

Effect of Foliar Application of Calcium, Silica-Coated Calcium, and Iron Oxide Nanoparticles on Postharvest Quality and *ACS* Gene Expression in Cucumber (*Cucumis sativus* L.)

Zohre Mirzaei-Fard¹  | Mohammad Reza Raji^{1*}  | Seyed Sajad Sohrabi^{2*}  |
Reza Abolghasemi¹  | Abdullah Ehtesham Nia¹ 

1- Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- Department of Plant Production and Genetic Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

*Corresponding author ✉: raji.m@lu.ac.ir; sohrabi.s@lu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: December 14, 2025;

Received in revised form: March 29, 2026;

Accepted: April 8, 2026;

Available online: June 30, 2026

Keywords:

Ethylene,
Antioxidant enzymes,
Shelf life,
Electrolyte leakage,
qRT-PCR

ABSTRACT

Maintaining cucumber quality during storage is difficult due to rapid postharvest deterioration, which is driven by high rates of transpiration, respiration, and senescence. In the present study, the effects of foliar application of calcium nanoparticles, silica-coated calcium nanoparticles, and iron oxide nanoparticles on postharvest quality attributes and the relative expression of the *1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase (ACS)* gene were evaluated in cucumber cv. Seba. The experiment was arranged in a completely randomized design with a factorial layout, using three replications. The first factor consisted of seven nanoparticle treatments, including the control (distilled water), calcium nanoparticles at 20 and 40 mg L⁻¹, silica-coated calcium nanoparticles at 20 and 40 mg L⁻¹, and iron oxide nanoparticles at 10 and 20 mg L⁻¹; the second factor included three storage periods (0, 8, and 16 days). After harvest, fruits were stored at 4°C and 85–90% relative humidity, and then parameters including weight loss, juice pH, total soluble solids (TSS: the total concentration of dissolved non-water solutes in the fruit juice), electrolyte leakage, vitamin C content, mineral concentrations (calcium and potassium), peroxidase (POD) and polyphenol oxidase (PPO) activities, and relative expression of the *ACS* gene were measured using qRT-PCR. The results showed that with increasing storage time, weight loss, pH, TSS, electrolyte leakage, and PPO activity increased significantly, whereas vitamin C content, POD activity, calcium and potassium concentrations, and *ACS* expression showed a significant decreasing trend. However, nanoparticle application, particularly iron oxide nanoparticles at 20 mg L⁻¹ and silica-coated calcium nanoparticles at 40 mg L⁻¹, improved postharvest quality attributes; the lowest weight loss and better pH retention were observed in the iron oxide 20 mg L⁻¹ treatment, while the lowest electrolyte leakage was recorded in iron oxide at 10 and 20 mg L⁻¹ and silica-coated calcium nanoparticles at 40 mg L⁻¹, which were placed in the same statistical group. In addition, reduced PPO activity, greater retention of vitamin C and mineral nutrients, and lower *ACS* expression were observed in some nanoparticle treatments. Overall, the findings indicated that the application of mineral nanoparticles, especially iron oxide nanoparticles at 20 mg L⁻¹ and silica-coated calcium nanoparticles at 40 mg L⁻¹, can be considered an effective strategy for maintaining quality and extending the postharvest life of cucumber fruits.



Cite this article: Mirzaei-Fard, Z., Raji, M.R. Sohrabi, S.S. Abolghasemi, R. and Ehtesham Nia, A. (2026). Effect of foliar application of calcium, silica-coated calcium, and iron oxide nanoparticles on postharvest quality and *ACS* gene expression in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Genetic Research*, 13(1): 43–62 (In Persian).

DOI: <https://doi.org/10.22034/pgr.2026.2094406.1040>



© Author(s) retain the copyright.

Homepage: <https://www.pgr.lu.ac.ir> | Publisher: Lorestan University

Introduction

Cucumber (*Cucumis sativus* L.) is highly susceptible to postharvest deterioration due to rapid metabolic activity and cold storage-induced senescence, which leads to water loss, oxidative stress, and enzymatic browning. Developing safe, efficient preservation technologies is therefore a major research priority. Calcium and silicon are known to maintain cell wall integrity and membrane stability, with recent advances in nanotechnology enhancing their bioavailability and tissue penetration. Despite documented benefits, the molecular mechanisms underlying these improvements—particularly regarding ethylene biosynthesis—remain unclear. Given that *1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase* (*ACS*) acts as a rate-limiting enzyme in senescence, this study investigated the effects of calcium, silica-coated calcium, and iron oxide nanoparticles on the physiological, biochemical, and molecular characteristics of stored cucumber, with a focus on *ACS* gene expression.

Materials and Methods

The experiment was conducted on harvested cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruits cv. Saba in a factorial arrangement based on a completely randomized design with three replications. The first factor consisted of seven nanoparticle treatments applied directly to the harvested fruits: distilled water (control), calcium nanoparticles at 20 and 40 mg L⁻¹, silica-coated calcium nanoparticles at 20 and 40 mg L⁻¹, and iron oxide nanoparticles at 10 and 20 mg L⁻¹. The second factor was storage duration at 4 ± 1°C and 85–90% relative humidity, evaluated at three intervals: 0, 8, and 16 days. During the storage period, physiological and biochemical characteristics including weight loss, pH, titratable acidity, total soluble solids (TSS), electrolyte leakage, vitamin C, calcium and potassium contents, and the activities of polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) were determined using standard analytical procedures. Additionally, the relative expression of the *ACS* gene was quantified by qRT-PCR using the 2^{-ΔΔC_t} method to evaluate the molecular responses associated with ethylene biosynthesis under the different nanoparticle treatments.

Results and Discussion

Storage duration significantly impacted all evaluated parameters. Throughout the storage period, weight loss, pH, TSS, electrolyte leakage, and PPO activity increased progressively, increased progressively, whereas titratable acidity, vitamin C content, peroxidase (POD) activity, calcium and potassium concentrations, and relative *ACS* gene expression decreased significantly. Nevertheless, nanoparticle treatments considerably alleviated these undesirable changes compared with untreated fruits. Among all treatments, iron oxide nanoparticles at 20 mg L⁻¹ and silica-coated calcium nanoparticles at 40 mg L⁻¹ generally produced the most favorable responses. Fruits receiving iron oxide nanoparticles at 20 mg L⁻¹ exhibited the lowest weight loss and better pH retention, indicating improved water conservation and a slower metabolic decline during storage. The lowest electrolyte leakage was recorded in iron oxide nanoparticles at 10 and 20 mg L⁻¹ and silica-coated calcium nanoparticles at 40 mg L⁻¹, which were grouped statistically together. This result suggests that these treatments were effective in preserving membrane integrity and limiting cellular deterioration. Likewise, nanoparticle application helped maintain higher titratable acidity and delayed the increase in pH, reflecting a slower consumption of organic acids and reduced respiratory activity. Vitamin C degradation was also delayed in nanoparticle-treated fruits, particularly under iron oxide and silica-coated calcium treatments, indicating improved protection against oxidative deterioration. Similar trends were observed for mineral composition, where treated fruits maintained significantly higher calcium and potassium concentrations than the control. These minerals are closely associated with membrane stability, osmotic regulation, cellular signaling, and tissue integrity, which collectively contribute to improved postharvest performance. Enzymatic analyses further supported these observations. PPO activity increased during storage but remained significantly lower in nanoparticle-treated fruits, indicating reduced enzymatic browning and delayed tissue deterioration. Conversely, POD activity gradually declined during storage in all treatments; however, nanoparticle-treated fruits retained higher enzyme activity during the early storage

period, suggesting a better-preserved antioxidant defense capacity. The most significant finding of the present study was the molecular response of cucumber fruit. Relative expression of the *ACS* gene was significantly downregulated by nanoparticle treatments, with the greatest reduction observed in fruits treated with 40 mg L⁻¹ silica-coated calcium nanoparticles. Since *ACS* encodes the rate-limiting enzyme in ethylene biosynthesis, suppression of its expression suggests a reduced ethylene biosynthetic potential and delayed activation of molecular pathways associated with fruit senescence. The close agreement between reduced *ACS* expression and improvements in physiological, biochemical, and enzymatic characteristics indicates that nanoparticle treatments not only preserved cellular structure but also modulated key molecular processes involved in postharvest deterioration.

Conclusion

The findings of this study demonstrated that nanoparticle-based mineral treatments effectively improved the postharvest quality of cucumber fruit during cold storage. Among the different tested treatments, application of 20 mg L⁻¹ iron oxide nanoparticles and 40 mg L⁻¹ silica-coated calcium nanoparticles yielded optimal fruit quality preservation. These treatments effectively mitigated weight loss, electrolyte leakage, and polyphenol oxidase activity, while successfully sustaining higher levels of vitamin C, minerals, titratable acidity, and overall antioxidant capacity. More importantly, silica-coated calcium nanoparticles at 40 mg L⁻¹ significantly suppressed *ACS* gene expression, providing molecular evidence that nanoparticle application can regulate ethylene biosynthesis in addition to improving physiological and biochemical characteristics. These findings suggest that the beneficial effects of mineral nanoparticles extend beyond nutritional supplementation and involve coordinated regulation of cellular stability, oxidative metabolism, and gene expression associated with senescence. Consequently, mineral nanoparticles, particularly iron oxide nanoparticles and silica-coated calcium nanoparticles, represent promising and environmentally friendly strategies for extending cucumber shelf life and preserving postharvest quality. Furthermore, integrating advanced analytical techniques with conventional quality assessments offers a comprehensive framework for understanding the mechanisms by which nanoparticle treatments delay postharvest senescence, potentially facilitating the development of more effective preservation technologies for horticultural crops.

Author Contributions

Z. Mirzaei-Fard performed the experiments, collected the data, and wrote the original draft of the manuscript. M.R. Raji and S.S. Sohrabi (corresponding authors) were responsible for project conceptualization, supervision, formal data analysis, and manuscript revision. R. Abolghasemi and A. Ehtesham Nia provided consultation, assisted in laboratory data collection, and contributed to manuscript revision. All authors have read and approved the final manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



اثر محلول‌پاشی نانوذرات کلسیم، کلسیم-سیلیس و اکسید آهن بر کیفیت پس از برداشت و بیان ژن *ACS* در میوه خیار (*Cucumis sativus* L.)

زهره میرزایی فرد^۱ | محمد رضا راجی^{۱*} | سید سجاد سهرابی^{۲*} | رضا ابوالقاسمی^۱ | عبدالله احتشام نیا^۱

۱- گروه مهندسی علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

زوال سریع کیفیت و عمر انبارمانی کوتاه میوه خیار که عمدتاً ناشی از شدت بالای تعرق، تنفس و فرآیندهای مرتبط با پیری است، از مهم‌ترین چالش‌های پس از برداشت این محصول به شمار می‌رود. در پژوهش حاضر، اثر محلول‌پاشی نانوذرات کلسیم، کلسیم پوشش‌دار با سیلیس و اکسید آهن بر شاخص‌های کیفی پس از برداشت و بیان نسبی ژن *1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase (ACS)* در میوه خیار رقم سبا مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول شامل هفت تیمار نانوذره (شاهد/آب مقطر، نانوذرات کلسیم در غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر، نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس در غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر، و نانوذرات اکسید آهن در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و فاکتور دوم شامل سه زمان انبارمانی (۸، ۱۶ و ۲۴ روز) بود. میوه‌ها پس از برداشت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۵-۹۰ درصد نگهداری شدند و سپس ویژگی‌هایی شامل درصد کاهش وزن، pH، عصاره، مواد جامد محلول (مجموع ترکیبات غیرآبی حل‌شده در عصاره میوه)، نشت یونی و محتوای ویتامین C، غلظت عناصر معدنی (کلسیم و پتاسیم)، فعالیت آنزیم‌های پلی‌فنل اکسیداز (PPO) و پراکسیداز (POD) و نیز بیان نسبی ژن *ACS* به روش qRT-PCR اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش طول دوره انبارمانی، برخی از صفات از جمله میزان افت وزن، pH، مواد جامد محلول کل (TSS)، نشت یونی و فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز به‌طور معنی‌داری افزایش یافتند، در حالی که برخی دیگر از صفات مانند محتوای ویتامین C، فعالیت آنزیم پراکسیداز، غلظت کلسیم و پتاسیم، و میزان بیان ژن *ACS* روند کاهشی معنی‌داری نشان دادند. با این حال، کاربرد نانوذرات، به‌ویژه نانوذرات اکسید آهن ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس ۴۰ میلی‌گرم در لیتر، موجب بهبود شاخص‌های کیفی شد؛ به‌طوری‌که کمترین افت وزن و حفظ بهتر pH در تیمار اکسید آهن ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد و کمترین نشت یونی نیز در تیمارهای اکسید آهن ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و کلسیم-سیلیس ۴۰ میلی‌گرم در لیتر در یک گروه آماری قرار گرفت. افزون بر این، کاهش فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز، حفظ بیشتر ویتامین C و عناصر معدنی، و کاهش بیان ژن *ACS* در برخی تیمارهای نانوذره‌ای مشاهده شد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان داد که کاربرد نانوذرات معدنی، به‌ویژه نانوذرات اکسید آهن ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس ۴۰ میلی‌گرم در لیتر، می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر برای حفظ کیفیت و افزایش عمر انبارمانی میوه خیار مورد استفاده قرار گیرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

واژگان کلیدی:

اتیلن،

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی،

عمر انبارمانی،

نشت یونی

qRT-PCR



مقدمه

خیار (*Cucumis sativus* L.) متعلق به خانواده کدویان (Cucurbitaceae)، یکی از مهم‌ترین سبزی‌های میوه‌ای در کشت‌های فضای باز و کشت‌های گلخانه‌ای به‌شمار می‌رود (Kaur and Sharma, 2022). این گیاه، علفی، تک‌پایه، دگرگشن و روزخشتی است که دوره رشد و باردهی آن بسته به سیستم کشت متفاوت است؛ به‌طوری‌که دوره رشد آن در کشت‌های فضای باز حدود ۸۵ تا ۹۰ روز تخمین زده می‌شود، اما در شرایط کنترل‌شده گلخانه‌ای یا اقلیم‌های گرمسیری، دوره رشد و باردهی گیاه می‌تواند تا ۲۷۰ روز نیز ادامه یابد. میوه خیار از نوع سته بوده و گل‌های نر و ماده عمدتاً در زاویه برگ‌ها تشکیل می‌شوند (Kathayat et al., 2018). در ارقام اصلاح‌شده گلخانه‌ای، تولید میوه عمدتاً از طریق پارتنوکاری انجام می‌شود که ضمن افزایش یکنواختی تولید در محیط کنترل‌شده، در شرایط هوای آزاد می‌تواند با ناپایداری در الگوی میوه‌دهی همراه باشد (Kaur and Sharma, 2022).

از لحاظ اهمیت تولید، خیار بعد از گوجه‌فرنگی، کلم‌پیچ و پیاز، چهارمین محصول مهم در بین سبزی‌های جهان به‌شمار می‌آید (Seifollahi et al., 2026). از دیدگاه تغذیه‌ای نیز میوه خیار به‌دلیل دارا بودن ویتامین‌های گروه ب و ث و عناصر معدنی مانند منیزیم، منگنز و مولیبدن، و نیز حضور اسیدهای آلی، در تغذیه انسانی جایگاه ویژه‌ای دارد (Gebretsadik et al., 2021; Sharma et al., 2026). علاوه بر این، حضور پلی‌ساکاریدها و فلاونوئیدهای دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی در میوه خیار، به افزایش ظرفیت مهار رادیکال‌های آزاد و تقویت پاسخ‌های ایمنی کمک می‌کند (Javid et al., 2024). با وجود این مزایا، ویژگی‌های بافتی و فیزیولوژیکی خیار، از جمله محتوای آب بالا و برداشت در مرحله نارس، آن را در زنجیره سرد و فرایندهای نگهداری پس از برداشت، در زمره محصولات بسیار فسادپذیر قرار می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که کوچک‌ترین اختلال در شرایط نگهداری، کاهش سریع کیفیت و محدودیت در عرضه به بازارهای دوردست را به دنبال خواهد داشت (Das et al., 2022; Hurr et al., 2009; Raz Magid et al., 2026).

پس از برداشت، میوه خیار به‌دلیل تعرق بالا و نفوذپذیری نسبی پوست، به‌سرعت رطوبت خود را از دست می‌دهد؛ این پدیده با کاهش وزن، افت تورژسانس، چروکیدگی و کاهش بازارپسندی همراه است (Hurr et al., 2009; Raz Magid et al., 2026). هم‌زمان، تغییرات نامطلوبی نظیر زرد شدن، تخریب ساختار دیواره سلولی، نرم شدن بافت، تغییر طعم و بو و پوسیدگی ناشی از رشد قارچ‌ها و باکتری‌ها رخ می‌دهد که مجموعه این رخدادها عمر قفسه‌ای و انبارمانی را محدود می‌کند. از آنجا که کیفیت تجاری خیار مستقیماً به حفظ رنگ سبز، سفتی، وضعیت آبی بافت و ثبات ویژگی‌های کیفی نظیر ویتامین ث، اسیدهای آلی و مواد جامد محلول وابسته است، توسعه راهبردهای مؤثر برای کاهش شدت زوال پس از برداشت، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در سامانه‌های تولید و صادرات محسوب می‌شود. در این راستا، مدیریت دما، رطوبت و تهویه برای کاهش تجمع اتیلن و کند کردن روند پیری، به‌عنوان مؤلفه‌های پایه در افزایش زمان انبارمانی معرفی شده‌اند؛ همچنین بسته‌بندی مناسب، مواد ضدعفونی‌کننده و پوشش‌های کم‌خطر از راهکارهای مکمل در کاهش فساد و حفظ کیفیت تلقی می‌شوند (Alvaro et al., 2009; Corrêa et al., 2018).

از منظر فیزیولوژی و زیست مولکولی، واکنش گیاه به فرایندهای پس از برداشت، مشابه تنش‌های محیطی نتیجه برهم‌کنش چندین مسیر کلیدی شامل تنظیم هورمونی، متابولیسم تنفسی و تخریب دیواره سلولی است (Azizollahi and Mousavi, 2025; Saeidi et al., 2025; Mehravi et al., 2023; Dorling and McManus, 2012; Xu and Zhang, 2014; Pattyn et al., 2021). تغییر در مسیر سنتز اتیلن، به‌ویژه از طریق تغییرات بیان ژن‌های کلیدی این مسیر نظیر ژن سنتزکننده ۱-آمینوسیکلوپروپان ۱-کربوکسیلات سنتاز (*1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase: ACS*)، می‌تواند آغازگر یا تقویت‌کننده برنامه‌های پیری و زردشدگی باشد (Houben and Van de Poel, 2019; Shiomi et al., 1999). با تشدید تولید گونه‌های فعال اکسیژن (Reactive oxygen species: ROS) و کاهش

کارایی سامانه‌های دفاعی، آسیب غشا، افزایش نفوذپذیری، نشت یونی و افت کیفیت محصول گیاهی حادث می‌گردد (Trivellini *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2025).

در این میان، فعالیت آنزیم کاتالاز به عنوان یکی از محورهای اصلی حذف پراکسید هیدروژن، نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ همئوستازی اکسیداتیو ایفا می‌کند (Chen *et al.*, 2025). در سطح بیوشیمیایی، تغییرات فعالیت آنزیم‌های پلی‌فنول‌اکسیداز و پراکسیداز می‌تواند بازتابی از پاسخ به تنش و تغییر در وضعیت ترکیبات فنولی و واکنش‌های اکسیداتیو باشد (Habibi *et al.*, 2024). از سوی دیگر، شاخص‌های کیفی مانند ویتامین ث، pH عصاره میوه و مواد جامد محلول، با شدت تنفس، مصرف اسیدهای آلی و تغییرات متابولیکی طی نگهداری همبستگی دارند و به صورت توأمان، نمایی از افت کیفیت خوراکی و تغذیه‌ای را ارائه می‌کنند (Zhong *et al.*, 2024). همچنین تغییر در وضعیت یونی و معدنی بافت، به‌ویژه کلسیم و پتاسیم، هم در پایداری غشاء و هم در استحکام دیواره و تنظیم فشار اسمزی نقش داشته و به عنوان مؤلفه‌ای کلیدی در تبیین کاهش وزن و افت بافتی قابل تحلیل است (Imahori, 2012).

با وجود اثربخشی نسبی روش‌های متداول، محدودیت‌هایی مانند پایداری پایین برخی تیمارها، کارایی محدود نفوذ و جذب ترکیبات، و نیز دغدغه‌های زیست‌محیطی و ایمنی مصرف، سبب شده است که استفاده از پوشش‌ها و تیمارهای نوین مبتنی بر فناوری نانو در علوم پس از برداشت مورد توجه ویژه قرار گیرد (Ashraf *et al.*, 2025; Jama *et al.*, 2026). نانوذرات به عنوان مجموعه‌ای از اتم‌ها یا مولکول‌ها در مقیاس ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، به دلیل سطح ویژه بالا و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متمایز، می‌توانند برهم‌کنش مؤثرتری با سطوح زیستی داشته باشند (Ngubane *et al.*, 2026).

کلسیم و سیلیس از عناصر مؤثر در حفظ کیفیت و کاهش زوال پس از برداشت میوه‌ها به شمار می‌روند (Shan *et al.*, 2023). کلسیم با ایجاد پیوند میان ترکیبات پکتینی تیغه میانی، موجب استحکام دیواره سلولی، افزایش سفتی بافت، پایداری غشاء و تنظیم تبادل یونی شده و از این طریق می‌تواند نرم‌شدگی، تنفس

و سایر تغییرات مرتبط با پیری را به تأخیر اندازد؛ همچنین گزارش شده است که تیمارهای کلسیمی و به‌ویژه نانوذرات کلسیم، به دلیل فراهمی زیستی و نفوذپذیری بیشتر، در افزایش عمر انبارمانی و بهبود برخی صفات کیفی مانند ویتامین ث مؤثرند (Jaime-Guerrero *et al.*, 2024). در مقابل، سیلیس به عنوان یک عنصر مفید، با بهبود فرایندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی، تقویت فتوسنتز، تنظیم تعادل هورمونی، بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش تحمل گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی شناخته می‌شود (Shan *et al.*, 2023). علاوه بر این نتایج مطالعات موجود نشان می‌دهد که کاربرد نانوذرات اکسید آهن، به‌ویژه به صورت پوشش‌های فعال در مرحله پس از برداشت، می‌تواند از طریق افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، کاهش تنش اکسیداتیو، حفظ یکپارچگی غشا و مهار رشد عوامل بیماری‌زا، به حفظ کیفیت میوه و افزایش عمر انبارمانی کمک کند. علاوه بر این، آهن به عنوان ریزمغذی ضروری در فعالیت آنزیم‌های مرتبط با انتقال الکترون، فتوسنتز و متابولیسم آنتی‌اکسیدانی نقش دارد و تأمین مناسب آن می‌تواند به حفظ کیفیت فیزیولوژیک میوه در دوره نگهداری منجر شود (Saqib *et al.*, 2020).

بر این اساس، انتظار می‌رود کاربرد نانوذرات کلسیم و اکسید آهن، از طریق اثرات هم‌افزا بر چندین محور کلیدی، موجب بهبود صفات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی خیار و افزایش عمر انبارمانی شود. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات کلسیم پوشش‌داده شده با سیلیس بر مجموعه‌ای از شاخص‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، محتوای عناصر معدنی و بیان ژن *ACS* در میوه خیار (رقم سبا) طی دوره پس از برداشت انجام شد. بر اساس مرور منابع، این پژوهش نخستین مطالعه‌ای است که به ارزیابی اثرات این نانوذرات، به‌ویژه فرمولاسیون کلسیم-سیلیس، بر ویژگی‌های کیفی و مسیر مولکولی اتیلن در میوه خیار می‌پردازد. انتظار می‌رود نتایج حاصل در توسعه راهبردهای کم‌خطر و کارآمد برای مدیریت پس از برداشت و افزایش ماندگاری این محصول مؤثر واقع شود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و اعمال تیمار: این مطالعه بر روی میوه‌های خیار (*Cucumis sativus* L.) رقم سبا انجام شد. میوه‌های مورد استفاده از مطالعه میرزایی فرد (Mirzaei Fard, 2024) تأمین شدند و از میان آن‌ها، میوه‌های یکنواخت از نظر اندازه، شکل، رنگ و سلامت ظاهری و عاری از هرگونه آسیب‌دیدگی فیزیکی یا علائم بیماری برای انجام آزمایش انتخاب شدند. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد؛ به طوری که هر واحد آزمایشی شامل ۱۰ میوه بود. فاکتور اول شامل هفت تیمار نانوذره: شاهد (محلول پاشی با آب مقطر)، نانوذرات کلسیم (کلسیم نترات $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) در غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ میلی گرم در لیتر، نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس در غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ میلی گرم در لیتر، و نانوذرات اکسید آهن (مگنتیت Fe_3O_4) در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر و فاکتور دوم شامل سه زمان انبارمانی، یعنی ۰، ۸ و ۱۶ روز پس از برداشت، بود. میوه‌ها پس از بسته‌بندی در ظروف مناسب، در شرایط سردخانه‌ای با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۵ تا ۹۰ درصد نگهداری شدند. ارزیابی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در روزهای ۰، ۸ و ۱۶ انبارمانی انجام شد.

ارزیابی ویژگی‌های کیفی میوه خیار در دوره پس از برداشت: درصد کاهش وزن میوه بر اساس اختلاف وزن اولیه و وزن نمونه در هر زمان از انبارمانی نسبت به وزن اولیه محاسبه و به صورت درصد بیان شد. pH عصاره میوه با استفاده از pH متر دیجیتال اندازه‌گیری گردید. همچنین میزان مواد جامد محلول کل (TSS) با استفاده از رفراکتومتر دیجیتال در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری و بر حسب درجه بریکس ($^{\circ}\text{Brix}$) بیان شد (Taverniers et al., 2004). برای اندازه‌گیری نشت یونی، قطعات یکنواختی از بافت میوه خیار تهیه و پس از شست‌وشو با آب دیونیزه، در حجم معینی از آب دیونیزه قرار داده شدند. سپس هدایت الکتریکی اولیه محلول (EC_1) پس از ۳ ساعت انکوباسیون در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) بر روی شیکر (با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه) اندازه‌گیری شد. در ادامه، نمونه‌ها به منظور آزادسازی کامل

الکترولیت‌ها جوشانده شده و پس از رسیدن به دمای محیط، هدایت الکتریکی نهایی (EC_2) اندازه‌گیری گردید. نشت یونی به صورت درصد و از رابطه $EL = \frac{\text{EC}_1}{\text{EC}_2} \times 100$ محاسبه شد. محتوای ویتامین ث بر اساس روش تیتراسیون با معرف 2,6-dichlorophenolindophenol (DCPIP) اندازه‌گیری شد. بدین منظور، عصاره تازه میوه با محلول استاندارد DCPIP تا ظهور رنگ صورتی کم‌رنگ پایدار (حدود ۱۵ ثانیه) تیتراژ شد. غلظت اسید اسکوربیک با استفاده از منحنی استاندارد محاسبه و نتایج به صورت میلی گرم اسید اسکوربیک در میلی لیتر عصاره میوه ($\text{mg ascorbic acid mL}^{-1} \text{ fruit extract}$) گزارش شدند (Latimer, 2023). علاوه بر این برای تعیین غلظت عناصر کلسیم و پتاسیم، نمونه‌های خشک‌شده پس از هضم تر با مخلوط اسید نیتریک و اسید پرکلریک آماده‌سازی شدند. غلظت کلسیم و پتاسیم به ترتیب با استفاده از دستگاه Atomic Absorption Spectrophotometer و Flame Photometer اندازه‌گیری و نتایج بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک ($\text{mg kg}^{-1} \text{ DW}$) ثبت شدند.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی میوه خیار در دوره پس از برداشت: فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز (Polyphenol oxidase: PPO) بر اساس روش موور و فلورکی (Moore and Flurkey, 1990) و با اندازه‌گیری تغییرات جذب نوری در طول موج ۴۲۰ نانومتر با استفاده از کاتکول به عنوان سوبسترا تعیین شد. فعالیت آنزیم پراکسیداز (Peroxidase: POD) نیز بر اساس روش چانس و ماهلی (Chance and Maehly, 1955) و با اندازه‌گیری تغییرات جذب نوری در طول موج ۴۷۵ نانومتر تعیین گردید. فعالیت آنزیم‌ها بر حسب واحد فعالیت آنزیمی در گرم وزن تر بافت ($\text{U g}^{-1} \text{ FW}$) بیان شد.

استخراج RNA، سنتز cDNA و بررسی بیان ژن ACS در میوه خیار در دوره پس از برداشت: به منظور بررسی پاسخ مولکولی میوه خیار به تیمارهای اعمال‌شده، بیان نسبی ژن ACS (مرتبط با مسیر بیوسنتز اتیلن) مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، نمونه‌های بافت میوه بلافاصله پس از نمونه‌برداری در ازت مایع منجمد و تا زمان استخراج RNA در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. RNA کل با استفاده از کیت

(جدول ۱). به عبارت دیگر، تغییرات ایجاد شده در ویژگی های کیفی میوه تنها ناشی از اثر مستقل تیمار یا زمان نبوده، بلکه برهم کنش این دو عامل نیز نقش تعیین کننده ای در نحوه تغییر صفات پس از برداشت داشته است. بر این اساس، برای تبیین دقیق تر روند تغییرات، مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار و مدت انبارمانی برای هر یک از صفات به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.

کاهش وزن میوه: درصد کاهش وزن میوه با افزایش مدت انبارمانی در تمامی تیمارها روندی افزایشی نشان داد، اما شدت این افزایش در میوه های تیمار شده کمتر از شاهد بود (شکل ۱-الف). در روز شانزدهم انبارمانی، بیشترین کاهش وزن میوه های شاهد مشاهده شد، در حالی که کمترین کاهش وزن در تیمار نانوذرات اکسید آهن با غلظت ۲۰ میلی گرم در لیتر به دست آمد. سایر تیمارهای نانوذره ای نیز در مقایسه با شاهد موجب کاهش افت وزن میوه شدند، به طوری که تیمار نانوذرات کلسیم پوشش داده شده با سیلیس نیز اثر کاهنده ای بر کاهش وزن نشان داد. به طور کلی، کاربرد نانوذرات سبب کاهش معنی دار افت وزن میوه در طول دوره انبارمانی شد (شکل ۱-الف).

pH: مقدار pH عصاره میوه خیار در طول دوره انبارمانی در تمامی تیمارها افزایش یافت، اما میزان این افزایش به نوع تیمار و مرحله انبارمانی وابسته بود (شکل ۱-ب). در روز صفر انبارمانی، کمترین مقدار pH در تیمار نانوذرات کلسیم پوشش داده شده با سیلیس مشاهده شد. در مقابل، در روزهای ۸ و ۱۶ انبارمانی، کمترین افزایش pH به تیمار نانوذرات اکسید آهن با غلظت ۲۰ میلی گرم در لیتر اختصاص یافت. در پایان دوره انبارمانی، بیشترین مقدار pH در میوه های شاهد مشاهده شد. این نتایج نشان داد که تیمار نانوذرات اکسید آهن با غلظت ۲۰ میلی گرم در لیتر، به ویژه در مراحل پایانی انبارمانی، در حفظ تعادل اسیدی میوه مؤثرتر بود (شکل ۱-ب).

استخراج RNA (Denazist، ایران) و مطابق شیوه نامه شرکت سازنده استخراج شد. کیفیت RNA با الکتروفورز روی ژل آگارز یک درصد و کمیت و خلوص آن با استفاده از دستگاه NanoDrop بررسی گردید. برای حذف آلودگی احتمالی DNA ژنومی، نمونه ها با آنزیم DNase I تیمار شدند و سپس رشته اول cDNA با استفاده از کیت سنتز cDNA (SinaClon، ایران) تهیه شد. آغازگرهای اختصاصی ژن ACS با استفاده از نرم افزار AlleleID (نسخه ۶) طراحی شدند و از ژن *EF-1a* به عنوان ژن مرجع برای نرمال سازی داده ها استفاده شد (جدول ۱). واکنش Real-Time PCR با استفاده از رنگ SYBR Green در دستگاه Rotor-Gene 6000 (Qiagen, Germany) انجام شد. تمامی واکنش ها در سه تکرار زیستی و دو تکرار فنی انجام شدند و میزان بیان نسبی ژن ها پس از تعیین کارایی آغازگرها و واکنش، با استفاده از روش $2^{-\Delta\Delta Ct}$ محاسبه گردید (Livak and Schmittgen, 2001).

تجزیه و تحلیل آماری: تجزیه واریانس داده ها با استفاده از نرم افزار SAS (نسخه ۹/۱) انجام شد. مقایسه میانگین تیمارها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم افزار Microsoft Excel (نسخه ۲۰۲۱) انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات کیفی میوه خیار در دوره پس از برداشت نشان داد که اثرات ساده تیمار و مدت انبارمانی بر تمامی صفات مورد بررسی در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود. همچنین، اثر متقابل تیمار $\times$ مدت انبارمانی نیز برای همه صفات معنی دار شد که این امر بیانگر آن است که پاسخ میوه خیار به تیمارهای اعمال شده در طول دوره انبارمانی یکسان نبوده و شدت و روند تغییرات صفات مورد مطالعه تحت تأثیر هم زمان نوع تیمار و طول مدت نگهداری قرار گرفته است

جدول ۱- مشخصات آغازگرهای مورد استفاده برای تکثیر ژن های *ACS* و *EF-1a* در خیار

Table 1. Characteristics of the Primers Used for Amplification of the <i>ACS</i> and <i>EF-1a</i> Genes in Cucumber			
نام ژن	توالی آغازگر	دمای اتصال (سانتی گراد)	طول توالی تکثیری (جفت باز)
Gene name	Primer sequence	Annealing temperature (°C)	Amplicon length(bp)
<i>ACS</i>	F: 5-AGAGGAGTAACGAAGACGAGGAAG-3 R: 5-TTAGTAGCAGCCGCCACGAC-3	53.4	136
<i>EF-1a</i>	F: 5-ATTCAAGTATGCCTGGGTGC-3 R: 5-CAGTCAGCCTGTGATGTTCC-3	58	174

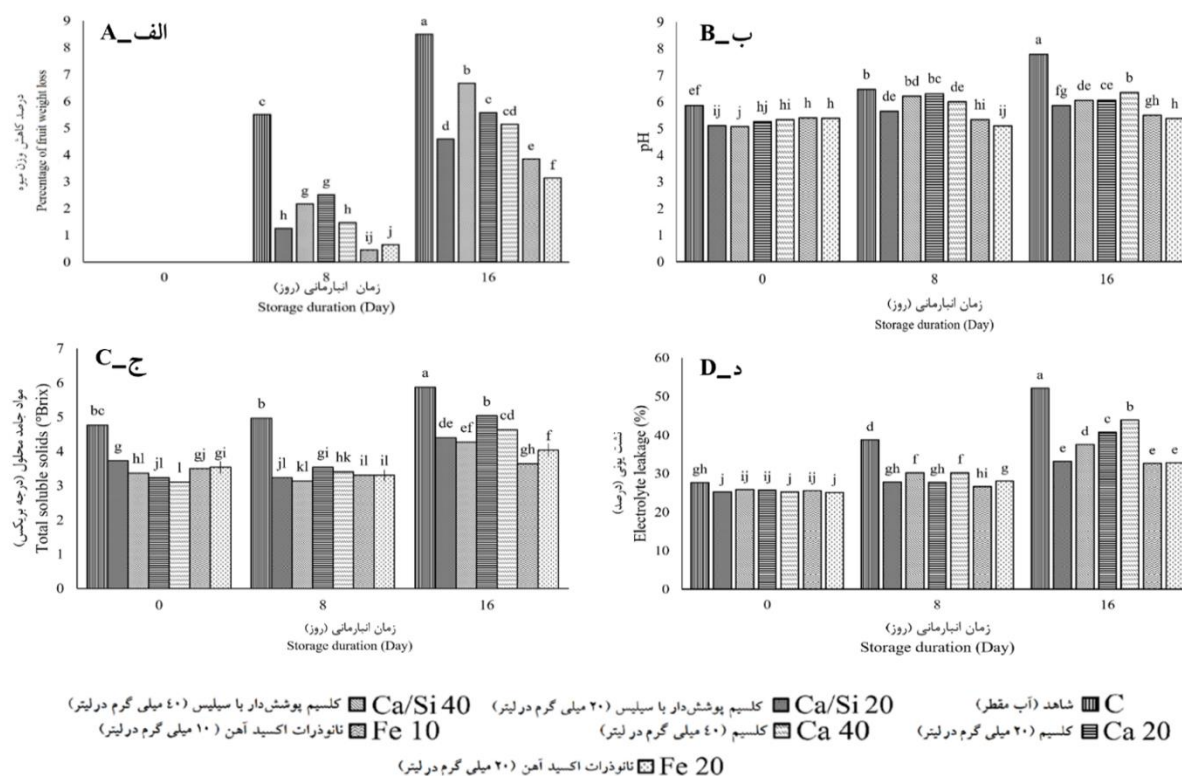
جدول ۱- تجزیه واریانس (ANOVA) صفات کیفی اندازه‌گیری‌شده در میوه خیار طی دوره پس از برداشت

Table 1. Analysis of variance (ANOVA) of the measured quality traits in cucumber fruit during the postharvest period

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی D.f	میانگین مربعات صفات Mean square (MS) of traits								
		درصد کاهش		مواد جامد	نشت	محتوای	محتوای	محتوای	فعالیت	فعالیت
		وزن میوه Percentage of fruit weight loss	pH	محلول Total soluble solids	یونی Electrolyte leakage	ویتامین ث Vitamin C content	کلسیم Calcium content	پتاسیم Potassium content	آنزیم پراکسیداز Peroxidase activity	آنزیم پلی فنول اکسیداز Polyphenol oxidase activity
تیمار Treatment	6	11.99**	1.98**	3.13**	139.87**	0.005**	340.26**	316.37**	0.018**	0.028**
زمان انبارمانی Storage duration	2	153.59**	3.42**	6.65**	959.34**	0.39**	1941.93**	790.63**	0.43**	1.63**
تیمار × زمان انبارمانی Treatment × Storage duration	12	3.29**	0.47**	0.29**	35.49**	0.001**	11.97**	39.97**	0.008**	0.019**
خطا Error	42	0.12	0.02	0.02	0.62	0.00005	0.29	0.16	0.001	0.001
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		14.42	2.62	4.28	2.49	1.46	1.38	1.35	12.11	9.40

** : اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

** : Significant at the 1% probability level



شکل ۱- اثر متقابل تیمار و مدت انبارمانی بر برخی صفات فیزیولوژیک و کیفی میوه خیار. (الف) درصد کاهش وزن، (ب) pH عصارة میوه، (ج) میزان مواد جامد محلول و (د) نشت یونی

Figure 1. Interactive effects of treatment and storage duration on selected physiological and quality traits of cucumber fruit. (A) percentage of weight loss, (B) pH of fruit extract, © total soluble solids (TSS), and (D) electrolyte leakage (EL)

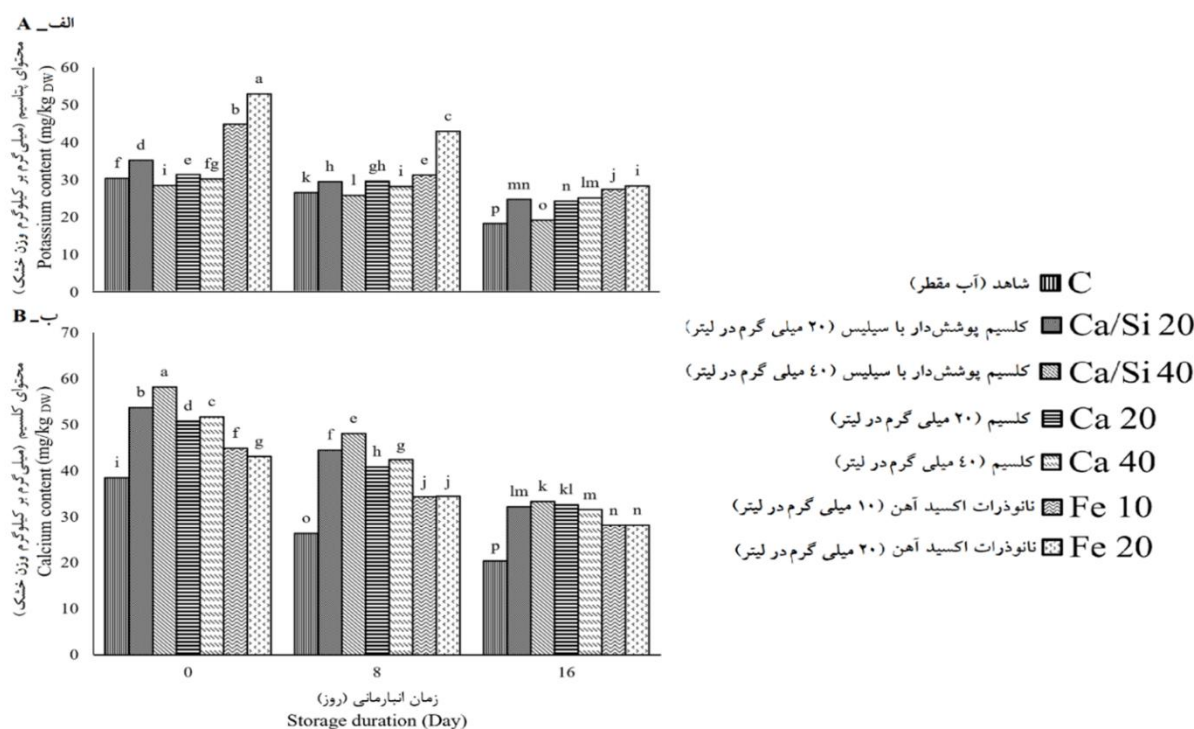
نشت یونی: نشت یونی با افزایش مدت انبارمانی در تمامی تیمارها افزایش یافت، اما میزان این افزایش در میوه های تیمار شده به طور معنی داری کمتر از شاهد بود (شکل ۱-د). در پایان دوره انبارمانی، بیشترین نشت یونی در میوه های شاهد مشاهده شد، در حالی که سه تیمار اکسید آهن ۱۰ میلی گرم در لیتر، اکسید آهن ۲۰ میلی گرم در لیتر و کلسیم-سیلیس ۴۰ میلی گرم در لیتر کمترین میزان نشت الکترولیت را نشان دادند و در یک گروه آماری قرار گرفتند. این نتایج بیانگر نقش مؤثر تیمارهای نانوذره در حفظ یکپارچگی غشای سلولی و کاهش آسیب های ناشی از انبارمانی است (شکل ۱-د).

محتوای عناصر پتاسیم و کلسیم: با افزایش مدت انبارمانی، غلظت هر دو عنصر پتاسیم و کلسیم در تمامی تیمارها کاهش یافت، اما میزان این کاهش در میوه های تیمار شده کمتر از شاهد بود (شکل ۲). بیشترین غلظت پتاسیم در روز برداشت در تیمار نانوذرات آهن ۲۰ میلی گرم در لیتر و کمترین مقدار آن

مواد جامد محلول (TSS): تغییرات میزان مواد جامد محلول (مجموع ترکیبات غیرآبی حل شده در عصارة میوه) در طول دوره انبارمانی تحت تأثیر متقابل تیمار و زمان قرار گرفت (شکل ۱-ج). برخلاف روند افزایشی عمومی در اکثر تیمارها، در تیمارهای نانوذرات کلسیم پوشش داده شده با سیلیس (غلظت های ۲۰ و ۴۰ میلی گرم در لیتر)، میزان TSS در روز هشتم انبارمانی نسبت به روز صفر کاهش یافت. با این حال، در پایان دوره انبارمانی (روز ۱۶)، تمامی تیمارها افزایش در میزان مواد جامد محلول را نشان دادند، هرچند شدت این افزایش در تیمارهای نانو به ویژه Ca/Si به مراتب کمتر از تیمار شاهد بود. بیشترین مقدار TSS در پایان دوره در میوه های شاهد (۵/۸ درجه بریکس) مشاهده شد، در حالی که تیمارهای نانوذره به ویژه نانوذرات کلسیم پوشش دار با سیلیس موجب تعدیل روند تغییرات و حفظ پایداری مواد جامد محلول در طی انبارمانی شدند (شکل ۱-ج).

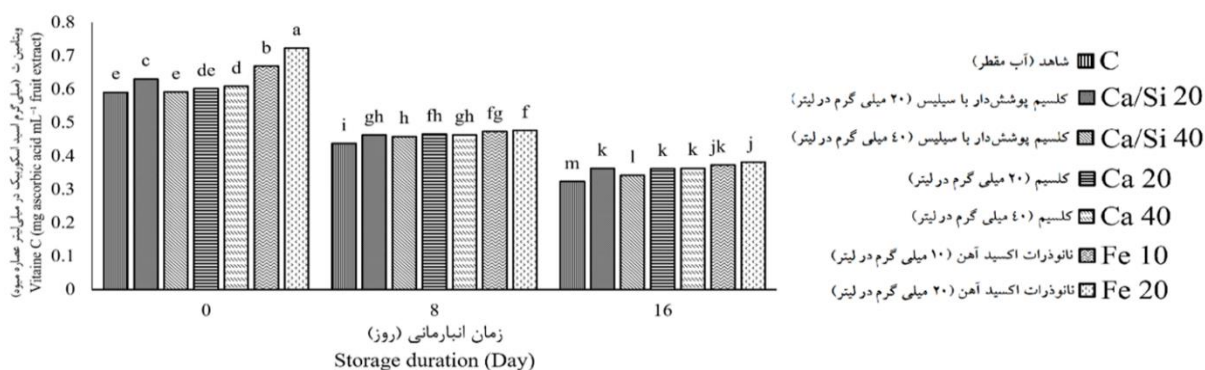
مختلف متفاوت بود (شکل ۳). در مقایسه با شاهد، کاربرد تیمارهای پیش از برداشت موجب حفظ بهتر ویتامین ث در طول دوره نگهداری شد. بیشترین مقدار ویتامین ث در روز برداشت در میوه‌های تیمار شده با نانوذرات آهن (۲۰ میلی گرم در لیتر) مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در میوه‌های شاهد پس از ۱۶ روز انبارمانی به دست آمد (شکل ۳). به طور کلی، تمامی تیمارهای نانوذره نسبت به شاهد موجب حفظ بیشتر این ترکیب در طول انبارمانی شدند.

در میوه‌های شاهد پس از ۱۶ روز انبارمانی مشاهده شد. همچنین، بیشترین غلظت کلسیم مربوط به تیمار نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس (۴۰ میلی گرم در لیتر) در روز برداشت بود، در حالی که میوه‌های شاهد در پایان دوره انبارمانی کمترین میزان کلسیم را داشتند (شکل ۲). به طور کلی، تیمارهای نانوذره موجب حفظ بهتر عناصر معدنی در طول انبارمانی شدند. محتوای ویتامین ث: محتوای ویتامین ث در طول انبارمانی در تمامی تیمارها کاهش یافت، اما میزان کاهش در تیمارهای



شکل ۲- اثر متقابل تیمار و مدت انبارمانی بر محتوای پتاسیم (الف) و کلسیم (ب) میوه خیار

Figure 2. Interactive effects of treatment and storage duration on potassium (a) and calcium (b) contents of cucumber fruit



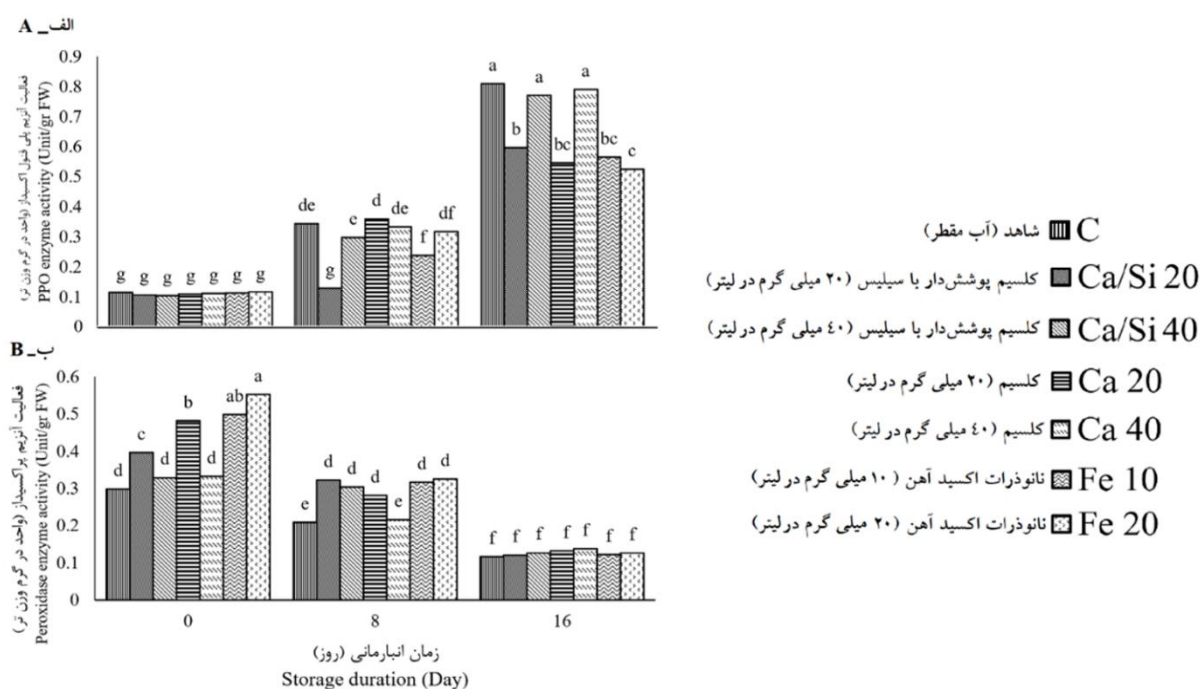
شکل ۳- اثر متقابل تیمار و مدت انبارمانی بر محتوای ویتامین ث میوه خیار

Figure 3. Interactive effects of treatment and storage duration on vitamin C content of cucumber fruit

بیشترین فعالیت در تیمار نانوذرات اکسید آهن ۲۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد، با افزایش مدت انبارمانی فعالیت آنزیم پراکسیداز در تمامی تیمارها کاهش یافت، به طوری که در روز شانزدهم اختلاف معنی داری بین تیمارها مشاهده نشد و همه آن‌ها در یک گروه آماری قرار گرفتند (شکل ۴-ب).

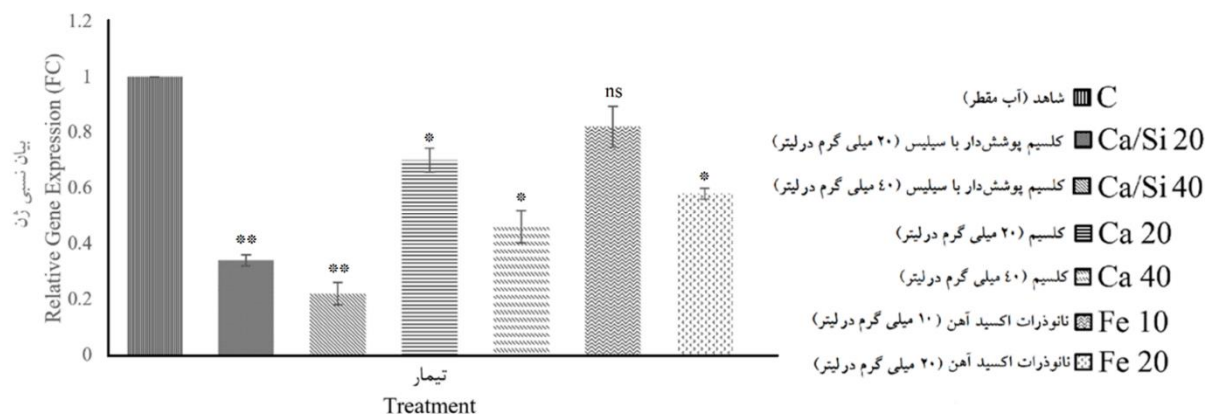
بیان ژن ACS: نتایج بیان نسبی ژن ACS نشان داد که تمامی تیمارهای نانوذره موجب کاهش بیان این ژن نسبت به شاهد شدند (شکل ۵). بیشترین میزان بیان ژن در تیمار شاهد مشاهده شد، در حالی که کاربرد نانوذرات کلسیم و نانوذرات کلسیم پوشش دار با سیلیس سبب کاهش بیان این ژن گردید. در بین تیمارها، کمترین میزان بیان نسبی ACS مربوط به نانوذرات کلسیم پوشش دار با سیلیس در غلظت ۴۰ میلی گرم در لیتر بود و پس از آن تیمارهای نانوذرات کلسیم پوشش دار با سیلیس در غلظت ۲۰ میلی گرم در لیتر و نانوذرات کلسیم ۴۰ میلی گرم در لیتر قرار گرفتند. تیمارهای نانوذرات اکسید آهن نیز بیان ژن ACS را نسبت به شاهد کاهش دادند، هرچند شدت این کاهش کمتر از تیمارهای حاوی کلسیم، به ویژه نانوذرات کلسیم پوشش دار با سیلیس، بود (شکل ۵).

فعالیت آنزیم‌های پلی فنول اکسیداز و پراکسیداز: فعالیت آنزیم پلی فنول اکسیداز با افزایش مدت انبارمانی در تمامی تیمارها روند افزایشی نشان داد (شکل ۴-الف). در روز برداشت اختلاف معنی داری بین تیمارها مشاهده نشد، اما پس از ۸ روز انبارمانی فعالیت این آنزیم افزایش یافت و تیمار نانوذرات کلسیم پوشش دار با سیلیس در غلظت ۲۰ میلی گرم در لیتر کمترین فعالیت را نشان داد. در پایان دوره انبارمانی (روز ۱۶)، فعالیت آنزیم پلی فنول اکسیداز در تمامی تیمارها به بیشترین مقدار خود رسید، با این حال شدت افزایش آن در میوه‌های تیمار شده کمتر از شاهد بود. بیشترین فعالیت این آنزیم در میوه‌های شاهد و کمترین مقدار در تیمار نانوذرات اکسید آهن ۲۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد، هرچند تیمارهای نانوکلسیم نیز در مقایسه با شاهد موجب کاهش فعالیت آنزیم پلی فنول اکسیداز شدند (شکل ۴-الف). در مقابل، فعالیت آنزیم پراکسیداز در طول دوره انبارمانی روند کاهشی نشان داد (شکل ۴-ب). بیشترین فعالیت این آنزیم در روز برداشت و کمترین مقدار آن در پایان دوره انبارمانی ثبت شد. اگرچه در روز صفر اختلاف معنی داری بین تیمارها وجود داشت و



شکل ۴- اثرات متقابل تیمار و مدت انبارمانی بر فعالیت پلی فنول اکسیداز (الف) و پراکسیداز (ب) در میوه خیار

Figure 4. Interaction effects of treatment and storage duration on polyphenol oxidase (a) and peroxidase (b) activities in cucumber fruit



شکل ۵- اثر تیمارهای مختلف نانوذرات بر بیان نسبی ژن ACS در میوه خیار.

Figure 5. Effect of different nanoparticle treatments on relative expression of the ACS gene in cucumber fruit. داده‌ها به صورت میانگین $\pm$ خطای استاندارد (Mean $\pm$ SE) نشان داده شده‌اند. اختلاف‌های معنی‌دار آماری بر اساس آزمون t تعیین شده‌اند. علامت‌های ستاره نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری سطح بیان ژن در مقایسه با گروه شاهد می‌باشند (* برای $P < 0.05$ و ** برای $P < 0.01$). علامت ns نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار ($P \geq 0.05$) در مقایسه با شاهد است.

Data are presented as Mean $\pm$ SE. Error bars represent the standard error of the mean. Statistical significance was determined using the Student's t-test. Asterisks indicate statistically significant differences compared to the control group (* $P < 0.05$ and ** $P < 0.01$). ns denotes non-significant differences ($P \geq 0.05$) compared to the control.

(Ngubane et al., 2026; Shan et al., 2023)

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های زوال پس از برداشت، افزایش افت وزن میوه است که عمدتاً ناشی از تعرق و تنفس بوده و به کاهش کیفیت و عمر انبارمانی محصول منجر می‌شود (Ashraf et al., 2025; Das et al., 2022). در این پژوهش، اگرچه افت وزن در همه تیمارها با افزایش مدت انبارمانی افزایش یافت، اما این روند در میوه‌های تیمار شده به‌طور محسوسی کندتر بود. در میان تیمارها، نانوذرات اکسید آهن (غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) مؤثرترین عملکرد را در جلوگیری از افت وزن نشان داد، هرچند تیمار نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس نیز به‌طور معنی‌داری موجب کاهش از دست‌دهی آب نسبت به شاهد شد. این موضوع را می‌توان از یک سو به نقش کلسیم در استحکام دیواره سلولی و حفظ یکپارچگی غشا، و از سوی دیگر به نقش آهن در تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو به کوتیکول و غشاهای سلولی نسبت داد که در نهایت منجر به کاهش تعرق و تنفس میوه شده است (Jaime-Guerrero et al., 2024). کلسیم با ایجاد پیوندهای عرضی میان پلیمرهای پکتینی دیواره سلولی، استحکام ساختاری بافت را افزایش داده

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد نانوذرات کلسیم، نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس و نانوذرات اکسید آهن توانستند روند زوال کیفی میوه خیار را طی انبارمانی به‌طور معنی‌داری کند کنند. در میان تیمارهای مورد بررسی، نانوذرات اکسید آهن (به‌ویژه در غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بیشترین کارایی را در حفظ شاخص‌های کلیدی از جمله کاهش وزن و حفظ اسیدیته نشان داد. همچنین، این تیمار به‌همراه نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس (۴۰ میلی‌گرم در لیتر) در حفظ یکپارچگی غشای سلولی و کمینه کردن نشت یونی موفق‌تر عمل کردند. این یافته‌ها بیانگر آن است که اثر نانوذرات معدنی تنها به تأمین عناصر غذایی محدود نمی‌شود، بلکه این ترکیبات از طریق اثر بر پایداری غشا، وضعیت آبی بافت، شدت تنفس، متابولیسم اکسیداتیو و مسیرهای مولکولی مرتبط با پیری، می‌توانند عمر انبارمانی میوه را افزایش دهند (Ashraf et al., 2025; Habibi et al., 2024; Shan et al., 2023). ویژگی‌هایی مانند سطح ویژه بالا، نفوذپذیری بیشتر و فراهمی زیستی مناسب، موجب می‌شود که نانوذرات در مقایسه با منابع معمول عناصر غذایی، کارایی بیشتری در بهبود پاسخ میوه به تنش‌های پس از برداشت داشته باشند

و در نتیجه، اتلاف آب و پیشرفت فرآیندهای مرتبط با زوال را محدود می‌کند (Jaime-Guerrero *et al.*, 2024). از سوی دیگر، سیلیس نیز با بهبود وضعیت آبی بافت، کاهش آسیب غشایی، افزایش تحمل به تنش‌های اکسیداتیو و حفظ پایداری سلولی، می‌تواند اثر حفاظتی کلسیم را تقویت کند (Ashraf *et al.*, 2023; Shan *et al.*, 2025)؛ بنابراین، عملکرد نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس احتمالاً ناشی از اثر هم‌افزای این دو عنصر در حفظ آب بافت، کاهش شدت تنفس و به تأخیر انداختن زوال فیزیولوژیک میوه بوده است (Habibi *et al.*, 2024; Shan *et al.*, 2023).

کاهش افت وزن مشاهده‌شده در این پژوهش احتمالاً با کاهش شدت فرآیندهای تنفسی و کند شدن متابولیسم پس از برداشت نیز مرتبط بوده است. افزایش شدت تنفس در طی انبارمانی با مصرف سریع‌تر ذخایر متابولیکی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و تسریع فرآیندهای پیری و زوال همراه است (Trivellini *et al.*, 2017; Y. Zhang *et al.*, 2025). در پژوهش حاضر، همزمانی کاهش افت وزن با حفظ بهتر pH، کاهش نشت یونی و محدود شدن فعالیت پلی‌فنل اکسیداز نشان می‌دهد که تیمارهای نانوذره احتمالاً از طریق حفظ یکپارچگی غشا و کاهش تنش اکسیداتیو، موجب کند شدن روند زوال فیزیولوژیک شده‌اند (Habibi *et al.*, 2024; Shan *et al.*, 2023). در واقع، حفظ پایداری غشا موجب کاهش از دست رفتن آب، محدود شدن اختلالات متابولیکی و حفظ کیفیت بافت در طول انبارمانی می‌شود؛ از این رو، هر عاملی که از تخریب غشا جلوگیری کند، می‌تواند در کاهش افت وزن، حفظ کیفیت ظاهری و به تأخیر انداختن روند زوال میوه مؤثر باشد (Ashraf *et al.*, 2025; Jaime-Guerrero *et al.*, 2024).

در پژوهش حاضر، pH میوه در تمامی تیمارها با افزایش مدت انبارمانی روند افزایشی نشان داد که این تغییر احتمالاً ناشی از کاهش تدریجی اسیدهای آلی و مصرف آن‌ها به‌عنوان سوسترای تنفس در طی انبارمانی است (Walker and Famiani, 2018). با این حال، افزایش pH در تیمارهای نانوذرات، به‌ویژه نانوذرات اکسید آهن، نسبت به شاهد کمتر

بود و در مراحل پایانی انبارمانی، تیمار اکسید آهن ۲۰ میلی گرم در لیتر مؤثرترین عملکرد را در محدود کردن افزایش pH نشان داد. این یافته نشان می‌دهد که کاهش شدت متابولیسم تنفسی و تأخیر در تجزیه اسیدهای آلی، احتمالاً در حفظ بهتر کیفیت شیمیایی میوه نقش داشته است. همچنین، اثرات محافظتی تیمارهای کلسیمی نیز در برخی مراحل انبارمانی قابل مشاهده بود، اما این اثر در مقایسه با اکسید آهن، به‌ویژه در پایان دوره انبارمانی، کمتر بود (Aghdam *et al.*, 2012). این یافته با گزارش‌های پیشین مبنی بر نقش کلسیم در حفظ اسیدیته قابل تیر، کاهش سرعت رسیدگی و به تأخیر انداختن فرآیندهای زوال در میوه‌ها همخوانی دارد (Aghdam *et al.*, 2012; Jaime-Guerrero *et al.*, 2024).

مواد جامد محلول نیز در طول انبارمانی افزایش یافتند، اما شدت این افزایش در میوه‌های تیمار شده کمتر از شاهد بود. این افزایش معمولاً به تغییرات متابولیسم کربوهیدرات‌ها و نیز کاهش آب بافت و تغلیظ نسبی مواد محلول نسبت داده می‌شود (Sudheer and Indira, 2007; Zhang *et al.*, 2024). با توجه به اینکه در تیمارهای نانوذره افت وزن نیز کمتر بود، به نظر می‌رسد افزایش TSS در شاهد تا حدی ناشی از اتلاف بیشتر آب و افزایش غلظت نسبی مواد محلول بوده است (Valverde-Miranda *et al.*, 2021). از سوی دیگر، کاهش شدت فرآیندهای زوال و کند شدن تغییرات متابولیکی در تیمارهای حاوی نانوکلسیم احتمالاً از افزایش سریع TSS جلوگیری کرده است (Aghdam *et al.*, 2012)؛ بنابراین، تغییرات TSS باید همزمان با شاخص‌هایی مانند افت وزن، اسیدیته و نشت یونی تفسیر شود و نباید به‌تنهایی به‌عنوان شاخص رسیدگی یا کیفیت میوه در نظر گرفته شود (Valverde-Miranda *et al.*, 2021).

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، کاهش معنی‌دار نشت یونی در میوه‌های تیمار شده با نانوذرات بود؛ با این حال، در پایان دوره انبارمانی، سه تیمار اکسید آهن ۱۰، ۴۰ میلی گرم در لیتر، اکسید آهن ۲۰، ۴۰ میلی گرم در لیتر و کلسیم-سیلیس ۴۰ میلی گرم در لیتر کمترین میزان نشت یونی را نشان دادند و از این نظر در یک گروه آماری قرار گرفتند. این نتیجه بیانگر آن

در تیمارهای نانوذره نشان می‌دهد که این تیمارها احتمالاً با حفظ بهتر یکپارچگی غشا و کاهش تنش اکسیداتیو، سرعت تخریب ویتامین ث را کاهش داده‌اند (Habibi et al., 2024; Shan et al., 2023).

در بررسی عناصر معدنی نیز مشخص شد که تیمارهای نانوذره موجب حفظ غلظت بالاتر کلسیم و پتاسیم در بافت میوه طی دوره انبارمانی شدند. کلسیم علاوه بر نقش ساختمانی در دیواره سلولی، در حفظ پایداری غشا، تنظیم انتقال یون‌ها، حفظ همئوستازی یونی و انتقال پیام‌های سلولی نیز نقش اساسی دارد؛ از این رو، کاهش غلظت آن معمولاً با افزایش نفوذپذیری غشا، اختلال در عملکرد سلولی و تسریع فرآیندهای زوال همراه است (Hepler, 2005; White and Broadley, 2003). بنابراین، حفظ بیشتر کلسیم در میوه‌های تیمار شده احتمالاً یکی از عوامل مؤثر در کاهش نشت یونی، حفظ استحکام بافت و به تأخیر افتادن زوال فیزیولوژیک در این پژوهش بوده است (Jaime-Guerrero et al., 2024). پتاسیم نیز به عنوان فراوان‌ترین کاتیون سلولی، نقش مهمی در تنظیم فشار اسمزی، حفظ تورژسانس سلول، انتقال قندها، فعال‌سازی بسیاری از آنزیم‌ها و حفظ روابط آبی بافت ایفا می‌کند (Zörb et al., 2014). در پژوهش حاضر، حفظ همزمان غلظت بالاتر کلسیم و پتاسیم در تیمارهای نانوذره نشان می‌دهد که این تیمارها احتمالاً توانسته‌اند با حفظ ساختار سلولی و همئوستازی یونی، از کاهش کیفیت میوه در طی انبارمانی جلوگیری کنند. این یافته با کاهش افت وزن، کاهش نشت یونی و حفظ بهتر سایر شاخص‌های کیفی مشاهده شده در این پژوهش نیز همخوانی دارد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که میان وضعیت عناصر معدنی، ویتامین ث و نشت یونی ارتباط نزدیکی وجود دارد. تیمارهایی که مقدار بیشتری از کلسیم و پتاسیم را حفظ کردند، کاهش کمتری در ویتامین ث و نشت یونی نیز نشان دادند. این همزمانی بیانگر آن است که حفظ وضعیت تغذیه‌ای بافت، یکی از عوامل کلیدی در کنترل شدت تنش اکسیداتیو و به تأخیر انداختن پیری بوده است. بنابراین، اثر مثبت نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس تنها ناشی از افزایش کلسیم نیست، بلکه حاصل تعامل میان حفظ عناصر معدنی، افزایش ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی و پایداری ساختاری بافت است.

است که تیمارهای مذکور، احتمالاً از طریق حفظ یکپارچگی غشا و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، در محدود کردن نشت الکترولیت و تأخیر در زوال سلولی مؤثر بوده‌اند (Habibi et al., 2012; Lurie and Watkins, 2024; al.). در طی انبارمانی، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) موجب پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، اختلال در عملکرد غشا و در نهایت افزایش خروج الکترولیت‌ها از سلول می‌شود (Trivellini et al., 2017; M. Zhang et al., 2025). بنابراین، کاهش نشت یونی در تیمارهای حاوی نانوکلسیم و نانوکلسیم پوشش‌دار با سیلیس نشان می‌دهد که این تیمارها احتمالاً با حفظ یکپارچگی غشا و کاهش شدت آسیب اکسیداتیو، روند زوال فیزیولوژیک میوه را کند کرده‌اند. نقش کلسیم در تثبیت ساختار غشا و حفظ انسجام دیواره سلولی به خوبی شناخته شده است، در حالی که گزارش شده است سیلیس با افزایش ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی و محدود کردن تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، این اثر حفاظتی را تقویت می‌کند (Zhu and Gong, 2014). از این رو، حفظ بهتر یکپارچگی غشا احتمالاً یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در کاهش افت وزن، حفظ اسیدیت و افزایش عمر انبارمانی مشاهده شده در این پژوهش بوده است.

از نظر کیفیت تغذیه‌ای، ویتامین ث یکی از مهم‌ترین آنتی‌اکسیدان‌های غیرآزمی و در عین حال یکی از حساس‌ترین شاخص‌های ارزیابی کیفیت میوه در طول انبارمانی است و کاهش آن معمولاً نشان‌دهنده پیشرفت فرآیندهای پیری و افزایش تنش اکسیداتیو می‌باشد (Davey et al., 2000; Habibi et al., 2024). در پژوهش حاضر، مقدار ویتامین ث در تمامی تیمارها با افزایش مدت انبارمانی کاهش یافت، اما این کاهش در میوه‌های تیمار شده، به ویژه در تیمار نانوذرات کلسیم پوشش‌دار با سیلیس، به طور معنی‌داری کمتر از شاهد بود. از آنجا که اسید اسکوربیک یکی از نخستین ترکیباتی است که در واکنش به تنش اکسیداتیو و ختنی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مصرف می‌شود، حفظ غلظت بالاتر آن بیانگر کاهش شدت فرآیندهای اکسیداتیو و کند شدن روند زوال بافت است (Gill and Tuteja, 2010; Smirnoff, 2018). هم‌راستایی این نتایج با کاهش نشت یونی و افت وزن

از نظر فعالیت آنزیمی، نتایج نشان داد که فعالیت پلی فنل اکسیداز (PPO) در تمامی تیمارها با افزایش مدت انبارمانی روند افزایشی داشت، اما شدت این افزایش در میوه های تیمار شده، به ویژه در تیمارهای نانوذرات کلسیم و نانوذرات کلسیم پوشش دار با سیلیس، به طور معنی داری کمتر از شاهد بود. پلی فنل اکسیداز یکی از مهم ترین آنزیم های دخیل در قهوه ای شدن آنزیمی است و افزایش فعالیت آن معمولاً با تخریب غشاهای سلولی، تماس بیشتر آنزیم با ترکیبات فنلی و تسریع فرآیندهای زوال پس از برداشت همراه است (Yoruk and Marshall, 2003). در پژوهش حاضر، کاهش فعالیت PPO در تیمارهای نانوذره احتمالاً ناشی از حفظ بهتر یکپارچگی غشا و محدود شدن تماس آنزیم با سوبستراهای فنلی بوده است. همچنین، حفظ بیشتر ویتامین ث در این تیمارها نیز می تواند در کاهش قهوه ای شدن نقش داشته باشد، زیرا اسید اسکوربیک با احیای کینون ها و جلوگیری از تجمع آن ها، واکنش های قهوه ای شدن آنزیمی را به تأخیر می اندازد (Queiroz et al., 2008)؛ بنابراین، مهار نسبی فعالیت PPO را می توان یکی از عوامل مؤثر در حفظ کیفیت ظاهری و تأخیر در زوال میوه در تیمارهای نانوذره دانست. در مقابل، فعالیت پراکسیداز (POD) در تمامی تیمارها با افزایش مدت انبارمانی روند کاهشی نشان داد. اگرچه این آنزیم یکی از اجزای اصلی سامانه دفاع آنتی اکسیدانی گیاه محسوب می شود و در حذف پراکسید هیدروژن و کاهش آسیب اکسیداتیو نقش دارد، اما کاهش فعالیت آن در مراحل پایانی انبارمانی در بسیاری از محصولات باغبانی به کاهش تدریجی ظرفیت متابولیکی سلول و پیشرفت فرآیند پیری نسبت داده شده است (Imahori, 2012). با این حال، فعالیت بالاتر POD در تیمارهای نانوذره در مراحل ابتدایی انبارمانی نشان می دهد که این تیمارها احتمالاً توانسته اند ظرفیت دفاع آنتی اکسیدانی بافت را برای مدت طولانی تری حفظ کنند. در مقابل، کاهش تدریجی فعالیت این آنزیم در انتهای دوره نگهداری را می توان بازتابی از پیشرفت طبیعی فرآیند پیری و کاهش فعالیت متابولیکی سلول ها دانست. مهم ترین یافته مولکولی این پژوهش، کاهش معنی دار بیان نسبی ژن *ACS* در میوه های تیمار شده با نانوذرات، به ویژه نانوذرات

کلسیم پوشش دار با سیلیس، بود. ژن *ACS*، آنزیم مسئول مرحله محدودکننده سرعت در مسیر بیوسنتز اتیلن را کد می کند؛ از این رو، کاهش بیان این ژن معمولاً با کاهش ظرفیت سنتز اتیلن و به تأخیر افتادن فرآیندهای وابسته به پیری و زوال همراه است (Pattyn et al., 2021). در پژوهش حاضر، کاهش بیان ژن *ACS* نشان می دهد که تیمارهای نانوذره، علاوه بر حفظ ویژگی های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی میوه، احتمالاً در سطح مولکولی نیز توانسته اند مسیر بیوسنتز اتیلن را تعدیل کنند. هم راستایی این یافته با کاهش افت وزن، حفظ بیشتر اسیدیته، کاهش نشت یونی و محدود شدن فعالیت پلی فنل اکسیداز، بیانگر آن است که بهبود کیفیت و افزایش عمر انبارمانی میوه در تیمارهای نانوذره، دست کم تا حدودی، با تنظیم بیان ژن های کلیدی مرتبط با بیوسنتز اتیلن همراه بوده است. با توجه به اینکه اتیلن حتی در میوه هایی مانند خیار نیز در تنظیم فرآیندهای پیری، پاسخ به تنش و زوال پس از برداشت نقش دارد، کاهش بیان ژن *ACS* می تواند یکی از مکانیسم های مؤثر در کند شدن روند زوال مشاهده شده در این پژوهش باشد (Houben and Van de Poel, 2019).

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می دهد که کاربرد نانوذرات معدنی، به ویژه نانوذرات اکسید آهن (۲۰ میلی گرم در لیتر) و نانوذرات کلسیم پوشش داده شده با سیلیس (۴۰ میلی گرم در لیتر)، راهبردی مؤثر برای حفظ کیفیت میوه خیار طی انبارمانی است. این تیمارها، به ویژه نانوذرات اکسید آهن، با کاهش افت وزن و حفظ پایداری pH، و همچنین از طریق کاهش نشت یونی، حفظ ویتامین ث، کنترل فعالیت آنزیم های اکسیداتیو و کاهش بیان ژن *ACS*، توانستند سرعت زوال را به طور محسوسی کاهش دهند. به نظر می رسد عملکرد برتر این تیمارها ناشی از یک اثر هم افزای چندجانبه بر استحکام ساختار سلولی، تعادل اکسایش-کاهش و تنظیم مسیرهای مولکولی مرتبط با پیری باشد. پیشنهاد می شود در مطالعات آینده، علاوه بر *ACS* سایر ژن های کلیدی مسیر بیوسنتز و سیگنالینگ اتیلن نیز بررسی شوند تا سازوکارهای مولکولی دخیل با دقت بیشتری روشن گردد.

References

- Aghdam, M.S., Hassanpouraghdam, M.B., Paliyath, G. and Farmani, B. (2012). The language of calcium in postharvest life of fruits, vegetables and flowers. *Scientia Horticulturae*, 144: 102-115.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.07.007>
- Alvaro, J.E., Moreno, S., Dianeze, F., Santos, M., Carrasco, G. and Urrestarazu, M. (2009). Effects of peracetic acid disinfectant on the postharvest of some fresh vegetables. *Journal of Food Engineering*, 95(1): 11-15.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.05.003>
- Ashraf, M.A., Khan, A.S., Azam, M., Ayyub, S., Kaleem, M.M., Nawaz, S., Abubakar, M., Khalid, B., Riaz, T., Asim, M., Ahmed, M.M. and Ateeq, M. (2025). Innovative technologies in postharvest management of fruits and vegetables: a review. *European Food Research and Technology*, 251(11): 3445-3463.
<https://doi.org/10.1007/s00217-025-04861-4>
- Azizollahi, F. and Mousavi, M. (2025). From cellular preparedness to intelligent response: molecular mechanisms underlying the differential tolerance of date palm cultivars to leaf drying disorder. *Plant Genetic Research*, 12(2): 89-100 (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/pgr.2025.2070113.1015>
- Chance, B. and Maehly, A.C. (1955). [136] Assay of catalases and peroxidases. (Chance and Maehly). *Methods in Enzymology*, 2(C): 764-775.
[https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(55\)02300-8](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02300-8)
- Chen, D., Liu, L., Gao, Z., Zhao, J., Yang, Y. and Shen, Z. (2025). Preservation of Fruit Quality at Postharvest Through Plant-Based Extracts and Elicitors. *Horticulturae*, 11(10): 1186.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae11101186>
- Corrêa, C.V., de Sousa Gouveia, A.M., Martins, B.N.M., Lanna, N.D.B.L., Tavares, A.E.B., Mendonça, V.Z., Jorge, L.G., Inácio Cardoso, A.I. and Evangelista, R.M. (2018). Effect of top-dressed potassium fertilization on the yield and quality of cucumber. *Journal of Plant Nutrition*, 41(10): 1345-1350.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1447580>
- Das, S., Chatterjee, A. and Pal, T.K. (2022). Comparative studies on physicochemical and nutritional values of organically and conventionally grown *Cucumis sativus* stored at different temperatures in different household packaging. *Organic Agriculture*, 12(4): 563-579 .
<https://doi.org/10.1007/s13165-022-00409-y>
- Davey, M.W., Montagu, M.V., Inzé, D., Sanmartin, M., Kanellis, A., Smirnoff, N., Benzie, I.J.J., Strain, J.J., Favell, D. and Fletcher, J. (2000). Plant L-ascorbic acid: chemistry, function, metabolism, bioavailability and effects of processing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(7): 825-860.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(20000515\)80:7<825::AID-JSFA598>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(20000515)80:7<825::AID-JSFA598>3.0.CO;2-6)
- Dorling, S.J. and McManus, M.T. (2012). The Fate of ACC in Higher Plants. In *The Plant Hormone Ethylene* (Vol. 44, pp. 83-115).
<https://doi.org/10.1002/9781118223086.ch4>
- Gebretsadik, K., Qiu, X., Dong, S., Miao, H. and Bo, K. (2021). Molecular research progress and improvement approach of fruit quality traits in cucumber. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(11): 3535-3552.
<https://doi.org/10.1007/s00122-021-03895-y>
- Gill, S.S. and Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12): 909-930.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- Habibi, F., Boakye, D.A., Chang, Y., Casorzo, G., Hallman, L.M., Madison, M., Clavijo-Herrera, J., Sarkhosh, A. and Liu, T. (2024). Molecular mechanisms underlying postharvest physiology and metabolism of fruit and vegetables through multi-omics technologies. *Scientia Horticulturae*, 324: 112562.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112562>
- Hepler, P.K. (2005). Calcium: A Central Regulator of Plant Growth and Development. *The Plant Cell*, 17(8): 2142-2155.
<https://doi.org/10.1105/tpc.105.032508>
- Houben, M. and Van de Poel, B. (2019). 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid oxidase (ACO): The enzyme that makes the plant hormone ethylene. *Frontiers in Plant Science*, 10: 695.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00695>
- Hurr, B.M., Huber, D.J., Vallejos, C.E. and Talcott, S.T. (2009). Developmentally dependent responses of detached cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruit to exogenous ethylene. *Postharvest Biology and Technology*, 52(2): 207-215.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.12.006>

- Imahori, Y. (2012). Postharvest stress treatments in fruits and vegetables. In *Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism, Productivity and Sustainability* (pp. 347-358).
https://doi.org/10.1007/9781461406341_18
- Jaime-Guerrero, M., Álvarez-Herrera, J.G. and Fischer, G. (2024). Effect of calcium on fruit quality: A review. *Agronomia Colombiana*, 42(1): 1-42.
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v42n1.112026>
- Jama, S.O., Lufu, R., Opara, U.L., Crouch, E. and Tsige, A.A. (2026). Edible Coatings for Fresh Fruits: Functional Roles, Optimization Strategies, and Analytical Perspectives. *Plants*, 15(1): 132.
<https://doi.org/10.3390/plants15010132>
- Javid, H., Fatima, U., Rukhsar, A., Hussain, S., Bibi, S., Bodlah, M.A., Shahzad, H.H., Dilshad, M., Waqas, M. and Sharif, A. (2024). Phytochemical, nutritional and medicinal profile of *Cucumis sativus* L. (Cucumber). *Food Science and Engineering*, 5(2): 358-377.
<https://doi.org/10.37256/fse.5220244795>
- Kathayat, K., Rawat, M., Kandpal, G., Pandey, G., Chauhan, P. and Tiwari, R. (2018). Genetic variability in cucumber (*Cucumis sativus* L.): A review. *Plant Archives*, 18(2): 1223-1228.
- Kaur, M. and Sharma, P. (2022). Recent advances in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 97(1): 3-23.
<https://doi.org/10.1080/14620316.2021.1945956>
- Latimer, G.W. (2023). *Official methods of analysis of AOAC INTERNATIONAL: 3-volume set*. Oxford University Press.
- Livak, K.J. and Schmittgen, T.D. (2001). Analysis of Relative Gene Expression Data Using Real-Time Quantitative PCR and the 2- $\Delta\Delta$ CT Method. *methods*, 25(4): 402-408.
<https://doi.org/10.1006/meth.2001.1262>
- Lurie, S. and Watkins, C.B. (2012). Superficial scald, its etiology and control. *Postharvest Biology and Technology*, 65: 44-60.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.11.001>
- Mehravi, S., Hanifei, M., Khodadadi, M., Gholizadeh, A. and Sohrabi, S.S. (2023). Evaluation of relationships between traits of anise (*Pimpinella anisum* L.) genotypes in response to drought stress using the structural equation modeling and biplot method. *Acta Physiologiae Plantarum*, 45(1): 10.
<https://doi.org/10.1007/s11738-022-03491-7>
- Mirzaei Fard, Z. (2024). Investigating the effect of calcium oxide nanoparticles and calcium nanoparticles coated with silica, amine and iron oxide on some morphophysiological and biochemical characteristics in the growth stages and post- harvesting of Saba variety cucumber fruit. M.Sc., Thesis. Lorestan University, Khorramabad, Iran (In Persian).
- Moore, B.M. and Flurkey, W. (1990). Sodium dodecyl sulfate activation of a plant polyphenoloxidase. Effect of sodium dodecyl sulfate on enzymatic and physical characteristics of purified broad bean polyphenoloxidase. *Journal of Biological Chemistry*, 265(9): 4982-4988.
[https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)34072-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)34072-4)
- Ngubane, S., Adeyemi, J.O., Roy, S. and Fawole, O.A. (2026). Nanoparticle-Based Techniques for Preserving Fruit and Vegetables Postharvest Quality: Mechanism and Efficacy in Food Packaging Technology. *Food and Bioprocess Technology*, 19(3): 110.
<https://doi.org/10.1007/s11947-025-04185-x>
- Pattyn, J., Vaughan-Hirsch, J. and Van de Poel, B. (2021). The regulation of ethylene biosynthesis: a complex multilevel control circuitry. *New Phytologist*, 229(2): 770-782.
<https://doi.org/10.1111/nph.16873>
- Queiroz, C., Mendes Lopes, M.L., Fialho, E. and Valente-Mesquita, V.L. (2008). Polyphenol Oxidase: Characteristics and Mechanisms of Browning Control. *Food Reviews International*, 24(4): 361-375.
<https://doi.org/10.1080/87559120802089332>
- Raz Magid, A., Sela, N., Raphael, G., Leibman, D., Dombrovsky, A. and Ziv, C. (2026). Cucumber (*Cucumis sativus*) fruit deterioration in cold storage is aggravated by cucumber green mottle mosaic virus infection. *Postharvest Biology and Technology*, 231: 113829.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113829>
- Saeidi, S., Ismaili, A. and Sohrabi, S.S. (2025). Identification, functional prediction, and expression analysis of long non-coding RNAs in lentil (*Lens culinaris* L.) under salt stress. *Plant Genetic Research*, 12(2): 55-74 (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/pgr.2025.2081840.1027>

- Saqib, S., Zaman, W., Ayaz, A., Habib, S., Bahadur, S., Hussain, S., Muhammad, S. and Ullah, F. (2020). Postharvest disease inhibition in fruit by synthesis and characterization of chitosan iron oxide nanoparticles. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 28: 101729.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101729>
- Seifollahi, S., Behtash, F., Seyed Hajizadeh, H. and Molaali Abasiyan, S. (2026). The effect of zinc and manganese application on the yield and micronutrient elements in leaf and fruit of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Plant Process and FunctionIranin Society Of Plant Physiology*, 15(71): 117 (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/15.71.117>
- Shan, Y., Li, T., Qu, H., Duan, X., Farag, M.A., Xiao, J., Gao, H. and Jiang, Y. (2023). Nano-preservation: An emerging postharvest technology for quality maintenance and shelf life extension of fresh fruit and vegetable. *Food Frontiers*, 4(1): 100-130.
<https://doi.org/10.1002/fft2.201>
- Sharma, H.K., Kumar, N. and Aaqib Sheikh, M. (2026). Cucumber (*Cucumis Sativus* L.). In H.K. Sharma, N. Kumar, and M. Aaqib Sheikh (Eds.), *Nutraceutical Values and Processing Techniques of Gourds as Vegetables* (pp. 283-319). Springer Nature Switzerland.
https://doi.org/10.1007/978-3-032-19600-2_10
- Shiomi, S., Nakamoto, J.I., Yamamoto, M., Kubo, Y., Nakamura, R. and Inaba, A. (1999). Expression of ACC synthase and ACC oxidase genes in different tissues of immature and mature cucumber fruits. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 68(4): 830-832.
- Smirnoff, N. (2018). Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals. *Free Radical Biology and Medicine*, 122: 116-129.
<https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.03.033>
- Sudheer, K. and Indira, V. (2007). *Post harvest technology of horticultural crops* (Vol. 7). New India Publishing.
- Taverniers, I., De Loose, M. and Van Bockstaele, E. (2004). Trends in quality in the analytical laboratory. II. Analytical method validation and quality assurance. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 23(8): 535-552.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2004.04.001>
- Trivellini, A., Cocetta, G., Francini, A. and Ferrante, A. (2017). Reactive oxygen species production and detoxification during leaf senescence. In *Reactive Oxygen Species and Antioxidant Systems in Plants: Role and Regulation under Abiotic Stress* (pp. 115-128).
https://doi.org/10.1007/978-981-10-5254-5_5
- Valverde-Miranda, D., Díaz-Pérez, M., Gómez-Galán, M. and Callejón-Ferre, Á.-J. (2021). Total soluble solids and dry matter of cucumber as indicators of shelf life. *Postharvest Biology and Technology*, 180: 111603.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111603>
- Walker, R.P. and Famiani, F. (2018). Organic Acids in Fruits. In *Horticultural Reviews* (pp. 371-430).
<https://doi.org/10.1002/9781119431077.ch8>
- White, P.J. and Broadley, M.R. (2003). Calcium in Plants. *Annals of Botany*, 92(4): 487-511.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Xu, J. and Zhang, S. (2014). Ethylene Biosynthesis and Regulation in Plants. In *Ethylene in Plants* (pp. 1-25).
https://doi.org/10.1007/978-94-017-9484-8_1
- Yoruk, R. and Marshall, M.R. (2003). Physicochemical properties and function of plant polyphenol oxidase: a review. *Journal of Food Biochemistry*, 27(5): 361-422.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2003.tb00289.x>
- Zhang, M., Ma, M., Lang, H. and Jiang, M. (2025). Research Advances and Perspectives on Early Flowering Traits in Cucumber. *Plants*, 14(8): 1158.
<https://doi.org/10.3390/plants14081158>
- Zhang, Y., Hou, S., Athanassiou, C.G., Guo, L., Zhao, S., Hu, Q., Ding, C. and Liu, Q. (2025). Regulatory Role and Mechanisms of Reactive Oxygen Species in Grains During Post-Harvest Storage: The Vanguard Sentinel of Quality Deterioration. *Food Reviews International*, 41(5): 1259-1289.
<https://doi.org/10.1080/87559129.2024.2430652>
- Zhang, Y., Wang, H., Chen, H., Liu, R., Chen, H., Fang, X., Xiao, J., Wu, W. and Gao, H. (2024). The crucial evaluation indexes and relative measurement methods of edible value for fresh fruits and vegetables: A review. *Future Postharvest and Food*, 1(2): 222-236.
<https://doi.org/10.1002/fpf2.12026>

- Zhong, Y., Wu, X., Zhang, L., Zhang, Y., Wei, L. and Liu, Y. (2024). The roles of nitric oxide in improving postharvest fruits quality: Crosstalk with phytohormones. *Food Chemistry*, 455: 139977.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139977>
- Zhu, Y. and Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2): 455-472.
<https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>
- Zörb, C., Senbayram, M. and Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9): 656-669.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>