوه را حفظ کردند و برای همین میزان درصد آب میوه بیشتر و چگالی آب میوه کمتری را در میوه‌های تیمار شده با پوشش‌ها و اسانس‌های مختلف گزارش کردند (Dhital et al., 2018; Locali-Pereira et al., 2021).

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم 'سانتیاگوی هلندی' در مدت زمان ۲۸ روز انبارداری در دمای هشت درجه سلسیوس

Table 1- Variance analysis of quantitative and qualitative traits of cherry tomato fruit 'Dutch Santiago' during 28 days of storage at 8°C

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares					درصد آب میوه Juice percentage
		نشت الکترولیت Electrolyte leakage	اسید کل Titratable acidity	مواد جامد محلول Total soluble solids	pH	چگالی آب میوه Juice density	
فرمولاسیون Formulation	1	4772**	0.642**	40.6**	0.074**	0.358**	2200**
غلظت Concentration	5	299**	0.157**	4.62**	0.049**	0.210**	480**
زمان Time	4	8225**	1.83**	51.9**	0.767**	0.814**	3748**
فرمولاسیون × غلظت Formulation × concentration	5	432**	0.011**	0.330**	0.003**	0.007**	53.4**
فرمولاسیون × زمان Formulation × time	3	661**	0.088**	2.70**	0.006**	0.024**	340**
غلظت × زمان Concentration × time	19	45.1**	0.016**	0.397**	0.003**	0.032**	64.5**
فرمولاسیون × غلظت × زمان Formulation × concentration × time	15	63.9**	0.005**	0.112*	0.001*	0.002**	15.6**
خطا Error	106	8.08	0.003	0.059	0.001	0.001	1.69
ضریب تغییرات CV (%)		24.5	20.8	22.4	3.1	17.6	11

ns، * و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی‌داری

ns, *, and **: significant at the 1% and 5% probability levels, and non-significant, respectively

ادامه جدول ۱- تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم 'سانتی‌آگوی هلندی' در مدت زمان ۲۸ روز انبارداری در دمای هشت درجه سلسیوس

Table 1- Variance analysis of quantitative and qualitative traits of cherry tomato fruit 'Dutch Santiago' during 28 days of storage at 8°C

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares					
		فلاونوئید Flavonoid	فلاونول Flavonol	آنتوسیانین Anthocyanin	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid	لیکوپن Lycopene
فرمولاسیون Formulation	1	8.76**	0.593**	1.10**	13.3**	23.4**	407**
غلظت Concentration	5	2.11**	0.564**	0.315**	3.61**	2.91**	38.9**
زمان Time	4	5.06**	1.10**	0.942**	33.9**	43.1**	655**
فرمولاسیون × غلظت Formulation × concentration	5	0.329**	0.058**	0.035**	1.54**	1.47**	26.3**
فرمولاسیون × زمان Formulation × time	3	2.59**	0.342**	0.256**	1.52**	2.89**	47.7**
غلظت × زمان Concentration × time	19	0.144**	0.047**	0.021**	0.297**	0.251**	4.70**
فرمولاسیون × غلظت × زمان Formulation × concentration × time	15	0.115	0.023**	0.011**	0.227**	0.302**	5.17**
خطا Error	106	0.009	0.008	0.006	0.021	0.023	1.12
ضریب تغییرات CV (%)		20.9	13.1	27.7	22.2	20.5	19.9

ns و *، **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی‌داری

ns, *, and **: significant at the 1% and 5% probability levels, and non-significant, respectively

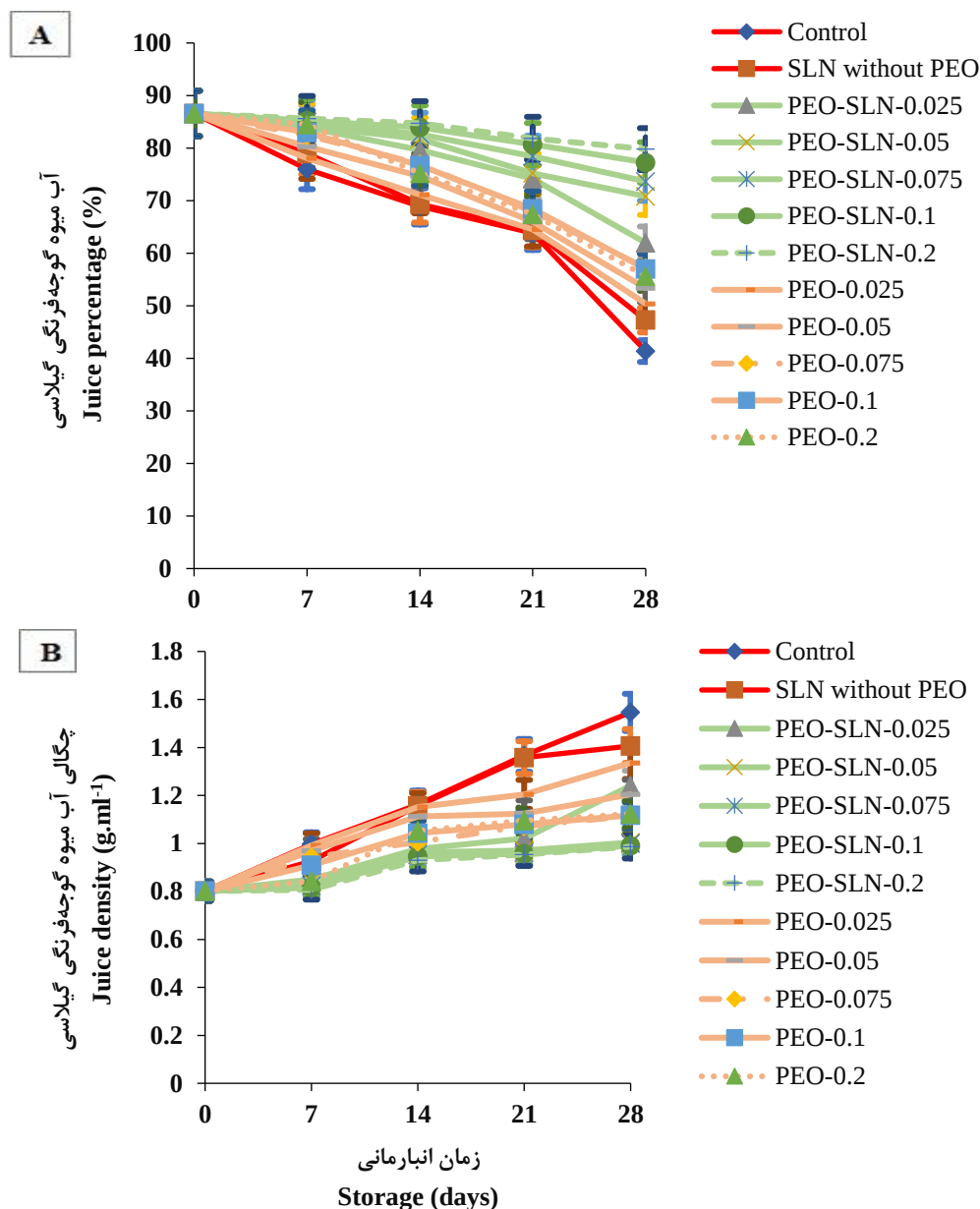
مواد جامد محلول (TSS)، اسیدیته آب میوه (TA) و pH آب میوه

مطالعه خواص فیزیکی‌وشیمیایی میوه از جنبه‌های حیاتی در تعیین کیفیت میوه محسوب می‌شود. بررسی محتوای مواد جامد محلول، اسیدیته قابل تیتراسیون و pH آب میوه از شاخص‌های ضروری و رایج برای بررسی خواص فیزیکی‌وشیمیایی میوه می‌باشند (Matabura & Kibazohi, 2021). تغییر در محتوای مواد جامد محلول، اسیدیته قابل تیتراسیون آب میوه و pH آب میوه در میوه‌های تیمار شده در شکل ۲ آمده است. نتایج این مطالعه نشان داد که در طول مدت نگهداری، به‌طور کلی میزان مواد جامد محلول میوه و میزان pH آب میوه به تدریج افزایش و میزان اسیدیته قابل تیتراسیون آب میوه به تدریج کاهش یافت (شکل‌های ۲، A، B و C). با این حال، میوه‌های تیمار شده در مقایسه با گروه شاهد، میزان مواد جامد محلول کل و pH آب میوه کمتر (شکل A۲ و B۲) و میزان اسیدیته قابل تیتراسیون بالاتری (شکل C۲) داشتند. پس از ۲۸ روز نگهداری در

چگالی میوه نه تنها بر کیفیت میوه تازه تأثیر می‌گذارد، بلکه تأثیر بسزایی بر محصولات فرآوری شده آن نیز دارد. چگالی میوه با شیرینی میوه در هنگام برداشت مرتبط است (Wang et al., 2022). وانگ و همکاران (Wang et al., 2022) انگورهای رسیده (*Vitis vinifera* L.) را براساس چگالی آن‌ها در هنگام برداشت جدا کردند و دریافتند که میوه‌های خشک با چگالی بالاتر، طعم و بافت بهتری داشتند. علاوه بر این، در یک تحقیق مشاهده شد که غلظت اکسید رز (یک نوع مونوترپن است که به عنوان یک شاخص مفید برای شناسایی و انتخاب ارقام انگور رومیزی براساس عطر کاربرد دارد) در انگور به وضوح تحت تأثیر چگالی میوه قرار گرفت و مشخص شد که در حبه‌های انگور با چگالی بالا بیشتر است (Rolle et al., 2015). جرم در واحد حجم (چگالی) آب میوه‌ها به‌طور کلی با افزایش زمان نگهداری افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل اثر از دست دادن رطوبت از طریق تبخیر باشد (Shahkoomahally & Ramezani, 2015).

بریکس، pH برابر با ۴/۵۶ و ۰/۵۶ درصد) و بالاترین میزان مواد جامد محلول کل و pH و پایین‌ترین میزان اسیدیته آب میوه مربوط به گروه شاهد (۸/۳۶ بریکس، pH برابر با ۴/۸۴ و ۰/۱۸ درصد) بودند.

سردخانه، پایین‌ترین میزان مواد جامد محلول کل و pH و بالاترین میزان اسیدیته آب میوه مربوط به غلظت ۰/۲ درصد نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی (PEO-SLN-0.2) (به ترتیب با ۵/۹



شکل ۱- درصد آب میوه (A) و چگالی آب میوه (B) در گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم 'سانتیاگو هلندی' پوشش داده‌شده با اسانس نعناع فلفلی (PEO) و فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی (PEO-SLN) در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در سردخانه در دمای هشت درجه سلسیوس

Figure 1- The percentage of fruit juice (A) and the fruit juice density (B) in cherry tomatoes 'Dutch Santiago' coated with peppermint oil (PEO) and formulations of solid lipid nanoparticles containing peppermint oil (PEO-SLN), over a storage period of 28 days in a refrigerator at 8°C

مواد جامد محلول بر کیفیت طعم میوه تأثیر می‌گذارد و به‌عنوان شاخصی از رسیدن و شاخصی از مقدار مواد معدنی محلول و قند موجود در میوه‌ها در نظر گرفته می‌شود (Abiso et al., 2015). پدیده افزایش مواد جامد محلول در طول مدت نگهداری بیشتر به مرحله رسیدن و همچنین تبدیل کربوهیدرات و بیوستتر نسبت داده می‌شود (Al-Dairi et al., 2021). رسیدن در طول مدت نگهداری به تجزیه مواد پکتین به قند ساده (الیگوساکاریدها) کمک می‌کند و در نتیجه مواد جامد محلول در طول زمان افزایش می‌یابد (Munhuwiyi, 2012). قندها اجزای اصلی مواد جامد محلول در میوه گوجه‌فرنگی هستند و مقدار مواد جامد محلول در اثر هیدرولیز کربوهیدرات‌ها به قندها در طول فرآیند رسیدن افزایش می‌یابد (Peralta-Ruiz et al., 2020). نتایج مطالعه حاضر مطابق با یافته‌های تیگست و همکاران (Tigist et al., 2013) بود که تغییرات قابل توجهی در مواد جامد محلول گوجه‌فرنگی در شرایط دمایی اتاق به‌دلیل هیدرولیز کربوهیدرات‌ها به قندهای محلول و از دست دادن شدید آب در طول دوره نگهداری ۳۲ روزه گزارش کردند. در میوه کارامبول، یک کامپوزیت پوششی مبتنی بر آلژینات با پوشش اسانس زیتون به کاهش تجمع محتوای جامد محلول کمک کرد (Baraiya et al., 2014). تجمع کمتر محتوای مواد جامد محلول در میوه‌ها در طول انبار را می‌توان به کاهش فعالیت آنزیم‌های هیدرولیز، کاهش فعالیت متابولیک، کاهش سرعت تنفس و تبادل گازی نسبت داد که می‌تواند تجزیه مواد مغذی را به تأخیر بیندازد (Dong & Wang, 2018).

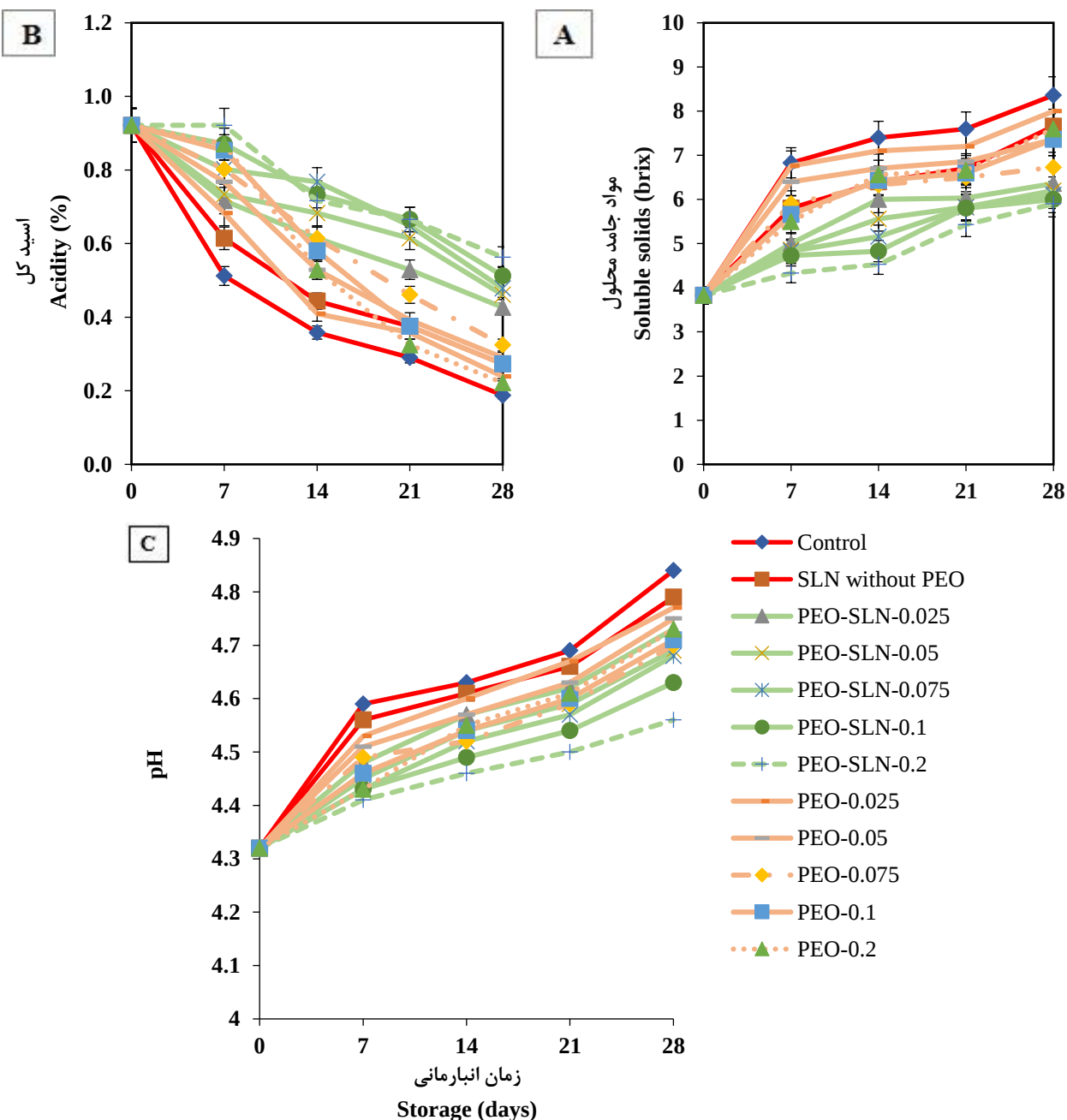
علاوه بر این، اسیدیته بیشتر برای ارزیابی ماندگاری محصول و بررسی برخی تغییرات شیمیایی در طول دوره نگهداری استفاده می‌شود (Matabura & Kibazohi, 2021). مقدار اسیدیته آب میوه مربوط به محتویات اسید آلی در میوه گوجه‌فرنگی است که عمدتاً اسید سیتریک و اسید آسکوربیک می‌باشد. اسیدهای غالب میوه‌ها باعث احساس مزه ترشی می‌شوند. اسیدها معمولاً بعد از شروع رسیدن طی تنفس مصرف می‌شوند و غلظت آن‌ها کاهش می‌یابد (Peralta-Ruiz et al., 2020). در یک مطالعه، نیروپاما و همکاران (Nirupama et al., 2010) بیان کردند که تغییرات اسیدیته آب میوه در طول مدت نگهداری عمدتاً به فعالیت‌های متابولیکی بافت‌های زنده گوجه‌فرنگی که در آن تخلیه اسید آلی اتفاق می‌افتد نسبت داده می‌شود. حاتمی و همکاران (Hatami et al., 2013) همچنین تأکید کردند که کاهش اسیدیته آب میوه می‌تواند به‌میزان رسیدن و تنفس بیشتر مربوط باشد که در آن اسیدهای آلی می‌توانند به‌عنوان یک

بستر در طول فرآیند تنفس یا به‌دلیل تبدیل به قندهای دیگر مورد استفاده قرار گیرند. کاهش مقدار اسید کل میوه‌ها در طول پس از برداشت مربوط به متابولیسم آن‌ها و استفاده از آن‌ها به‌عنوان سوبسترای تنفسی در طول رسیدن محصول است (Ortiz et al., 2021; Álvarez-Hernández et al., 2013). بنابراین، پوشش‌ها با ایجاد لایه محافظ اطراف میوه مانع ورود اکسیژن به میوه، کاهش میزان تنفس و کاهش تبدیل اسید آلی به قندها می‌شوند (Srinivasa et al., 2002; Jodhani & Nataraj, 2019).

افزایش pH در طول مدت نگهداری مربوط به استفاده از اسیدهای آلی به‌عنوان سوبسترای تنفسی میوه است (Locali-Pereira et al., 2021) و به‌طور کلی با افزایش تعداد روزهای نگهداری میزان pH افزایش می‌یابد (Dhital et al., 2018). همچنین گزارش شده است که مقدار pH گوجه‌فرنگی با افزایش مدت زمان نگهداری، رسیدن و تنفس گوجه‌فرنگی افزایش می‌یابد (Abiso et al., 2015). در مورد مدت زمان نگهداری، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج دیتال و همکاران (Dhital et al., 2017) مطابقت داشت که افزایش pH را در طول مدت نگهداری مشاهده کردند که می‌تواند به‌دلیل افزایش اکسیژن بر سرعت تنفس میوه باشد. استفاده از اسانس‌ها در بسته‌بندی می‌تواند با کاهش سرعت تنفس به میوه‌ها برای حفظ pH پایدار در طول ذخیره‌سازی کمک کند (Locali-Pereira et al., 2021). نتایج مغایری در مطالعات سایر محققان نیز مشاهده شد. در یک پژوهش، تیمار میوه‌های گلایی با اسانس‌های *Thymus kotschyanus* (با ترکیب غالب کارواکرول)، *Ocimum basilicum* (با ترکیب غالب لینالول) و *Rosmarinus officinalis* تأثیری بر میزان pH نداشتند (Marandi et al., 2011).

محتوای کلروفیل کل، کاروتنوئید و لیکوپین

تغییر در محتوای کلروفیل کل، کاروتنوئید و لیکوپین در میوه‌های تیمار شده در شکل ۳ آمده است. نتایج نشان داد که در طول مدت نگهداری، به‌طور کلی میزان کلروفیل کل به‌تدریج کاهش و میزان کاروتنوئید و لیکوپین به‌تدریج افزایش یافت (شکل‌های ۳، A، B و C). باین‌حال، میوه‌های تیمار شده با فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی کاهش کمتری از نظر محتوای کلروفیل و افزایش کمتری از نظر محتوای کاروتنوئید و لیکوپین نشان دادند که نشان‌دهنده تغییرات رنگ کمتر در میوه‌ها است.



شکل ۲- مواد جامد محلول (A)، اسیدیته (B) و pH آب میوه (C) در گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم 'سانتیاگوی هلندی' پوشش داده‌شده با اسانس نعناع فلفلی (PEO) و فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی (PEO-SLN) در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در سردخانه در دمای هشت درجه سلسیوس

Figure 2- Soluble solids (A), acidity (B), and fruit juice pH (C) in cherry tomatoes 'Dutch Santiago' coated with peppermint oil (PEO) and formulations of solid lipid nanoparticles containing peppermint oil (PEO-SLN), over a storage period of 28 days in a refrigerator at 8°C

وزن تر میوه) و اسانس نعناع فلفلی به‌صورت آزاد بود (شکل ۳C). این نتایج با یافته‌های اترش و همکاران (Atrash et al., 2018) هم‌خوانی داشت که گزارش کردند، میوه لیمو با پوشش اسانس مرزه (*Satureja hortensis*)، میزان کلروفیل بالاتری در مقایسه با گروه

در این پژوهش، کمترین مقدار لیکوپن (۱۶/۱ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تر میوه) مربوط به میوه‌های تیمار شده با فرمولاسیون نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی، به‌ویژه در غلظت ۰/۲ درصد، در مقایسه با گروه شاهد (۲۵/۶ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم

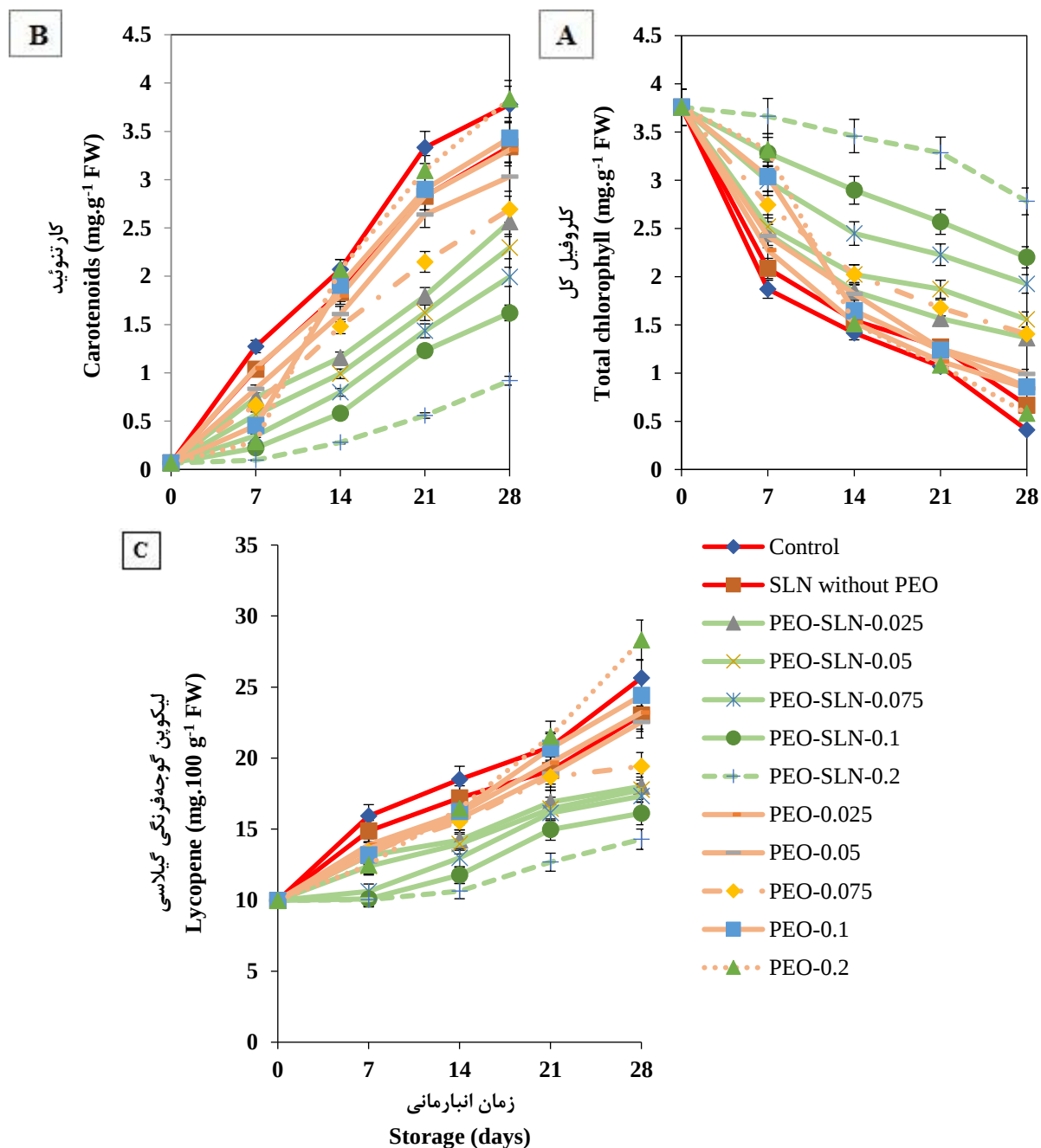
شاهد داشت. همچنین این نتایج با یافته‌های پرومال و همکاران (Perumal et al., 2021) مطابقت داشت که گزارش کردند، رنگ پوست میوه‌های انبه (*Mangifera indica*, L.) در هنگام رسیدن به دلیل تخریب کلروفیل و سنتز کاروتنوئیدهای فیتوشیمیایی از رنگ سبز به رنگ زرد متمایل شد که نشان‌دهنده مرحله رسیدن میوه می‌باشد.

در این پژوهش، میوه‌های گوجه‌فرنگی گیلاسی در زمان بلوغ تجاری که تقریباً ۷۰ درصد سطح میوه رنگ گرفته بود، برداشت شدند. این میوه‌ها جزء میوه‌های فرازگرا هستند که خاصیت پس‌رسی دارند (Quinet et al., 2019). تغییر رنگ از جمله واضح‌ترین تغییرات زمان رسیدن محسوب می‌شود که معمولاً با از دست دادن کلروفیل و رنگ سبز و ظاهر شدن رنگ‌های دیگر مانند زرد، نارنجی، قرمز ناشی از رنگیزه‌هایی مثل کاروتنوئید و آنتوسیانین‌ها همراه است. تغییر رنگ میوه گوجه‌فرنگی در طول رسیدن به دلیل انتقال از کلروپلاست به کروموپلاست است که با تخریب کلروفیل و سنتز کاروتنوئیدها ایجاد می‌شود (Park et al., 2018). تخریب کلروفیل و انباشته شدن کاروتنوئیدها نشانه‌هایی از فرآیند رسیدن و قرمز شدن گوجه‌فرنگی است (Jia et al., 2022). سنتز کاروتنوئید، به‌ویژه تجمع لیکوپن، با رنگ قرمز میوه گوجه‌فرنگی ارتباط دارد (Cox et al., 2003). مطالعات نشان دادند که محتوای کاروتنوئیدها و کلروفیل در میوه‌ها در طول مدت نگهداری به دما، نور، رطوبت، متابولیسم، اعمال پوشش‌های پس از برداشت روی میوه‌ها نیز بستگی دارند (Zambrano-Zaragoza et al., 2013; Park et al., 2018; Choi & Park, 2023). همچنین، محتوای کلروفیل و کیفیت فیزیکی گوجه‌فرنگی در مرحله پس از برداشت به دلیل رطوبت و تنفس بالا با افزایش زمان نگهداری کاهش می‌یابد که منجر به قرمز شدن و نرم شدن گوجه‌فرنگی می‌شود (Jia et al., 2022). رنگ قرمز گوجه‌فرنگی به دلیل غلظت بالای لیکوپن است (Javanmardi & Kubota, 2006; Buendía et al., 2019). افزایش غلظت لیکوپن در گوجه‌فرنگی گیلاسی نیز در طول مدت نگهداری به‌طور مستقیم با مرحله رسیدن میوه و شرایط نگهداری میوه در ارتباط می‌باشد (Fagundes et al., 2015). مقدار رنگیزه لیکوپن در میوه‌های توت‌فرنگی با افزایش زمان نگهداری به‌طور معنی‌دار افزایش یافت و میوه‌های شاهد افزایش بیشتری در مقدار لیکوپن داشتند که نشان‌دهنده سرعت بالاتر در مرحله رسیدن بود (Jodhani & Nataraj, 2019). نتایج این مطالعه با نتایج زامبرانو ساراگوسا (Zambrano-Zaragoza et al., 2013) مطابقت داشت

که گزارش کردند، میوه‌های تیمار شده گواوا (*Psidium guajava* L.) با ۶۰ و ۶۵ گرم در لیتر نانوذرات لیپیدی جامد به دلیل کاهش متابولیسم و متعاقب آن تأخیر در تجزیه کلروفیل منجر به تأخیر در تغییر رنگ میوه شد. حفظ کلروفیل کل احتمالاً به دلیل تأثیر پوشش‌های خوراکی در کاهش سرعت تنفس با ایجاد یک مانع فیزیکی باشد که فعالیت کلروفیل‌از را کاهش می‌دهد (Jodhani & Nataraj, 2019). تأخیر در تغییر رنگ میوه می‌تواند به دلیل استفاده از پوشش باشد که احتمالاً فرآیند رسیدن را به تأخیر انداخته و در نتیجه رنگ میوه حفظ می‌شود (Wani et al., 2021).

محتوای آنتوسیانین، فلاونوئید و فلاونول

در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در سردخانه در دمای هشت درجه سلسیوس، محتوای آنتوسیانین، فلاونوئید و فلاونول در میوه‌های تیمار شده به‌صورت ناهمگن و در میوه‌های تیمار شده با فرمولاسیون نانوذرات لیپیدی جامد فاقد اسانس نعنای فلفلی و همچنین گروه شاهد به‌صورت تدریجی کاهش یافت (شکل ۴). این کاهش احتمالاً به دلیل افزایش فرآیندهای اکسیداتیو بود. با توجه به نتایج، میوه‌های تیمار شده، مقادیر بالاتری از این ترکیبات را در مقایسه با گروه شاهد نشان دادند. با این حال، میوه‌های تیمار شده با فرمولاسیون نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعنای فلفلی محتوای آنتوسیانین، فلاونوئید و فلاونول بالاتری را در مقایسه با میوه‌های تیمار شده با اسانس نعنای فلفلی به‌صورت آزاد نشان دادند که نشان‌دهنده کاهش فرآیندهای اکسیداتیو بود. مقادیر این ترکیبات در میوه‌های تیمار شده با اسانس نعنای فلفلی به‌صورت آزاد و فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعنای فلفلی به‌ترتیب تا روز هفتم و چهاردهم افزایش یافت. سپس مقادیر آن‌ها روند کاهشی داشت. این نتیجه نشان داد که هر دو تیمار در حفظ ترکیبات فنولی مؤثر بودند، تیمار اسانس نعنای فلفلی به‌صورت آزاد در کوتاه‌مدت و فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعنای فلفلی نسبتاً در بلندمدت مؤثر بودند. در روز بیست و هشتم، بیشترین محتوای آنتوسیانین (۰/۸۴ میکرومول بر گرم وزن تر میوه)، فلاونوئید (۳/۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر میوه) و فلاونول (۲/۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر میوه) مربوط به غلظت ۰/۲ درصد نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعنای فلفلی (PEO-SLN-) (0.2) بود که به‌ترتیب ۲/۸، ۲/۱ و ۱/۵ برابر بیشتر از شاهد (۰/۲۹ میکروگرم بر ۱۰۰ گرم وزن تر میوه، ۱/۴۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر میوه و ۱/۳۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر میوه) بودند.



شکل ۳- محتوای کلروفیل کل (A)، کاروتنوئید (B) و لیکوپن (C) میوه در گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم 'دutch سانتیاگو' هلندی پوشش داده شده با اسانس نعناع فلفلی (PEO) و فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی (PEO-SLN) در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در سردخانه در دمای هشت درجه سلسیوس

Figure 3- Total chlorophyll (A), carotenoids (B), and lycopene (C) content in cherry tomatoes 'Dutch Santiago' coated with peppermint oil (PEO) and formulations of solid lipid nanoparticles containing peppermint oil (PEO-SLN), over a storage period of 28 days in a refrigerator at 8°C

چندین مطالعه یافته‌های مشابهی را گزارش کردند. به‌عنوان مثال، محتوای آنتوسیانین در توت‌فرنگی با پوشش لیپوزوم بیشتر از آلزینات و شاهد و در توت‌فرنگی با پوشش آلزینات بیشتر از شاهد به‌طور قابل توجهی در سطح

بالاتر بودن مقادیر این ترکیبات در مقایسه با گروه شاهد را می‌توان به توانایی این تیمارها در عمل به‌عنوان یک مانع در برابر عوامل مختلف از جمله تبادل گاز، فرآیندهای اکسیداتیو و فعالیت پلی فنول اکسیداز نسبت داد (Wang et al., 2017; Bandian et al., 2024;)

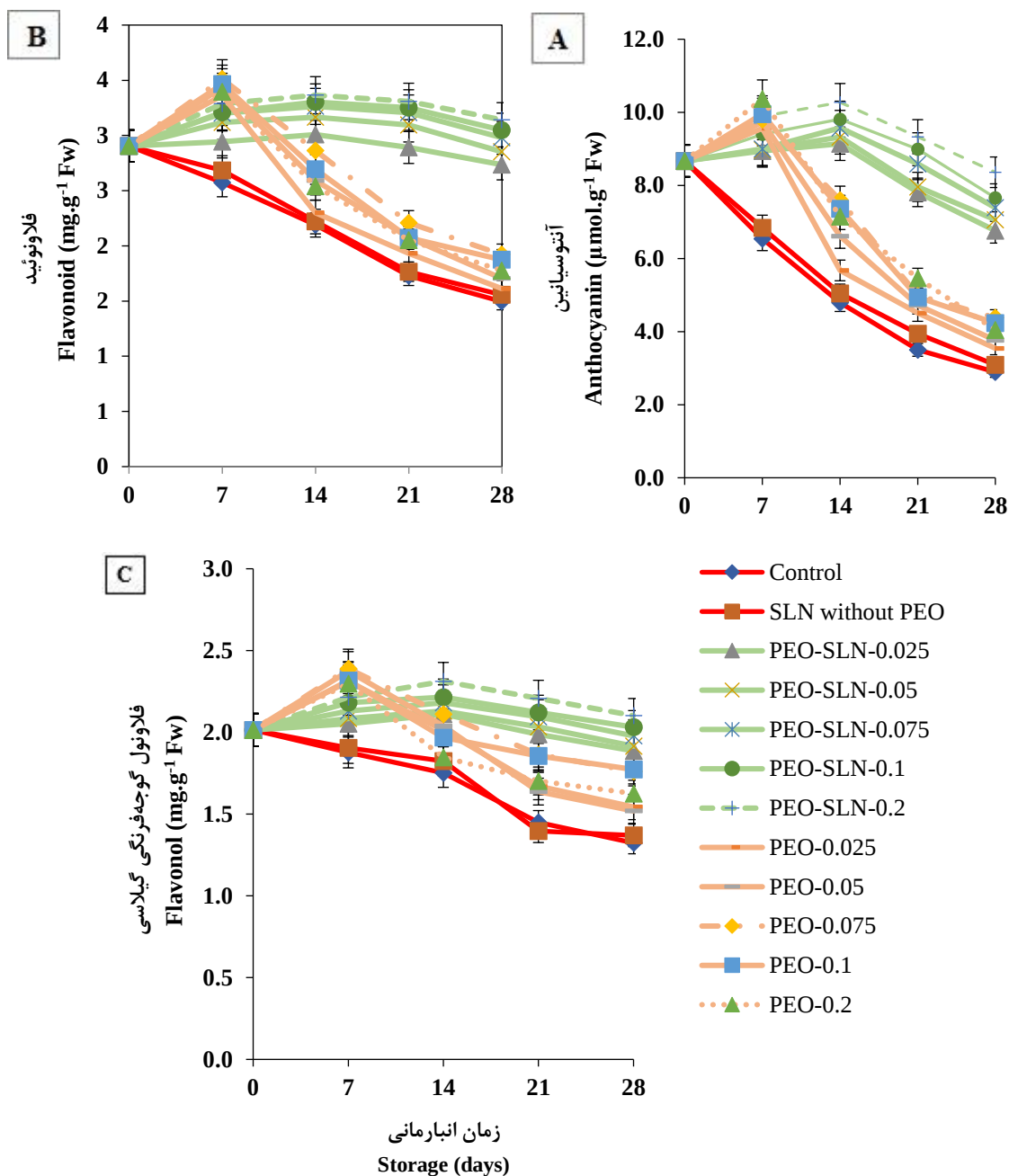
اطمینان پنج درصد بود (Dhital et al., 2018). این مطالعه همچنین نشان داد که میزان این ترکیبات در میوه‌های تیمار شده با فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی بیشتر از میوه‌های تیمار شده با اسانس نعناع فلفلی به صورت آزاد بود. این افزایش را می‌توان به آزادسازی تدریجی اسانس از نانوکپسول‌ها نسبت داد که سدی محافظ در برابر تخریب توسط اکسیژن، نور و دما ایجاد کرد (Taheri et al., 2020). همچنین اعتقاد بر این است که انتشار اسانس موجب اعمال تنش خفیف می‌شود که سازوکارهای دفاعی گیاه را فعال می‌کند و منجر به افزایش محتوای ترکیبات فنولی (فلاونول و فلاونوئید) می‌شود (Mohammadi et al., 2021). ترکیبات فنلی مانند نارینجین کالکون و فلاونول‌های نوع کوئرستین دسته مهم دیگری از ترکیبات فیتوشیمیایی میوه گوجه‌فرنگی هستند (Migliori et al., 2017). در یک آزمایش در بررسی اثر اسانس آویشن شیرازی، کیتوزان و پروپولیس طی پس از برداشت میوه گوجه‌فرنگی گزارش شد که میزان فلاونول در گروه شاهد در دوره دوم ارزیابی بیشتر از دوره اول ارزیابی بود و سپس مقدار آن کاهش یافت، ولی در میوه‌های تیمار شده مقدار فلاونول تا پایان دوره ارزیابی به تدریج افزایش داشت. حفظ بهتر و قابل توجهی در مقدار فلاونول در تیمار اسانس آویشن نسبت به شاهد و سایر تیمارها مشاهده شد (Migliori et al., 2017). نشان داده شده است که تحت تنش اکسیداتیو، محتوای فلاونوئید کل در طول زمان انبارداری افزایش می‌یابد (Nair et al., 2018). در یک مطالعه گزارش شد که تیمار با اسانس نه تنها باعث کاهش فساد زغال اخته در طول نگهداری شد، بلکه فعالیت آنتی‌اکسیدانی ترکیبات فنلی و فلاونوئیدها را نیز تحریک کرد. فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالا باعث افزایش ظرفیت حذف رادیکال‌های آزاد و افزایش مقاومت سلول‌ها در برابر آسیب‌های اکسیداتیو شد. این عامل منجر به حفظ کیفیت میوه برای مدت طولانی‌تری شد (Wang & Chen, 2010).

نشت الکترولیت

نشت الکترولیت ارتباط نزدیکی با یکپارچگی غشاء بافت دارد. هنگامی که یکپارچگی غشاء سلولی مختل شود، عملکرد نفوذپذیری انتخابی غشاء سلولی ضعیف می‌شود و مواد درون سلولی می‌توانند آزادانه عبور کنند و نشت نسبی الکترولیت بافتی بر این اساس افزایش می‌یابد (Li et al., 2019). در این مطالعه، مقدار نشت الکترولیت با افزایش زمان انبارمانی افزایش یافت (شکل ۵). اما به طور کلی میوه-

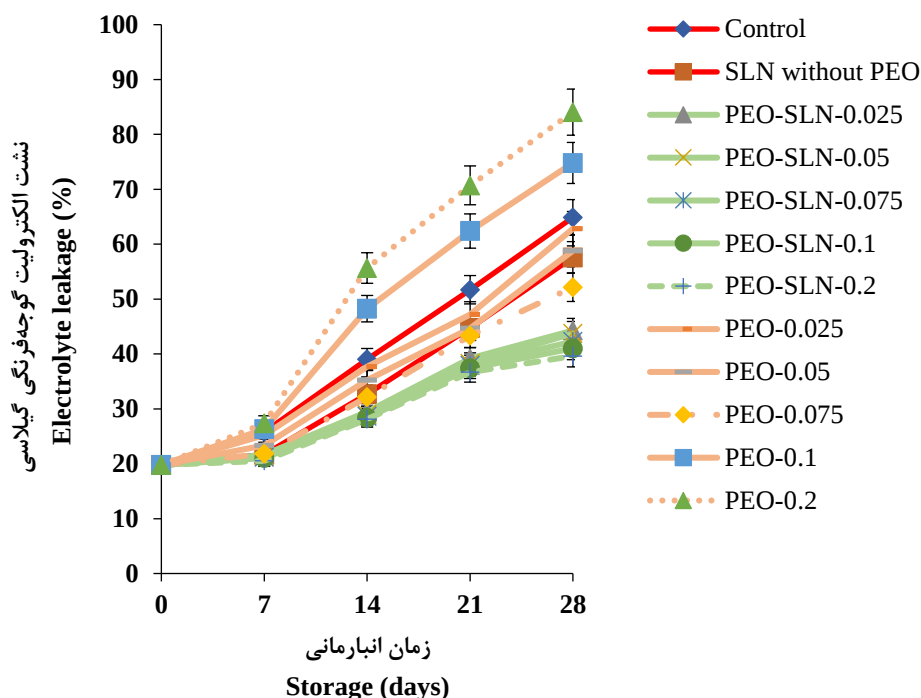
های تیمار شده افزایش کمتری از نظر مقدار نشت الکترولیت در مقایسه با گروه شاهد داشتند. یعنی میوه‌های تیمار شده با فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی، میزان نشت الکترولیت کمتری در مقایسه با گروه شاهد و میوه‌های تیمار شده با اسانس نعناع فلفلی به صورت آزاد داشتند. این امر نشان داد که تیمار با فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی می‌تواند به عنوان یک لایه محافظ در برابر اکسیداسیون عمل کند و به کاهش میزان نشت الکترولیت در طول انبارمانی کمک کند.

کاهش میزان نشت الکترولیت در پایان دوره انبارمانی را می‌توان به عوامل مختلفی مانند القاء تنش خفیف به وسیله اسانس، تحریک سازوکار دفاعی میوه، حفظ آب میوه، کاهش واکنش‌های اکسیداسیون و تأخیر در رسیدن میوه نسبت داد (Jodhani & Nataraj, 2019; Gutierrez-Molina et al., 2021). القاء تنش خفیف به وسیله اسانس‌ها موجب تحریک سازوکار دفاعی گیاه به ویژه فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، پراکسید دیسموتاز (POD)، کاتالاز (CAT)، آسکوربات پراکسیداز (APX) (Veloso et al., 2018) و القاء ژن‌های دخیل در بیوسنتز فنیل پروپانوئید و متابولیسم دیواره سلولی شد (Landi et al., 2021) که متعاقب آن موجب کاهش واکنش‌های اکسیداسیون و تأخیر در رسیدن و پیری میوه‌ها می‌شود (Jodhani & Nataraj, 2019; Gutierrez-Molina et al., 2021). در یک مطالعه، اثر نگهدارندگی پوشش کیتوزان حاوی اسانس سداب به قابلیت مهار رادیکال‌های آزاد به وسیله اسانس نسبت داده شد (González-Locarno et al., 2020). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تیمار میوه‌ها با اسانس موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، حفظ فنول موجود در میوه‌ها و تأخیر در مرحله رسیدن و پیری میوه‌ها شد (Perumal et al., 2021). علاوه بر این، تحقیقات قبلی نشان دادند که نانوکپسول‌ها می‌توانند تحویل مواد آبریز مانند اسانس‌ها را افزایش دهند که منجر به آزادسازی پایدار، زیست‌فراهمی بهبود یافته و در نهایت فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی بالاتر شود (Taheri et al., 2020; Perumal et al., 2021). بنابراین همه این عوامل موجب می‌شود که میزان نشت الکترولیت کاهش یابد و یکپارچگی غشاء سلولی حفظ شود. علاوه بر این‌ها، استفاده از پوشش‌های خوراکی به طور مؤثری میزان نشت الکترولیت را با کند کردن فرآیند رسیدن کاهش می‌دهند.



شکل ۴- محتوای آنتوسیانین (A)، فلاونوئید (B) و فلاونول (C) آب میوه در گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم 'سانتیاگو هلندی' پوشش داده شده با اسانس نعناع فلفلی (PEO) و فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی (PEO-SLN) در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در سردخانه در دمای هشت درجه سلسیوس

Figure 4- Anthocyanin (A), flavonoid (B) and flavonol (C) content in cherry tomatoes 'Dutch Santiago' coated with peppermint oil (PEO) and formulations of solid lipid nanoparticles containing peppermint oil (PEO-SLN), over a storage period of 28 days in a refrigerator at 8°C



شکل ۵- میزان نشت الکترولیت در گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم 'سانتیاگو هلندی' پوشش داده‌شده با اسانس نعناع فلفلی (PEO) و فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی (PEO-SLN) در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در سردخانه در دمای هشت درجه سلسیوس
Figure 5- Electrolyte leakage in cherry tomatoes 'Dutch Santiago' coated with peppermint oil (PEO) and formulations of solid lipid nanoparticles containing peppermint oil (PEO-SLN), over a storage period of 28 days in a refrigerator at 8°C

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی اثربخشی غلظت‌های مختلف تیمارهای نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی در مقایسه با اسانس نعناع فلفلی به‌صورت آزاد بر میزان خواص فیزیولوژیک (کلروفیل کل)، خواص بیوشیمیایی (محتوای آنتوسیانین، فلاونوئید، فلاونول، کاروتنوئید، لیکوپن) و میزان نشت الکترولیت میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم سانتیاگو هلندی انجام گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که گوجه‌فرنگی‌های گیلاسی تیمار شده با فرمولاسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی، به‌ویژه در غلظت‌های بالاتر، ویژگی‌های کیفی میوه مانند میزان آب میوه، رنگ، محتوای ترکیبات فلاونوئیدی، فلاونول و آنتوسیانین را بهتر از میوه‌های تیمار شده با اسانس نعناع فلفلی به‌صورت آزاد یا گروه شاهد حفظ کردند. با این حال، گوجه‌فرنگی‌های گیلاسی که با غلظت‌های بالاتر اسانس نعناع فلفلی به‌صورت آزاد تیمار شدند، میزان نشت الکترولیت بالاتری را حتی در مقایسه با گروه شاهد نشان دادند.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های فیزیولوژیکی این نانوکپسول تأثیر مثبتی بر کاهش سرعت رسیدن میوه و محافظت در برابر آسیب‌های اکسیداسیون دارد. براساس نتایج این پژوهش، استفاده از سیستم نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نعناع فلفلی می‌تواند راهی مؤثر برای افزایش کارایی اسانس نعناع فلفلی به‌صورت آزاد و حفظ کیفیت میوه‌های تازه باشد. علاوه بر این، پتانسیل امیدوارکننده-ای را به‌عنوان جایگزینی برای شیوه‌های سنتی نگهداری میوه نشان می‌دهد.

سپاسگزاری

نویسندگان مایل هستند که مراتب قدردانی خود را از دانشگاه فردوسی مشهد (۳/۴۷۹۰۱) برای مساعدت در امور مالی و تهیه تجهیزات مورد نیاز برای اجرای این پژوهش اعلام کنند. نتایج این مطالعه حاصل بخش‌هایی از رساله دکتری معصومه وکیلی قرطاول است.

References

- Abiso, E., Satheesh, N., & Hailu, A. (2015). Effect of storage methods and ripening stages on postharvest quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) cv. Chali. *Annals: Food Science & Technology*, 16(1), 127-137.

2. Al-Dairi, M., Pathare, P.B., & Al-Yahyai, R. (2021). Chemical and nutritional quality changes of tomato during postharvest transportation and storage. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(6), 401-408. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.05.001>
3. Álvarez-Hernández, M.H., Martínez-Hernández, G.B., Castillejo, N., Martínez, J.A., & Artés-Hernández, F. (2021). Development of an antifungal active packaging containing thymol and an ethylene scavenger. Validation during storage of cherry tomatoes. *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100734>
4. Ansarifar, E., & Moradinezhad, F. (2022). Encapsulation of thyme essential oil using electrospun zein fiber for strawberry preservation. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(2), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00267-y>
5. Atrash, S., Ramezani, A., Rahemi, M., Ghalamfarsa, R.M., & Yahia, E. (2018). Antifungal effects of savory essential oil, gum arabic, and hot water in Mexican lime fruits. *HortScience*, 53(4), 524-530. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12736-17>
6. Bandian, L., Moghaddam, M., Bahreini, M., & Vakili-Ghartavol, M. (2024). Effects of *Thymus vulgaris*, *Zataria multiflora*, *Salvia verticillata*, and ε-polylysine on shelf-life extension of sweet basil leaves. *International Journal of Vegetable Science*, 30(4), 450-469. <https://doi.org/10.1080/19315260.2024.2379575>
7. Baraiya, N.S., Rao, T.V.R., & Thakkar, V.R. (2014). Enhancement of storability and quality maintenance of carambola (*Averrhoa carambola* L.) fruit by using composite edible coating. *Fruits*, 69(3), 195-205. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1051/fruits/2014010>
8. Buendía, L., Soto, S., Ros, M., Antolinos, V., Navarro, L., Sánchez, M. J., Martinez, G.B., & López, A. (2019). Innovative cardboard active packaging with a coating including encapsulated essential oils to extend cherry tomato shelf life. *LWT- Food Science and Technology*, 116, 108584. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108584>
9. Chen, Z., Wang, Z., Yang, Y., Li, M., & Xu, B. (2018). Absciscic acid and brassinolide combined application synergistically enhances drought tolerance and photosynthesis of tall fescue under water stress. *Scientia Horticulturae*, 228, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.004>
10. Choi, H.G., & Park, K.S. (2023). Ripening process of tomato fruits postharvest: Impact of environmental conditions on quality and chlorophyll a fluorescence characteristics. *Horticulturae*, 9(7), 812.
11. Cox, S.E., Stushnoff, C., & Sampson, D.A. (2003). Relationship of fruit color and light exposure to lycopene content and antioxidant properties of tomato. *Canadian Journal of Plant Science*, 83(4), 913-919.
12. Dhital, R., Mora, N.B., Watson, D.G., Kohli, P., & Choudhary, R. (2018). Efficacy of limonene nano coatings on post-harvest shelf life of strawberries. *LWT - Food Science and Technology*, 97, 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.038>
13. Dhital, R., Joshi, P., Becerra-Mora, N., Umagiliyage, A., Chai, T., Kohli, P., & Choudhary, R. (2017). Integrity of edible nano-coatings and its effects on quality of strawberries subjected to simulated in-transit vibrations. *LWT - Food Science and Technology*, 80, 257-264. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.02.033>
14. Dong, F., & Wang, X. (2018). Guar gum and ginseng extract coatings maintain the quality of sweet cherry. *LWT - Food Science and Technology*, 89, 117-122. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.10.035>
15. Fagundes, C., Moraes, K., Pérez-Gago, M.B., Palou, L., Maraschin, M., & Monteiro, A. (2015). Effect of active modified atmosphere and cold storage on the postharvest quality of cherry tomatoes. *Postharvest Biology and Technology*, 109, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.05.017>
16. Fazly Bazzaz, B., Khameneh, B., Namazi, N., Iranshahi, M., Davoodi, D., & Golmohammadzadeh, S. (2018). Solid lipid nanoparticles carrying *Eugenia caryophyllata* essential oil: The novel nanoparticulate systems with broad-spectrum antimicrobial activity. *Letters in Applied Microbiology*, 66(6), 506-513. <https://doi.org/10.1111/lam.12886>
17. González-Locarno, M., Maza Pautt, Y., Albis, A., López, E.F., & Grande Tovar, C.D. (2020). Assessment of chitosan-rue (*Ruta graveolens* L.) essential oil-based coatings on refrigerated cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) quality. *Applied Sciences*, 10(8), 2684. <https://doi.org/10.3390/app10082684>
18. Gutiérrez-Molina, J., Corona-Rangel, M.L., Ventura-Aguilar, R.I., Barrera-Necha, L.L., Bautista-Baños, S., & Correa-Pacheco, Z.N. (2021). Chitosan and *Byrsonima crassifolia*-based nanostructured coatings: Characterization and effect on tomato preservation during refrigerated storage. *Food Bioscience*, 42, 101212. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101212>
19. Hatami, M., Kalantari, S., & Delshad, M. (2012). Responses of different maturity stages of tomato fruit to different storage conditions. In *VII International Postharvest Symposium*. 1012, 857-864. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1012.116>
20. Javanmardi, J., & Kubota, C. (2006). Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest storage. *Postharvest Biology and Technology*, 41(2), 151-155. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.03.008>

21. Jia, S., Zhang, N., Ji, H., Zhang, X., Dong, C., Yu, J., Yan, S., Chen, C., & Liang, L. (2022). Effects of atmospheric cold plasma treatment on the storage quality and chlorophyll metabolism of postharvest tomato. *Foods*, 11(24), 4088. <https://doi.org/10.3390/foods11244088>
22. Jodhani, K.A., & Nataraj, M. (2019). Edible coatings from plant-derived gums and clove essential oil improve postharvest strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) shelf life and quality. *Environmental and Experimental Botany*, 17, 123-135.
23. Kim, D.O., Chun, O.K., Kim, Y.J., Moon, H.Y., & Lee, C.Y. (2003). Quantification of polyphenolics and their antioxidant capacity in fresh plums. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(22), 6509-6515. <https://doi.org/10.1021/jf0343074>
24. Laein, S.S., Khanzadi, S., Hashemi, M., Gheybi, F., & Azizzadeh, M. (2022). Peppermint essential oil-loaded solid lipid nanoparticle in gelatin coating: Characterization and antibacterial activity against foodborne pathogen inoculated on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet during refrigerated storage. *Journal of Food Science*, 87(7), 2920-2931. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16221>
25. Landi, L., Peralta-Ruiz, Y., Chaves-López, C., & Romanazzi, G. (2021). Chitosan coating enriched with *Ruta graveolens* L. essential oil reduces postharvest anthracnose of papaya (*Carica papaya* L.) and modulates defense-related gene expression. *Frontiers in Plant Science*, 12, 2434. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.765806>
26. Li, B., Ding, Y., Tang, X., Wang, G., Wu, S., Li, X., Huang, X., Qu, T., Chen, J., & Tang, X. (2019). Effect of L-arginine on maintaining storage quality of the white button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Food and Bioprocess Technology*, 12, 563-574. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2232-0>
27. Locali-Pereira, A.R., Guazi, J.S., Conti-Silva, A.C., & Nicoletti, V.R. (2021). Active packaging for postharvest storage of cherry tomatoes: Different strategies for application of microencapsulated essential oil. *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 100723. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100723>
28. Mahendran, G., & Rahman, L.U. (2020). Ethnomedicinal, phytochemical and pharmacological updates on Peppermint (*Mentha* × *piperita* L.)—A review. *Phytotherapy Research*, 34(9), 2088-2139. <https://doi.org/10.1002/ptr.6664>
29. Marandi, R.J., Hassani, A., Ghosta, Y., Abdollahi, A., Pirzad, A., & Sefidkon, F. (2011). Control of *Penicillium expansum* and *Botrytis cinerea* on pear with *Thymus kotschyana*, *Ocimum basilicum* and *Rosmarinus officinalis* essential oils. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(4), 626-634.
30. Matabura, V., & Kibazohi, O. (2021). Physicochemical and sensory evaluation of mixed juices from banana, pineapple and passion fruits during storage. *Tanzania Journal of Science*, 47(1), 332-343.
31. Migliori, C.A., Salvati, L., Di Cesare, L.F., Scalzo, R. L., & Parisi, M. (2017). Effects of preharvest applications of natural antimicrobial products on tomato fruit decay and quality during long-term storage. *Scientia Horticulturae*, 222, 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.04.030>
32. Mirtalebi, M., Rajaei, A., Bahmaei, M., & Yari Khosroushahi, A. (2020). Storage Stability of wheat germ oil encapsulated within nanostructured lipid carriers. *Journal of Nanostructures*, 10(2), 268-278. <https://doi.org/10.22052/JNS.2020.02.007>
33. Mohammadi, L., Khankahdani, H.H., Tanaka, F., & Tanaka, F. (2021). Postharvest shelf-life extension of button mushroom (*Agaricus bisporus* L.) by *Aloe vera* gel coating enriched with basil essential oil. *Environmental Control in Biology*, 59(2), 87-98. <https://doi.org/10.2525/ecb.59.87>
34. Munhewyi, K. (2012). Postharvest losses and changes in quality of vegetables from retail to consumer: a case study of tomato, cabbage and carrot. Doctoral Dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University. University of Stellenbosch. South Africa. 144 pp.
35. Nadernejad, N., Ahmadimoghdam, A., Hossyinfard, J., & Poorseyedi, S. (2013). Effect of different rootstocks on PAL activity and phenolic compounds in flowers, leaves, hulls and kernels of three pistachio (*Pistacia vera* L.) cultivars. *Trees*, 27, 1681-1689.
36. Nair, M.S., Saxena, A., & Kaur, C. (2018). Effect of chitosan and alginate based coatings enriched with pomegranate peel extract to extend the postharvest quality of guava (*Psidium guajava* L.). *Food Chemistry*, 240, 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.122>
37. Nasser, M., Golmohammadzadeh, S., Arouiee, H., Jaafari, M.R., & Neamati, H. (2016). Antifungal activity of *Zataria multiflora* essential oil-loaded solid lipid nanoparticles in-vitro condition. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 19(11), 1231-1237.
38. Nirupama, Pila, N.P., Gol, N.B., & Rao, T.R. (2010). Effect of post harvest treatments on physicochemical characteristics and shelf life of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruits during storage. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 9(5), 470-479.
39. Oliveira de, K.Á.R., da Conceição, M.L., de Oliveira, S.P.A., Lima M.D.S., de Sousa Galvão, M., Madruga, M.S., Magnani, M., & de Souza, E.L. (2020). Postharvest quality improvements in mango cultivar Tommy Atkins by

- chitosan coating with *Mentha piperita* L. essential oil. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 95(2), 260-272.
40. Ortiz, C.M., Mauri, A.N., & Vicente, A.R. (2013). Use of soy protein based 1-methylcyclopropene-releasing pads to extend the shelf life of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 20, 281-287. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.07.004>
41. Park, M.H., Sangwanangkul, P., & Baek, D.R. (2018). Changes in carotenoid and chlorophyll content of black tomatoes (*Lycopersicon esculentum* L.) during storage at various temperatures. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(1), 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.10.002>
42. Passos Braga dos, S., Magnani, M., Madruga, M.S., de Souza Galvão, M., de Medeiros, L.L., Batista A.U.D., Dias, R.T.A., Fernandes, L.R., de Medeiros, E.S., & de Souza E.L. (2020). Characterization of edible coatings formulated with chitosan and *Mentha* essential oils and their use to preserve papaya (*Carica papaya* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 65, 102472. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102472>
43. Peralta-Ruiz, Y., Tovar, C.D.G., Sinning-Mangonez, A., Coronell, E.A., Marino, M.F., & Chaves-Lopez, C. (2020). Reduction of postharvest quality loss and microbiological decay of tomato "Chonto" (*Solanum lycopersicum* L.) using chitosan-e essential oil-based edible coatings under low-temperature storage. *Polymers*, 12(8), 1822-1842. <https://doi.org/10.3390/polym12081822>
44. Pérez-Soto, E., Badillo-Solis, K.I., Cenobio-Galindo, A.D.J., Ocampo-López, J., Ludeña-Urquiza, F.E., Reyes-Munguía, A., Pérez-Rios, S.R., & Campos-Montiel, R. (2021). Coating of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) employing nanoemulsions containing the bioactive compounds of cactus acid fruits: Quality and shelf life. *Processes*, 9(12), 2173. <https://doi.org/10.3390/pr9122173>
45. Perumal, A.B., Nambiar, R.B., Sellamuthu, P.S., & Emmanuel, R.S. (2021). Use of modified atmosphere packaging combined with essential oils for prolonging post-harvest shelf life of mango (cv. Banganapalli and cv. Totapuri). *LWT - Food Science and Technology*, 148, 111662. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111662>
46. Popova, M., Bankova, V., Butovska, D., Petkov, V., Nikolova-Damyanova, B., Sabatini, A. G., Marcazzan, G.L., & Bogdanov, S. (2004). Validated methods for the quantification of biologically active constituents of poplar-type propolis. *Phytochemical Analysis: An International Journal of Plant Chemical and Biochemical Techniques*, 15(4), 235-240. <https://doi.org/10.1002/pca.777>
47. Quinet, M., Angosto, T., Yuste-Lisbona, F.J., Blanchard-Gros, R., Bigot, S., Martinez, J.P., & Lutts, S. (2019). Tomato fruit development and metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1554. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01554>
48. Rolle, L., Torchio, F., Giacosa, S., & Segade, S.R. (2015). Berry density and size as factors related to the physicochemical characteristics of Muscat Hamburg table grapes (*Vitis vinifera* L.). *Food Chemistry*, 173, 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.033>
49. Shahkoomahally, S., & Ramezani, A. (2015). Changes in physico-chemical properties related to quality of kiwifruit (*Actinidia deliciosa* cv. Hayward) during cold storage. *International Journal of Fruit Science*, 15(2), 187-197. <https://doi.org/10.1080/15538362.2015.1017423>
50. Sharma, P., Shehin, V.P., Kaur, N., & Vyas, P. (2019). Application of edible coatings on fresh and minimally processed vegetables: A review. *International Journal of Vegetable Science*, 25(3), 295-314. <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1510863>
51. Srinivasa, P., Baskaran, R., Ramesh, M., Harish Prashanth, K., & Tharanathan, R. (2002). Storage studies of mango packed using biodegradable chitosan film. *European Food Research and Technology*, 215, 504-508. <https://doi.org/10.1007/s00217-002-0591-1>
52. Svetlichny, G., Kulkamp-Guerreiro, I., Cunha, S., Silva, F., Bueno, K., Pohlmann, A., Fuentesfria, A.M., & Guterres, S. (2015). Solid lipid nanoparticles containing copaiba oil and allantoin: development and role of nanoencapsulation on the antifungal activity. *Die Pharmazie-An International Journal of Pharmaceutical Sciences*, 70(3), 155-164.
53. Taheri, A., Behnamian, M., Dezhsetan, S., & Karimirad, R. (2020). Shelf life extension of bell pepper by application of chitosan nanoparticles containing *Heracleum persicum* fruit essential oil. *Postharvest Biology and Technology*, 170, 111313. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111313>
54. Tigist, M., Workneh, T.S., & Woldetsadik, K. (2013). Effects of variety on the quality of tomato stored under ambient conditions. *Journal of Food Science and Technology*, 50, 477-486. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0378-0>
55. Vakili-Ghartavol, M., Arouiee, H., Golmohammadzadeh, S., & Naseri, M. (2022). Antifungal activity of *Mentha × Piperita* L. essential oil. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 21(1), 143-152. <https://doi.org/10.24326/asphc.2022.1.12>

56. Vakili-Ghartavol, M., Arouiee, H., Golmohammadzadeh, S., Naseri, M., & Bandian, L. (2024a). Edible coatings based on solid lipid nanoparticles containing essential oil to improve antimicrobial activity, shelf-life, and quality of strawberries. *Journal of Stored Products Research*, 106, 102262. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102262>
57. Vakili-Ghartavol, M., Arouiee, H., Golmohammadzadeh, S., Naseri, M., & Bandian, L. (2024b). Influence of encapsulated peppermint essential oil on postharvest quality of *Solanum lycopersicum* cv. Santiago F1. *International Journal of Vegetable Science*, 30(3), 311-333. <https://doi.org/10.1080/19315260.2024.2369857>
58. Vakili-Ghartavol, M., Arouiee, H., Golmohammadzadeh, S., & Naseri, M. (2024c). Improving antifungal effect of peppermint essential oil. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 23(2), 29-42. <https://doi.org/10.24326/asphc.2024.5334>
59. Vats, S., Bansal, R., Rana, N., Kumawat, S., Bhatt, V., Jadhav, P., Kale, V., Sathe, A., Sonah, H., Jugdaohsingh, R., Sharma, T.R., & Jugdaohsingh, R. (2022). Unexplored nutritive potential of tomato to combat global malnutrition. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(4), 1003-1034. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1832954>
60. Veloso, R.A., Pereira, T., Ferreira, D.S., Debona, D., Wagner, R., & Aguiar, D.S. (2018). Enzymatic activity in essential oil-treated and pathogen-inoculated corn plants. *Journal of Agricultural Science*, 10(10), 171-177. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n10p171>
61. Wang, J., Fang, X.M., Mujumdar, A., Qian, J.Y., Zhang, Q., Yang, X.H., Liu, Y.H., Gao, Z.J., & Xiao, H.W. (2017). Effect of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) on drying and quality of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry*, 220, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.123>
62. Wang, S.Y., & Chen, C.T. (2010). Effect of allyl isothiocyanate on antioxidant enzyme activities, flavonoids and post-harvest fruit quality of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L., cv. Duke). *Food Chemistry*, 122(4), 1153-1158. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.106>
63. Wang, K., Kang, S., Li, F., Wang, X., Xiao, Y., Wang, J., & Xu, H. (2022). Relationship between fruit density and physicochemical properties and bioactive composition of mulberry at harvest. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106, 104322. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104322>
64. Wani, S.M., Gull, A., Ahad, T., Malik, A., Ganaie, T.A., Masoodi, F.A., & Gani, A. (2021). Effect of gum Arabic, xanthan and carrageenan coatings containing antimicrobial agent on postharvest quality of strawberry: Assessing the physicochemical, enzyme activity and bioactive properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 2100-2108. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.008>
65. Wójtowicz, A., Zalewska-Korona, M., Jablonska-Rys, E., Skalicka-Wozniak, K., & Oniszczuk, A. (2018). Chemical characteristics and physical properties of functional snacks enriched with powdered tomato. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 68(3), 251-261.
66. Yan, J., Zhang, J., Hu, C., Deng, L., & Ritenour, M.A. (2020). Use of carvacrol and thymol in shellac coating to control stem-end rot on 'Ruby Red' grapefruit and maintain fruit quality during simulated storage and marketing. *Scientia Horticulturae*, 272, 109606. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109606>
67. Yuan, W., Teo, C.H.M., & Yuk, H.G. (2019). Combined antibacterial activities of essential oil compounds against *Escherichia coli* O157: H7 and their application potential on fresh-cut lettuce. *Food Control*, 96, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.09.005>
68. Zambrano-Zaragoza, M., Mercado-Silva, E., Ramirez-Zamorano, P., Cornejo-Villegas, M., Gutiérrez-Cortez, E., & Quintanar-Guerrero, D. (2013). Use of solid lipid nanoparticles (SLNs) in edible coatings to increase guava (*Psidium guajava* L.) shelf-life. *Food Research International*, 51(2), 946-953. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.012>
69. Zhao, D., Shen, L., Fan, B., Liu, K., Yu, M., Zheng, Y., Ding, Y., & Sheng, J. (2009). Physiological and genetic properties of tomato fruits from 2 cultivars differing in chilling tolerance at cold storage. *Journal of Food Science*, 74(5), 348-352. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01156.x>