Iranian Food Science and Technology Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Research Article
Vol. 22, No. 6, Jan.-Feb. 2027, p. 667-689

Effect of Thyme, Lemongrass, and Cinnamon Essential Oils on Oxidative Stress and Postharvest Quality of Bell Pepper Infected with *Botrytis cinerea*

J. Raiesi [1], F. Abdollahi [1]*, L. Jafari [1], A. Mirzaalian Dastjerdi [1]
1- Department of Horticulture Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
(*- Corresponding Author Email: fabdollahi@hormozgan.ac.ir)

Received: 23.06.2026
Revised: 11.08.2026
Accepted: 02.09.2026
Available Online: 08.09.2026

How to cite this article:
Raiesi, J., Abdollahi, F., Jafari, L., & Mirzaalian Dastjerdi, A. (2027). Effect of thyme, lemongrass, and cinnamon essential oils on oxidative stress and postharvest quality of bell pepper infected with *Botrytis cinerea* . *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 22*(6), 667-689. (In Persian).
https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.99527.1597

Introduction

Gray mold, caused by *Botrytis cinerea*, is one of the most destructive postharvest diseases of bell pepper, resulting in severe quality deterioration and substantial economic losses during storage and marketing. Growing concerns about the adverse effects of synthetic fungicides, together with the increasing demand for safe and environmentally sustainable preservation strategies, have stimulated interest in natural plant-derived alternatives. Essential oils extracted from medicinal plants possess antimicrobial and antioxidant properties that can inhibit pathogen development while enhancing the fruit's natural defense mechanisms. Therefore, this study aimed to evaluate the efficacy of selected medicinal plant essential oils in preserving postharvest quality and mitigating oxidative stress in bell pepper fruits artificially inoculated with *B. cinerea*.

Materials and Methods

A *Botrytis cinerea* isolate (IRAN4283C) was obtained from the Iranian Research Institute of Plant Protection and cultured on potato dextrose agar (PDA) under sterile conditions. Essential oils of Shirazi thyme (*Zataria multiflora*), garden thyme (*Thymus vulgaris*), lemongrass (*Cymbopogon citratus*), and cinnamon (*Cinnamomum verum*) were extracted using a Clevenger apparatus, and their purity (100%) was verified by the manufacturers. Healthy, uniform bell pepper fruits harvested from a commercial greenhouse in Jiroft, Kerman Province, Iran, were surface-disinfected with 1% sodium hypochlorite and inoculated with a *B. cinerea* spore suspension (1×10^6 spores mL^{-1}). After 24 h, the fruits were immersed for 2 min in 0.5% or 1% essential oil solutions, Luna Sensation® fungicide, or distilled water (control). The treated fruits were packed in perforated polyethylene bags and stored at 6 ± 1°C and 85–90% relative humidity for 30 days. Fruit quality parameters were evaluated at 0, 10, 20, and 30 days of storage. The experiment was arranged as a factorial design with two factors (treatment and storage time) in a completely randomized design. Data were analyzed using SAS software (version 9.4), and treatment means were compared using Duncan's multiple range test at $P \leq 0.05$.

Results and Discussion

Storage duration significantly reduced fruit quality, as indicated by decreases in vitamin C content, chlorophyll *a* and *b* concentrations, and the activities of catalase (CAT) and glutathione reductase (GR). In contrast, malondialdehyde (MDA) content and the activities of phenylalanine ammonia-lyase (PAL) and polyphenol oxidase (PPO) increased throughout storage. However, the magnitude of these changes varied among treatments. Among all treatments, 1% garden thyme essential oil exhibited the greatest protective effect against storage-induced deterioration. Compared with the control, this treatment increased vitamin C content by 36%, chlorophyll *a* by 21%, chlorophyll *b* by 67%, CAT activity by 403%, and GR activity by 136%. Conversely, it reduced MDA

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.99527.1597

content by 39%, PAL activity by 23%, and PPO activity by 53%. In addition, it suppressed carotenoid accumulation, suggesting delayed fruit ripening and senescence during cold storage. These findings indicate that garden thyme essential oil effectively enhanced the antioxidant defense system, mitigated oxidative damage, and maintained the postharvest quality of *B. cinerea*-infected bell pepper fruits during cold storage.

Conclusion

Application of 1% garden thyme essential oil effectively preserved the postharvest quality and extended the shelf life of bell pepper fruits infected with *Botrytis cinerea* by enhancing antioxidant defense mechanisms and reducing oxidative stress. These findings suggest that garden thyme essential oil has considerable potential as an environmentally friendly alternative to synthetic fungicides for postharvest disease management. Further research should focus on validating its effectiveness under commercial storage conditions, developing nano formulations and edible coating systems, and evaluating its applicability to other horticultural crops.

Keywords: Antioxidant enzymes, Bell pepper, Garden thyme essential oil, Oxidative stress, Postharvest shelf life

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۲، شماره ٦، بهمن-اسفند ١٤٠٥، ص. ٦٨٩-٦٦٧

اثر اسانس‌های آویشن، علف‌لیمو و دارچین بر تنش اکسیداتیو و کیفیت پس از برداشت فلفل دلمه‌ای آلوده به *Botrytis cinerea*

ژیلا رییسی[۱]- فرزین عبدالهی[۱*]- لیلا جعفری[۱]- عبدالمجید میرزاعلیان دستجردی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱

چکیده

پوسیدگی خاکستری ناشی از قارچ *Botrytis cinerea* یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت و ماندگاری فلفل دلمه‌ای پس از برداشت است. این پژوهش با هدف ارزیابی اثر اسانس‌های گیاهی بر شاخص‌های تنش اکسیداتیو، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ماندگاری پس از برداشت فلفل دلمه‌ای آلوده به *Botrytis cinerea* انجام شد. بدین‌منظور، میوه‌های سالم فلفل دلمه‌ای پس از ضدعفونی، با سوسپانسیون اسپور قارچ *B. cinerea* (۱×۱۰^{۶} اسپور در میلی‌لیتر) تلقیح شدند و پس از ۲۴ ساعت، به‌مدت ۲ دقیقه در محلول اسانس‌های آویشن شیرازی (*Zataria multiflora* Boiss.)، آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.)، علف لیمو (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf) و دارچین (*Cinnamomum verum* J.Presl) در غلظت‌های ۰/۵ و ۱ درصد، قارچ‌کش تجاری Luna Sensation® و آب مقطر (شاهد) غوطه‌ور شدند. نمونه‌ها به‌مدت ۳۰ روز در دمای ۱±۶ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۵ تا ۹۰ درصد نگهداری شدند. نتایج نشان داد که افزایش مدت انبارمانی موجب کاهش معنی‌دار ویتامین ث، کلروفیل *a*، کلروفیل *b*، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، گلوتاتیون ردوکتاز و افزایش مالون‌دی‌آلدئید، فعالیت آنزیم‌های فنیل‌آلانین آمونیالیاز و پلی‌فنل‌اکسیداز شد. با این حال، تیمارهای اسانسی به‌ویژه آویشن باغی ۱ درصد توانستند این تغییرات را به‌طور معنی‌داری تعدیل کنند. این تیمار در مقایسه با شاهد، ویتامین ث را ۳۶ درصد، کلروفیل *a* و *b* را به‌ترتیب ۸۳/۲۰ و ۶۶/۶۶ درصد و فعالیت کاتالاز و گلوتاتیون ردوکتاز را به‌ترتیب ۴۰۳/۲۴ و ۱۳۶/۳۶ درصد افزایش داد. همچنین میزان مالون‌دی‌آلدئید، کاروتنوئید، فعالیت فنیل‌آلانین آمونیالیاز و پلی‌فنل‌اکسیداز به‌ترتیب ۴۸/۳۹، ۶۲/۳۳، ۲۳/۱۹ و ۵۲/۷۹ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. بر این اساس، اسانس آویشن باغی ۱ درصد می‌تواند به‌عنوان یک گزینه طبیعی و سازگار با محیط زیست برای بهبود کیفیت و افزایش ماندگاری پس از برداشت فلفل دلمه‌ای مطرح شود.

واژه‌های کلیدی: اسانس آویشن باغی، تنش اکسیداتیو، فلفل دلمه‌ای، کیفیت پس از برداشت، *Botrytis cinerea*

مقدمه

میوه‌ها و سبزیجات از مهم‌ترین منابع غذایی انسان محسوب می‌شوند که علاوه بر تأمین انرژی، سرشار از ویتامین‌ها، مواد معدنی، فیبر غذایی و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی هستند و نقش مهمی در ارتقای سلامت عمومی دارند. با این حال، یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در زنجیره تولید تا مصرف این محصولات، ضایعات پس از برداشت است که به‌طور عمده ناشی از فعالیت عوامل بیماری‌زا، به‌ویژه قارچ‌ها، و شرایط نامناسب نگهداری می‌باشد (Chowdhury *et al*., 2023; Kumar, Ye, Dobretsov, & Dutta, 2019). در کشورهای در حال توسعه، به‌دلیل محدودیت‌های فناوری‌های پس از برداشت، میزان این خسارات بسیار بالا بوده و گاهی به ۵۰ درصد نیز می‌رسد (Spadaro, Ciavorella, Dianpeng, Garibaldi, & Gullino, 2010). در

۱- گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
(*- نویسنده مسئول. Email: fabdollahi@hormozgan.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.99527.1597

میان محصولات باغبانی، فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annuum* L.) به‌دلیل ارزش غذایی بالا، تنوع مصرف و بازارپسندی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این محصول سرشار از ترکیبات زیست‌فعال مانند ویتامین ث، کاروتنوئیدها، ترکیبات فنولی و فلاونوئیدها بوده و نقش مهمی در سلامت انسان ایفا می‌کند (Corpas *et al*., 2018). با وجود این مزایا، فلفل دلمه‌ای پس از برداشت به شدت حساس بوده و به‌دلیل نرخ بالای تنفس، تعرق، نرمی بافت و آلودگی‌های میکروبی، به سرعت دچار افت کیفیت و فساد می‌شود (Tiamiyu, Adebayo, & Ibrahim, 2023).

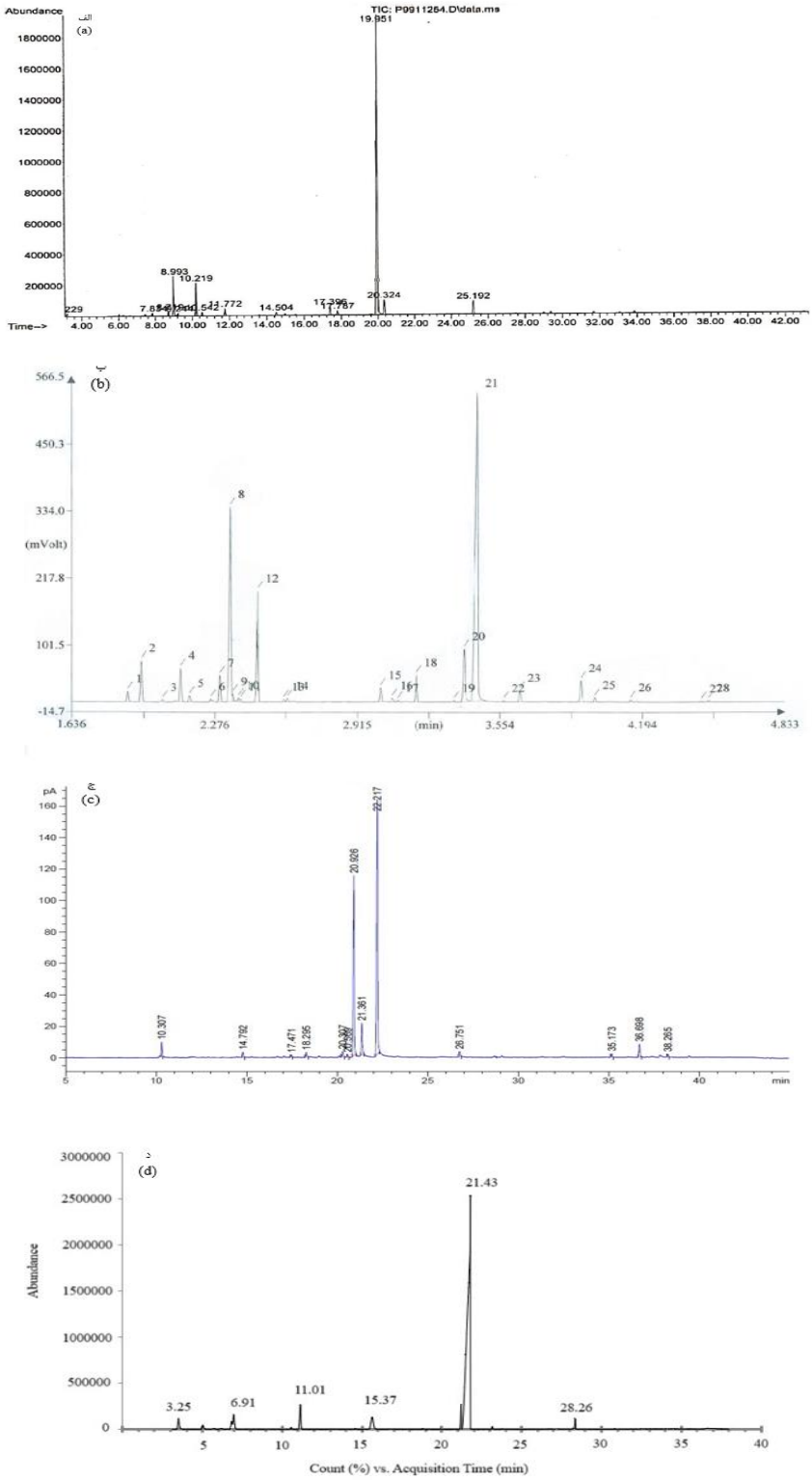
یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده در کاهش عمر ماندگاری فلفل دلمه‌ای، بیماری‌های پس از برداشت به‌ویژه کپک خاکستری است که توسط قارچ *Botrytis cinerea* ایجاد می‌شود. این قارچ به‌دلیل دامنه میزبانی گسترده، توانایی بالای تولید اسپور و گسترش سریع در شرایط رطوبتی و دمایی مناسب، خسارات اقتصادی قابل توجهی در مراحل برداشت، حمل‌ونقل و انبارداری ایجاد می‌کند (Wang *et al*., 2022). استفاده گسترده از قارچ‌کش‌های شیمیایی اگرچه در کنترل این بیماری مؤثر بوده است، اما به‌دلیل ایجاد باقی‌مانده‌های شیمیایی، خطرات زیست‌محیطی و بروز مقاومت در پاتوژن‌ها، محدودیت‌های جدی دارد (Islam *et al*., 2024). در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به استفاده از ترکیبات طبیعی به‌عنوان جایگزین‌های ایمن و پایدار برای کنترل بیماری‌های پس از برداشت معطوف شده است. در این میان، اسانس‌های گیاهی به‌دلیل داشتن ترکیبات فعال زیستی مانند ترپنوئیدها و فنول‌ها، دارای خاصیت ضدقارچی، ضدباکتریایی و آنتی‌اکسیدانی بوده و می‌توانند رشد عوامل بیماری‌زا را مهار کنند (Guo *et al*., 2023). این ترکیبات از طریق اختلال در غشای سلولی قارچ‌ها، مهار فعالیت آنزیمی و جلوگیری از جوانه‌زنی اسپورها، موجب کاهش شدت بیماری می‌شوند (Gyawali & Ibrahim, 2014). با وجود گزارش‌های متعدد درباره اثر ضدقارچی اسانس‌های گیاهی بر عوامل بیماری‌زای پس از برداشت (Álvarez-García, Moumni, & Romanazzi, 2023; Allagui, Moumni, & Romanazzi, 2023; Boubaker *et al*., 2016)، اطلاعات موجود درباره کارایی آن‌ها بر بیماری کپک خاکستری در فلفل دلمه‌ای، به‌ویژه در شرایط پس از برداشت، همچنان محدود است. همچنین، مطالعات اندکی به بررسی هم‌زمان اثر اسانس‌ها و صمغ‌های گیاهی بر کنترل این بیماری و حفظ ویژگی‌های کیفی میوه طی دوره نگهداری پرداخته‌اند؛ ازاین‌رو، هنوز راهکارهای طبیعی و مؤثر برای جایگزینی قارچ‌کش‌های شیمیایی در این محصول به‌طور کامل شناسایی نشده‌اند.

رقم کاپیا (Kapia) یکی از ارقام تجاری مهم فلفل دلمه‌ای با میوه‌های کشیده، گوشتی و بازارپسند است که به‌دلیل کیفیت مطلوب، ارزش اقتصادی بالا و کاربرد گسترده در بازار تازه‌خوری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این حال، حساسیت این رقم به بیماری‌های پس از برداشت، به‌ویژه کپک خاکستری ناشی از *Botrytis cinerea*، موجب کاهش عمر ماندگاری، افت کیفیت و افزایش ضایعات اقتصادی آن می‌شود. ازاین‌رو، این رقم به‌عنوان مدلی مناسب برای ارزیابی راهکارهای طبیعی مدیریت بیماری‌های پس از برداشت انتخاب شد. اسانس‌های گیاهی به‌دلیل منشأ طبیعی، زیست‌تخریب‌پذیری، ایمنی نسبی برای مصرف‌کننده و دارا بودن ترکیبات زیست‌فعال با خواص ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی، به‌عنوان گزینه‌هایی امیدبخش برای کاهش وابستگی به قارچ‌کش‌های شیمیایی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با وجود این، اطلاعات موجود درباره اثر هم‌زمان این ترکیبات بر کنترل آلودگی قارچی، حفظ کیفیت پس از برداشت و تعدیل پاسخ‌های فیزیولوژیک و آنتی‌اکسیدانی فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا هنوز محدود است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر اسانس‌های آویشن باغی، آویشن شیرازی، علف لیمو و دارچین در مقایسه با قارچ‌کش تجاری Luna Sensation® بر میزان آلودگی به *B. cinerea*، ویژگی‌های کیفی، شاخص‌های تنش اکسیداتیو و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا انجام شد. نوآوری این پژوهش در مقایسه هم‌زمان چهار اسانس گیاهی با قارچ‌کش تجاری و ارزیابی جامع اثر آن‌ها بر کنترل آلودگی، حفظ کیفیت و پاسخ‌های دفاعی میوه در یک رقم تجاری مهم فلفل دلمه‌ای است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند شواهد علمی ارزشمندی برای توسعه راهکارهای زیست‌پایه و کم‌خطر در مدیریت بیماری‌های پس از برداشت و افزایش ماندگاری فلفل دلمه‌ای فراهم کند.

مواد و روش‌ها

تهیه و کشت قارچ *B. cinerea*

در این مطالعه، اثرات اسانس‌های گیاهی دارویی (آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو و دارچین) بر ماندگاری پس از برداشت فلفل دلمه‌ای‌های آلوده به قارچ *B. cinerea* بررسی شد. ایزوله قارچ شماره مجموعه (IRAN4283C) از مؤسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی ایران در تهران تأمین شد. برای کشت قارچ، از محیط آگار سیب‌زمینی–دکستروز (PDA) استفاده شد که شامل ۲۰۰ گرم عصاره سیب‌زمینی جوشانده، ۲۰ گرم دکستروز و ۲۰ گرم آگار در یک لیتر آب مقطر بود. برای گسترش قارچ، قطعه‌ای از لبه فعال کلنی به صفحه پتری حاوی PDA منتقل و تحت شرایط استریل در هود لامینار کشت داده شد (Hou, Zhang, Zhao, & Zhou, 2020). این روش اطمینان می‌دهد که قارچ برای آزمایش‌های بعدی در شرایط کنترل‌شده و بدون آلودگی محیطی رشد می‌کند.



شکل ۱- کروماتوگرام الف) اسانس آویشن باغی (*Thymus Vulgaris* L.)، (ب) آویشن شیرازی (*Zataria multiflora* Boiss.)، (ج) علف لیمو (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf)، (د) دارچین (*Cinnamomum verum* J.Presl)

Fig. 1. Chromatogram of (a) essential oil of garden thyme (*Thymus Vulgaris* L.), (b) Shirazi thyme (*Zataria multiflora* Boiss.), (c) lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf), (d) cinnamon (*Cinnamomum verum* J.Presl)

استخراج اسانس‌های گیاهی

برگ گیاهان دارویی پس از جمع‌آوری، شناسایی و خشک شدن در سایه، آسیاب شدند. اسانس هر گیاه به روش هیدرودیستیلاسیون با استفاده از دستگاه کلونجر (Clevenger apparatus) به‌مدت ۳ ساعت استخراج شد. اسانس‌های استخراج‌شده پس از آبگیری با سدیم سولفات بدون آب، در ویال‌های شیشه‌ای تیره‌رنگ در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تا زمان انجام آزمایش نگهداری شدند. بازده استخراج نیز محاسبه و ثبت گردید. ترکیبات شیمیایی اسانس‌ها با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنج جرمی (GC-MS) شناسایی شدند (شکل ۱).

جدول ۱- ترکیبات موجود در اسانس آویشن باغی

Table 1- Constituents present in the essential oils of the garden thyme

ردیف No	ترکیب Constituent	شاخص بازداری RI	درصد %
1.	α- Thujene	932	0.2
2.	α– Pinene	944	1.1
3.	β– Pinene	971	0.1
4.	3- Octanone	976	1.5
5.	Myrcene	1005	0.2
6.	α- Terpinene	1038	1.5
7.	*p*- Cymene	1050	10.3
8.	Limonene	1053	0.2
9.	1,8- Cineole	1058	0.2
10.	γ- terpinene	1079	7.5
11.	Linalool	1108	1.1
12.	Terpinene-4-ol	1217	1.2
13.	α- Terpineol	1230	0.4
14.	Thymol	1317	61.8
15.	Carvacrol	1327	4.2
16.	Thymol acetate	1359	3.5
17.	Carvacrol acetate	1370	0.1
18.	E- caryophyllene	1470	2.3
19.	Aromadendrene	1488	0.8
	Total		**98.2**

جدول ۲- ترکیبات موجود در اسانس آویشن شیرازی

Table 2- Constituents present in the essential oils of the shirazi thyme

ردیف No	ترکیب Constituent	شاخص بازداری RI	درصد %
1.	α-Thujene	930	1.5
2.	α-Pinene	939	0.9
3.	Camphene	957	0.5
4.	1-octen-3-ol	980	0.4
5.	β-Pinene	984	0.3
6.	Myrcene	988	2.1
7.	α-Terpinene	1022	2.1
8.	ρ-Cymene	1029	8.3
9.	Limonene	1033	0.4
10.	1,8-Cineole	1036	0.4
11.	γ-Terpinene	1063	20.6
12.	cis-Sabinene hydrate	1057	1.1
13.	Linalool	1100	1.7
14.	Borneol	1164	0.9
15.	Terpinen-4-ol	1175	0.4
16.	Thymol methyl ether	1232	1.0
17.	Carvacrol methyl ether	1242	0.6
18.	Thymol	1290	51.2
19.	Carvacrol	1294	2.2
20.	(ε)- Caryophyllene	1415	1.7
	Total		**98.3**

جدول ۳- ترکیبات موجود در اسانس علف لیمو

Table 3- Constituents present in the essential oils of the lemongrass

ردیف No	ترکیب Constituent	شاخص بازداری RI	درصد %
1.	myrcene	990	1.0
2.	*Z*-*β*-ocimene	1038	0.2
3.	linalool	1101	0.7
4.	isocitral–exo	1139	0.2
5.	citronellal	1153	0.4
6.	*Z*-isocitral	1167	1.1
7.	*E*-isocitral	1179	0.2
8.	citronellol	1229	0.5
9.	nerol	1236	0.2
10.	neral	1244	32.0
11.	geraniol	1254	2.9
12.	geranial	1273	50.8
13.	geranyl acetate	1363	0.1
14.	*E*-caryophyllene	1425	0.3
15.	γ-cadinene	1513	0.2
16.	δ-cadinene	1518	0.4
17.	germacrene D-4-ol	1567	0.5
18.	5-epi-7-epi-α-eudesmol	1610	0.2
19.	10-epi-γ-eudesmol	1628	4.1
20.	epi-α-cdinol	1639	0.2
21.	α-cadinol	1659	1.0
22.	selin-11-en-4-α-ol	1665	0.7
23.	eudesm-7(11)-en-4-ol	1701	0.7
	Total		**98.6**

جدول ٤- ترکیبات موجود در اسانس دارچین

Table 4- Constituents present in the essential oils of the cinnamon

ردیف No	ترکیب Constituent	شاخص بازداری RI	درصد %
1.	α-pinene	899	1.3
2.	Sabinene	972	0.2
3.	p-cymene	1027	0.9
4.	1,8-cineole	1030	0.3
5.	γ-terpinene	1055	4.4
6.	linalool	1105	19.3
7.	methyl eugenol	1389	3.7
8.	β-caryophyllene	1408	0.8
9.	(E)-Cinnamaldehyde	1421	61.6
10.	*trans*-Cinnamic acid	1462	4.1
11.	α- selinene	1494	1.3
	Total		**97.9**

شناسایی ترکیبات براساس مقایسه طیف‌های جرمی با کتابخانه NIST و شاخص بازداری (Retention Index) انجام شد (جدول ۱، ۲، ۳ و ۴). برای تهیه محلول‌های تیمار، اسانس‌های استخراج‌شده با استفاده از آب مقطر استریل حاوی ۰/۱ توئین ۸۰ درصد (حجمی/حجمی) به‌عنوان امولسیفایر به غلظت‌های ۰/۵ و ۱ درصد (حجمی/حجمی) تهیه شدند. محلول‌ها به‌مدت ۱۰ دقیقه با همزن مغناطیسی همگن شده و بلافاصله برای غوطه‌ورسازی میوه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

اعمال تیمار و نگهداری فلفل دلمه‌ای پس از برداشت

فلفل دلمه‌ای‌های سالم، یکنواخت، با رنگ‌های قرمز تا نارنجی و گوشت‌دار از یک گلخانه تجاری در جیرفت، استان کرمان، ایران برداشت شدند. هر تیمار شامل سه تکرار و هر تکرار شامل چهار میوه بود؛ بنابراین در هر تاریخ نمونه‌برداری، ۱۲ میوه برای هر تیمار مورد ارزیابی قرار گرفت. میوه‌ها به آزمایشگاه فیزیولوژی دانشگاه هرمزگان منتقل شده، با محلول ۱ درصد هیپوکلریت سدیم ضدعفونی، با آب مقطر شسته و در دمای ۱ ± ۲۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. میوه‌ها

با عمق ۲ میلی‌متر زخمی و با تعلیق آبی اسپورهای قارچ خاکستری (*B. cinerea*) با غلظت ۱×۱۰^{۶} اسپور/میلی‌لیتر تلقیح شدند. پس از ۲۴ ساعت برای نفوذ قارچ، میوه‌ها به‌مدت ۲ دقیقه در محلول‌های روغن‌های ضروری چهار گیاه دارویی با غلظت‌های ۰/۵ و ۱ درصد، قارچ‌کش‌های تجاری (Luna Sensation®) با غلظت‌های ۰/۵ و ۱ درصد یا آب مقطر (کنترل) غوطه‌ور شدند. پس از تیمار، فلفل‌ها در ظروف پلی‌اتیلن با سوراخ بسته‌بندی شدند (هر ظرف شامل ۱۰ میوه) و در دمای ۱ ± ۶ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۸۵–۹۰ درصد نگهداری شدند. ارزیابی ویژگی‌های پس از برداشت و کیفیت میوه در روزهای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دوره نگهداری انجام شد.

ویتامین ث

اندازه‌گیری ویتامین ث (اسید آسکوربیک) در فلفل دلمه‌ای معمولاً با روش تیتراسیون با ۲،۶–دی‌کلروفنل‌ایندوفنل انجام می‌شود. در این روش ابتدا مقدار مشخصی از نمونه فلفل (حدود ۵ تا ۱۰ گرم) توزین شده و با محلول اسید متافسفریک ۳ درصد یا اسید اگزالیک ۰/۴ درصد در هاون کاملاً همگن می‌شود تا از اکسید شدن ویتامین ث جلوگیری گردد. سپس عصاره حاصل از صافی عبور داده شده و محلول شفاف به‌دست آمد. در ادامه، مقدار معینی از عصاره (مثلاً ۱۰ میلی‌لیتر) در ارلن ریخته شده و با محلول استاندارد ۲،۶–دی‌کلروفنل‌ایندوفنل تیتر می‌شود تا زمانی‌که رنگ محلول از بی‌رنگ به صورتی کمرنگ پایدار تغییر کند (نقطه پایانی). حجم مصرفی معرف ثبت شده و مقدار ویتامین ث بر اساس فاکتور تیتراسیون یا منحنی استاندارد به صورت میلی‌گرم اسید آسکوربیک در ۱۰۰ گرم وزن تر نمونه محاسبه شد (Hallmann & Rembiałkowska, 2012).

رنگیزه‌های فتوسنتزی

برای استخراج و اندازه‌گیری کلروفیل و کاروتنوئیدهای برگ، از حلال استون ۸۰ درصد استفاده شد. بدین منظور، ۰/۵ گرم نمونه برگ تازه در هاون کاملاً ساییده و سپس با ۵ میلی‌لیتر مخلوط استون و آب (۲۰:۸۰ حجمی/حجمی) ترکیب گردید. نمونه‌ها به‌مدت ۱۵ دقیقه و با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. پس از جداسازی عصاره رویی، فرآیند استخراج دو بار دیگر بر روی رسوب باقی‌مانده تکرار شد تا استخراج رنگیزه‌ها به‌طور کامل انجام گیرد.

جذب نوری عصاره‌های به‌دست‌آمده در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. محاسبه مقادیر کلروفیل *a*، کلروفیل *b*، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها براساس روابط ارائه‌شده توسط (Lichtenthaler & Buschmann, 2001) انجام گرفت. در این روابط،کلروفیل *a* (Chl *a*) بیانگر مقدار کلروفیل Chl *b* ،*a* نشان‌دهنده مقدار کلروفیل *b*، کلروفیل کل (Chl T) معرف کلروفیل کل، کاروتنوئید بیانگر میزان کاروتنوئیدها و A_{λ} نشان‌دهنده جذب نمونه در طول موج λ نانومتر است. دستگاه اسپکتروفتومتر با استفاده از استون ۸۰ درصد به‌عنوان شاهد (بلانک) کالیبره شد. نتایج رنگیزه‌های فتوسنتزی به‌صورت میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ (mg g^{-1} FW) گزارش گردید.

$$Ch\mathit{a} = 12.7A_{663} - 2.69\ A_{645}$$
$$Ch\mathit{b} = 22.9A_{645} - 4.68\ A_{663}$$
$$ChT = Ch\mathit{a} + Ch\mathit{b}$$
$$Carotenoid = (1000\ A_{470} - 1/8\ Ch\mathit{a} - 85.02\ Ch\mathit{b})/198$$

مالون دی‌آلدئید

میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی بر اساس روش (Heath & Packer, 1968) و با اندازه‌گیری مالون‌دی‌آلدئید (MDA) حاصل از واکنش پراکسیداسیون لیپیدها با تیوباربیتوریک اسید (TBA) تعیین شد. بدین‌منظور، ۰/۲ گرم از بافت تازه برگ در ۵ میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک اسید (TCA) ۰/۱ درصد (وزنی/حجمی) در هاون چینی به‌خوبی همگن گردید. سپس نمونه‌ها به‌مدت ۲۰ دقیقه و با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. پس از سانتریفیوژ، یک میلی‌لیتر از محلول رویی با ۴ میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک اسید ۲۰ درصد حاوی ۰/۵ درصد تیوباربیتوریک اسید (وزنی/حجمی) مخلوط شد. مخلوط حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. برای توقف واکنش، لوله‌های حاوی نمونه بلافاصله به حمام یخ منتقل شده و به‌مدت ۳۰ دقیقه نگهداری شدند. سپس نمونه‌های سردشده به‌مدت ۱۰ دقیقه و با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند. جذب نوری محلول حاصل با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۳۲ نانومتر اندازه‌گیری شد. همچنین جذب در طول موج ۶۰۰ نانومتر به‌عنوان جذب غیراختصاصی ناشی از ناخالصی‌ها ثبت و از مقدار جذب در ۵۳۲ نانومتر کسر گردید. مقدار مالون‌دی‌آلدئید با استفاده از ضریب خاموشی ۱۵۵ میلی‌مولار بر سانتی‌متر محاسبه شد و نتایج به صورت نانومول MDA در گرم وزن تر برگ (µmol g^{-1} FW) گزارش گردید.

$$MDA = [(532nm \times 600nm) / (QD \times QF)] \times DF$$

MDA = میزان مالون دی‌آلدئید بر حسب نانومول بر گرم وزن تر (که تقسیم بر پروتئین شده و غلظت نهایی به‌صورت نانومول بر میلی‌گرم پروتئین بیان شده است)

QD= قطر کووت (یک سانتی‌متر)

QF= ضریب خاموشی (ضریب خاموشی ۱۵۵ نانومول بر سانتی‌متر)

DF=ضریب رقت (در این روش ۲۰ می‌باشد).

df=فاکتور رقیق‌کننده

تهیه عصاره آنزیمی

غلظت پروتئین کل عصاره‌های آنزیمی با استفاده از روش برادفورد (Bradford, 1976) و با بهره‌گیری از رنگ Coomassie Brilliant Blue G-250 تعیین شد. آلبومین سرم گاوی (Bovine Serum Albumin; BSA) به‌عنوان استاندارد برای تهیه منحنی استاندارد مورد استفاده قرار گرفت و فعالیت آنزیم‌ها بر حسب واحد فعالیت ویژه (U mg^{-1} protein) بیان شد.

فعالیت آنزیم کاتالاز

فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) براساس روش (Hasanuzzaman, Nahar, & Fujita, 2012) اندازه‌گیری شد. آنزیم کاتالاز با تجزیه پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به آب و اکسیژن، نقش مهمی در حذف گونه‌های فعال اکسیژن ایفا می‌کند و برای انجام این واکنش به عامل احیاکننده نیاز ندارد. برای سنجش فعالیت این آنزیم، مخلوط واکنش شامل ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار (pH=7)، ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی و ۵ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد تهیه شد. سپس کاهش جذب نوری محلول در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر به‌مدت ۲ دقیقه و در فواصل زمانی ۲۰ ثانیه‌ای ثبت گردید. پراکسید هیدروژن در طول موج ۲۴۰ نانومتر دارای بیشترین میزان جذب است و با آغاز واکنش آنزیمی، به‌تدریج توسط آنزیم کاتالاز تجزیه می‌شود؛ در نتیجه میزان جذب نوری در طول زمان کاهش می‌یابد. فعالیت آنزیم براساس سرعت کاهش جذب ناشی از تجزیه H_2O_2 محاسبه شد. نتایج فعالیت آنزیم به‌صورت واحد فعالیت بر میلی‌گرم پروتئین (min g^{-1} protein) بیان گردید. یک واحد فعالیت آنزیم کاتالاز به مقدار آنزیمی اطلاق می‌شود که قادر باشد یک میلی‌مول پراکسید هیدروژن را در مدت یک دقیقه در هر میلی‌گرم پروتئین تجزیه کند.

فعالیت آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز

فعالیت آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز (Glutathione Reductase; GR) براساس روش اندازه‌گیری اکسیداسیون NADPH و کاهش گلوتاتیون اکسیدشده (GSSG) تعیین شد. این آنزیم نقش مهمی در حفظ تعادل اکسیداتیو سلول از طریق احیای گلوتاتیون اکسیدشده به فرم احیا شده (GSH) ایفا می‌کند. برای سنجش فعالیت آنزیم، مخلوط واکنش شامل بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=7.5)، EDTA ۱ میلی‌مولار، NADPH (۰/۱ میلی‌مولار) و مقدار مشخصی از عصاره آنزیمی تهیه شد. واکنش با افزودن گلوتاتیون اکسیدشده به‌عنوان سوبسترا آغاز گردید. کاهش جذب نوری در طول موج ۳۴۰ نانومتر به‌دلیل اکسید شدن NADPH و تبدیل آن به $NADP^+$ به‌مدت ۲ تا ۳ دقیقه و در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه‌ای با استفاده از اسپکتروفتومتر ثبت شد. سرعت کاهش جذب نوری متناسب با فعالیت آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز است. فعالیت آنزیم به‌صورت واحد بر میلی‌گرم پروتئین (min g^{-1} FW) بیان شد (Schaedle & Bassham, 1977).

فعالیت آنزیم فنیل آلانین‌آمونیالیاز

فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین آمونیالیاز (Phenylalanine Ammonia-Lyase; PAL) براساس روش تبدیل ال-فنیل‌آلانین به ترانس-سینامیک اسید اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمایش، مخلوط واکنش شامل ۲/۹ میلی‌لیتر بافر بورات سدیم ۵۰ میلی‌مولار (pH=8.8)، یک میلی‌لیتر ال-فنیل‌آلانین ۲۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی تهیه گردید. مخلوط واکنش به‌مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انکوبه شد. پس از پایان زمان واکنش، میزان تشکیل ترانس-سینامیک اسید با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم PAL براساس افزایش جذب ناشی از تولید ترانس-سینامیک اسید محاسبه گردید. یک واحد فعالیت آنزیم PAL به مقدار آنزیمی اطلاق می‌شود که در شرایط آزمایش، یک میکرومول ترانس-سینامیک اسید را در دقیقه تولید نماید. نتایج به‌صورت واحد فعالیت آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین (min g^{-1} FW) گزارش شد (Şirin, Aydaş, & Aslım, 2016).

فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز

فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO) براساس روش (Castro, Saraiva, Domingues, & Delgadillo, 2011) اندازه‌گیری شد. برای این منظور، محیط واکنش شامل ۵۰ میکرولیتر محلول پیروگالول ۱۰۰ میلی‌مولار، ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=7) و مقدار مشخصی از عصاره آنزیمی تهیه گردید. پس از آغاز واکنش، تغییرات جذب نوری نمونه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۲۰ نانومتر ثبت شد. فعالیت آنزیم PPO براساس میزان اکسیداسیون پیروگالول و افزایش جذب نوری در طول موج ۴۲۰ نانومتر محاسبه گردید. نتایج به‌صورت تغییر جذب در دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین (min^{-1} g^{-1} FW) گزارش شد.

شدت بیماری (Disease severity)

در روز سی‌ام نگهداری، شدت آلودگی قارچی میوه‌ها به‌صورت چشمی ارزیابی شد. شدت بیماری بر اساس مقیاس ۰ تا ۱۰۰ تعیین

گردید؛ به‌طوری‌که صفر نشان‌دهنده عدم وجود کپک و ۱۰۰ نشان‌دهنده حداکثر شدت آلودگی بود (Babak Madani *et al.*, 2014). میانگین شدت بیماری برای هر تیمار محاسبه و به‌صورت درصد گزارش شد.

به‌منظور ارزیابی اثر تیمارها، درصد کاهش شدت بیماری نسبت به شاهد از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{Disease reduction (\%)} = [(Sc - St) / Sc] \times 100$$

که در آن Sc میانگین شدت بیماری در شاهد و St میانگین شدت بیماری در تیمار است.

آنالیز آماری

قبل از انجام تجزیه واریانس، نرمال بودن داده‌ها با آزمون Shapiro–Wilk و همگنی واریانس‌ها با آزمون Levene بررسی شد. سپس داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس دوطرفه در قالب طرح کاملاً تصادفی تجزیه شدند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت.

نتایج و بحث

براساس نتایج تجزیه واریانس جدول ۵ اثر ساده و متقابل تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا در طول دوره انبارمانی در سطح احتمال یک درصد بر صفات ویتامین ث، کلروفیل *a*، کلروفیل *b*، کاروتنوئید معنی‌دار بود.

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا با غلظت‌های در طول دوره انبارمانی بر ویژگی‌های فیزیولوژیک میوه فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا

Table 5- Analysis of variance of the effect of treatments of Shirazi thyme, garden thyme, lemongrass, cinnamon and Luna fungicide with concentrations of during storage on physiological characteristics of kapia **bell pepper fruit**

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی df	ویتامین ث Vitamin C	کلروفیل *a* Chlorophyll *a*	کلروفیل *b* Chlorophyll *b*	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid
تیمار Treatment	10	1022.16**	0.000202**	0.000302**	0.000990**	0.0562**
زمان Time	2	39899.81**	0.00272**	0.00487**	0.0148**	1.60**
تیمار × زمان Treatment × Time	20	9.51**	0.0000852**	0.000144**	0.00000316**	0.00664**
خطای آزمایش Error.	66	2.07	0.00000139	0.00000139	0.0093	0.000138
ضریب تغییرات (٪)	-	1.08	3.61	4.34	2.43	1.60

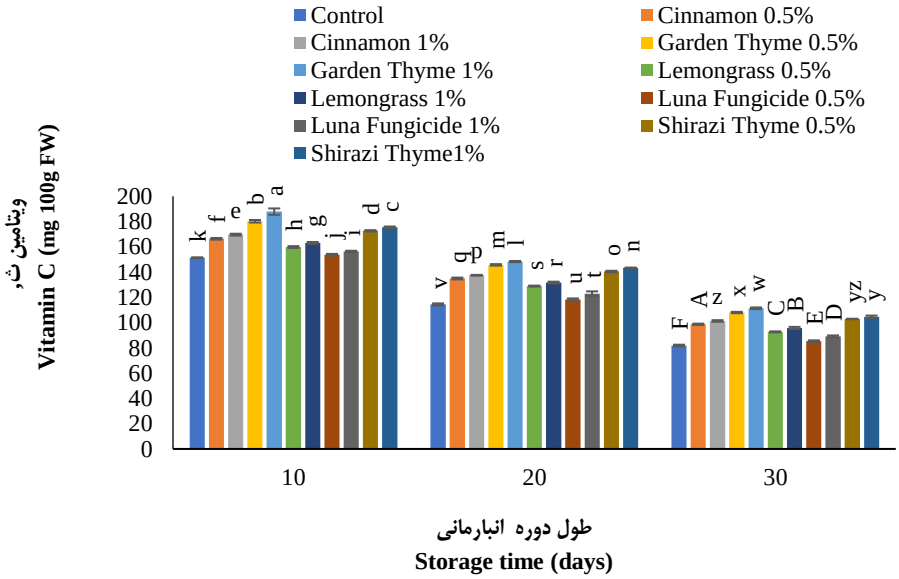
** در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار

**Significant at the 1% probability level

ویتامین ث

نتایج نشان داد که با افزایش مدت انبارمانی، محتوای ویتامین ث میوه فلفل روند کاهشی داشت که احتمالاً ناشی از اکسیداسیون تدریجی اسید اسکوربیک و افزایش تنفس و فعالیت متابولیکی بافت در طی نگهداری است. با این حال، کاربرد تیمارهای اسانس آویشن باغی توانست این کاهش را به‌طور معنی‌داری تعدیل کند و موجب حفظ بیشتر ویتامین ث نسبت به تیمار شاهد شود (شکل ۲). به‌ویژه، تیمار اسانس آویشن باغی یک درصد در ۲۰ و ۳۰ روز انبارمانی به‌ترتیب باعث افزایش ۲۹/۶۲ و ۳۶/۰۱ درصدی محتوای ویتامین ث نسبت به شاهد شد (شکل ۲). احتمالاً این اثر به حضور ترکیبات فنولی اسانس، به‌ویژه تیمول و کارواکرول، مربوط است که با تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و محدود کردن اکسیداسیون اسید اسکوربیک، موجب حفظ بیشتر ویتامین ث در بافت میوه شدند. کاهش ویتامین ث در طی انبارمانی به‌دلیل حساسیت بالای اسید آسکوربیک به اکسیداسیون و فعالیت آنزیم‌هایی نظیر آسکوربات اکسیداز و پراکسیداز رخ می‌دهد (Yin *et al.*, 2022). از سوی دیگر، اسانس آویشن باغی به‌دلیل دارا بودن ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی قوی از جمله تیمول و کارواکرول، با مهار واکنش‌های اکسیداتیو، کاهش تولید رادیکال‌های آزاد و حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی، از تخریب اسید آسکوربیک جلوگیری می‌کند (Kowalczyet, Przychodna, Sopata, Bodalska, & Fecka, 2020). علاوه بر این، خاصیت ضدمیکروبی این ترکیبات سبب کاهش تنش‌های زیستی و کند شدن فرآیندهای پیری و رسیدگی پس از برداشت می‌شود (Hammoudi Halat, Krayem, Khaled, & Younes, 2022). به‌طور خاص، غوطه‌ور کردن میوه‌های پرتقال در عصاره برگ آویشن با غلظت‌های ۶ و ۹ گرم در لیتر به‌مدت ۱۵ دقیقه به‌عنوان روشی برای تأثیرگذاری

بر ویژگی‌های ذخیره‌سازی، از جمله حفظ ویتامین ث، در طول نگهداری در یخچال مورد آزمایش قرار گرفت (Jabir *et al*., 2023). اگرچه این مطالعه شامل سایر عصاره‌های گیاهی و عوامل ضد تعرق بود، عصاره برگ آویشن یکی از تیمارهای اصلی بود که به‌دلیل پتانسیل آن در کاهش از دست دادن مواد مغذی در طول ذخیره‌سازی ارزیابی شد (Jabir *et al*., 2023). نگهداری در سرما، تخریب ویتامین ث را کند می‌کند اما از آن جلوگیری نمی‌کند و استفاده از عصاره‌های گیاهی مانند آویشن ممکن است محافظت بیشتری در برابر از دست دادن مواد مغذی ارائه دهد (Jabir *et al*., 2023).



شکل ۲- اثر تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا با غلظت‌های (۰/۵ و ۱ درصد) در طول دوره انبارمانی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ روز) بر ویتامین ث میوه فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا

هر ستون نشان‌دهنده میانگین سه تکرار ± خطای استاندارد (SE) است. میانگین‌هایی که دارای همان حرف هستند از نظر آماری در سطح $p\leq0.05$ تفاوت معناداری ندارند.

Fig. 2. The effect of treatments of Shirazi thyme, garden thyme, lemongrass, cinnamon and Luna fungicide at concentrations of (0.5 and 1%) during the storage period (10, 20 and 30 days) on vitamin C in the *Capsicum annuum* fruit of Kapia cultivar

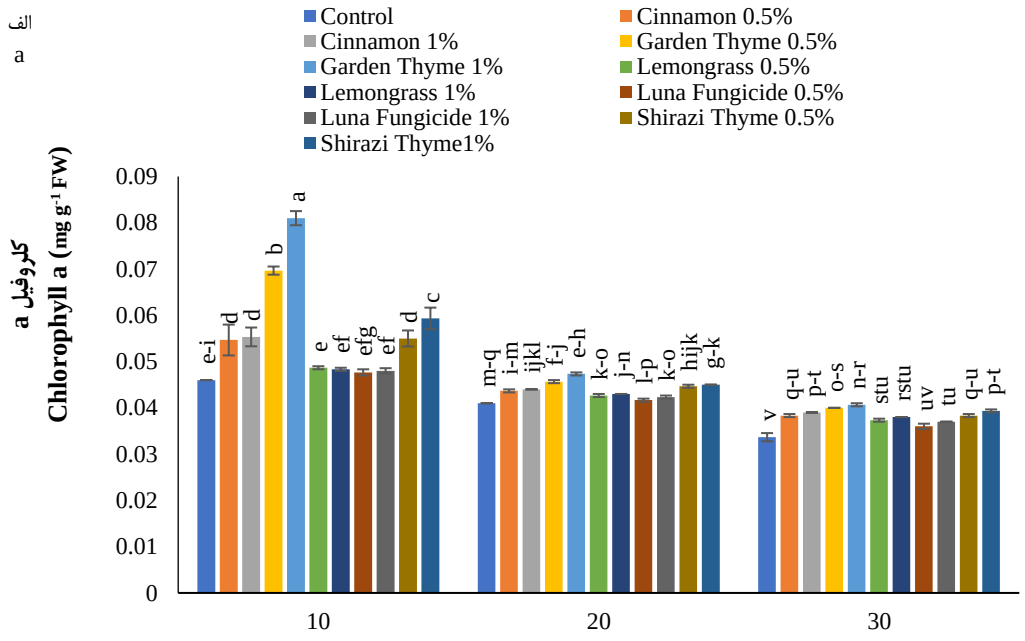
Each column represents the mean of three replicates ± standard error (SE). Means with the same letter are not statistically significantly different at the $p\leq0.05$ level.

رنگیزه‌های فتوسنتزی

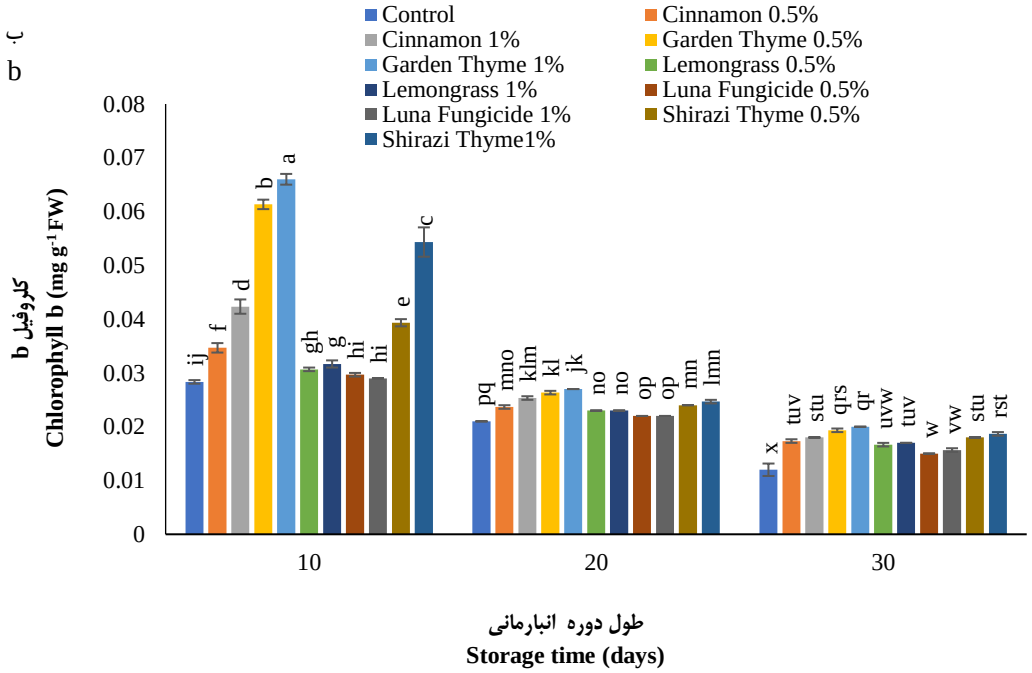
بررسی‌ها نشان داد که با طولانی‌تر شدن دوره نگهداری تا ۳۰ روز، میزان کلروفیل‌های *a* و *b* در میوه‌های فلفل به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. این افت می‌تواند به تشدید روند پیری بافت میوه، آسیب و تجزیه تدریجی ساختار کلروپلاست‌ها و افزایش فعالیت آنزیم‌های مسئول تجزیه کلروفیل طی مدت انبارمانی نسبت داده شود. در مقابل، استفاده از اسانس‌های گیاهی نقش مؤثری در کاهش شدت این تغییرات داشت و سبب شد میزان رنگیزه‌های کلروفیلی در میوه‌های تیمارشده در مقایسه با شاهد، در سطح بالاتری حفظ شود. در میان تیمارهای مورد بررسی، اسانس آویشن باغی با غلظت ۱ درصد بیشترین کارایی را در حفظ کلروفیل داشت؛ به‌طوری‌که در پایان دوره انبارمانی، محتوای کلروفیل *a* و *b* در این تیمار به‌ترتیب ۸۳/۲۰ و ۶۶/۶۶ درصد بیشتر از شاهد بود (شکل ۳ الف و ب). احتمالاً این اثر به حضور ترکیبات فنولی اسانس، به‌ویژه تیمول و کارواکرول، مربوط است که با کاهش تنش اکسیداتیو، حفظ یکپارچگی غشاهای کلروپلاستی و مهار تخریب رنگیزه‌ها، موجب تأخیر در زرد شدن میوه شدند. کاهش کلروفیل‌ها در طی انبارمانی عمدتاً ناشی از تجزیه تدریجی رنگدانه‌های فتوسنتزی و تسریع فرآیند رسیدگی و پیری بافت است (Chen *et al*., 2024)، در حالی‌که اسانس آویشن باغی به‌دلیل دارا بودن ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی مانند تیمول و کارواکرول، با کاهش تنفس، مهار تنش اکسیداتیو و حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی، از تخریب کلروفیل *a* و *b* جلوگیری کرده و با به تأخیر انداختن روند رسیدگی، تبدیل کلروفیل‌ها به کاروتنوئیدها را کاهش داده است (Chen *et al*., 2023; Kamyab & Samsampour, 2025). به‌طور خاص، استفاده از روغن آویشن باعث کاهش کاهش وزن، پوسیدگی و حفظ استحکام و ظاهر گوجه‌فرنگی گیلاسی در طول نگهداری در یخچال می‌شود، اگرچه مشاهده شده است که محتوای لیکوپن و کاروتن، که رنگدانه‌های کلیدی مرتبط با کلروفیل و رنگ هستند، کاهش می‌یابد (El-Sayed,

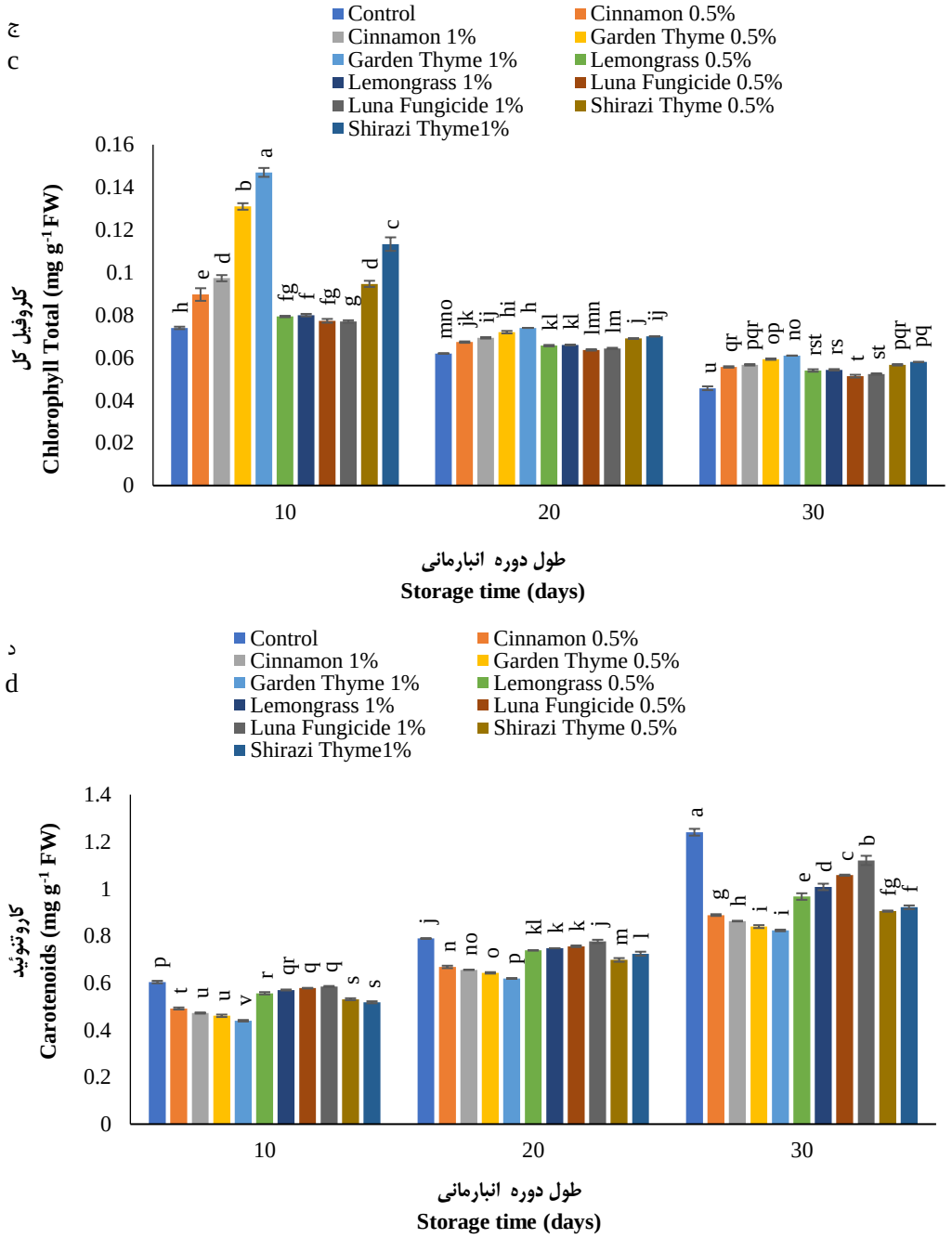
(Atress, Mahmoud, Maghraby, & El-Mogy, 2022). پوشش‌های خوراکی حاوی امولسیون‌های روغن آویشن، مانند آنهایی که با پکتین و کیتوزان ساخته شده‌اند، نشان داده‌اند که خواص شیمیایی و میکروبی میوه‌های پرتقال، از جمله حفظ کلروفیل و کاروتنوئیدها، و کاهش تلفات اسید اسکوربیک در طول ذخیره‌سازی را افزایش می‌دهند (Medany, Enas, Mohamed, & Yehia, 2022).

الف
a



ب
b





شکل ۳- اثر تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا با غلظت‌های (۰/۵ و ۱ درصد) در طول دوره انبارمانی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ روز) بر الف) کلروفیل *a*، ب) کلروفیل *b*، ج) کلروفیل کل و د) کاروتنوئید میوه فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا

هر ستون نشان‌دهنده میانگین سه تکرار ± خطای استاندارد (SE) است. میانگین‌هایی که دارای همان حرف هستند از نظر آماری در سطح $p\leq0.05$ تفاوت معناداری ندارند.

Fig. 3. The effect of treatments of Shirazi thyme, garden thyme, lemongrass, cinnamon and Luna fungicide with concentrations of (0.5 and 1%) during the storage period (10, 20 and 30 days) on a) chlorophyll a, b) chlorophyll b, c) total chlorophyll and d) carotenoids of *Capsicum annuum* fruit of Kapia cultivar

Each column represents the mean of three replicates ± standard error (SE). Means with the same letter are not statistically significantly different at the $p\leq0.05$ level.

جدول ٦- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا با غلظت‌های در طول دوره انبارمانی بر ویژگی‌های بیوشیمیایی میوه فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا

Table 6- Analysis of variance of the effect of treatments of Shirazi thyme, garden thyme, lemongrass, cinnamon and Luna fungicide with concentrations of during storage on biochemical characteristics of Kapia variety bell pepper fruit

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی df	مالون دی‌آلدئید Malondialdehyde	کاتالاز Catalase	گلوتاتیون ردوکتاز Glutathione reductase	فنیل آلانین آمونیالیاز Phenylalanine ammonia lyase	پلی فنل‌اکسیداز Polyphenol oxidase
تیمار Treatment	10	0.0223**	0.0758**	0.00382**	1.01**	0.0532**
زمان Time	2	0.626**	3.276**	0.0851**	48.29**	0.00380**
تیمار × زمان Treatment × Time	20	0.00348**	0.000636**	0.000316**	0.127**	0.00152**
خطای آزمایش Error.	66	0.000071	0.000636	0.0000075	0.0093	0.0000016
ضریب تغییرات (٪)	-	2.30	1.93	1.86	1.75	1.12

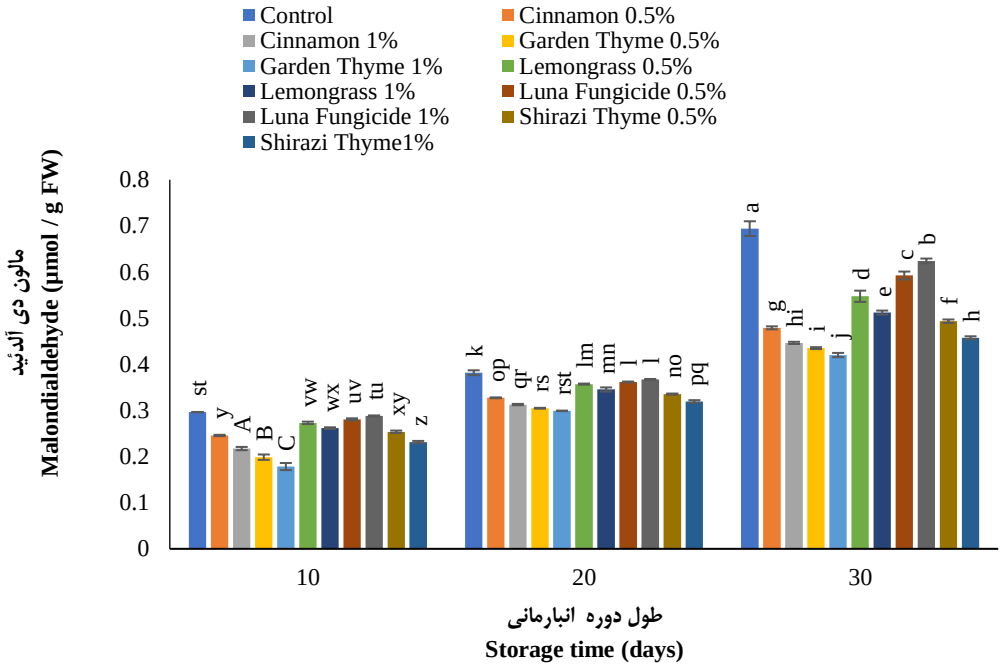
** در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار

**Significant at the 1% probability level

نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۶) که اثر ساده و متقابل تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا در طول دوره انبارمانی در سطح احتمال یک درصد بر صفات مالون دی‌آلدئید، کاتالاز، گلوتاتیون ردوکتار، فنیل آلانین‌آمونیالیاز و پلی فنل‌اکسیداز معنی‌دار می‌باشد.

مالون دی‌آلدئید

با طولانی شدن دوره انبارمانی تا ۳۰ روز، میزان مالون‌دی‌آلدئید (MDA) در میوه‌های فلفل به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۴). افزایش این شاخص در طول دوره نگهداری می‌تواند ناشی از شدت گرفتن فرآیندهای اکسیداتیو، افزایش پراکسیداسیون اسیدهای چرب غشایی و در پی آن، کاهش یکپارچگی و پایداری غشاهای سلولی باشد. در مقابل، استفاده از اسانس آویشن باغی توانست از شدت افزایش MDA در طی انبارمانی بکاهد. به‌ویژه، تیمار آویشن باغی ۱ درصد در ۲۰ روز انبارمانی موجب کاهش ۲۱/۵۲ درصدی MDA نسبت به شاهد شد. در پایان دوره انبارمانی نیز بیشترین مقدار MDA در تیمار شاهد (۰/۶۹۴ میکرومول بر گرم وزن تر) و کمترین مقدار آن در تیمار آویشن باغی ۱ درصد (۰/۴۲۰ میکرومول بر گرم وزن تر) مشاهده شد. همچنین، کاربرد آویشن باغی ۱ درصد در پایان دوره نگهداری باعث کاهش ۴۸/۳۹ درصدی MDA نسبت به شاهد گردید (شکل ۴). احتمالاً کاهش MDA در تیمار آویشن باغی ناشی از حضور ترکیبات فنولی فعال، به‌ویژه تیمول و کارواکرول، است که با خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن، تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و جلوگیری از اکسیداسیون اسیدهای چرب غشایی، از تخریب غشاهای سلولی جلوگیری کرده‌اند. بنابراین، کاهش تجمع MDA در این تیمار نشان‌دهنده حفظ بهتر یکپارچگی غشا، کاهش آسیب اکسیداتیو و بهبود پایداری بافت میوه در طول انبارمانی است. این نتایج نشان می‌دهد که تیمار آویشن باغی با کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی و محدود کردن آسیب‌های اکسیداتیو، توانسته است یکپارچگی غشاهای سلولی را بهتر حفظ کرده و روند پیری و تخریب بافت میوه را در طول دوره انبارمانی به تأخیر اندازد (Li *et al.*, 2025). روغن اسانس آویشن، هنگامی‌که در فاز بخار یا به‌عنوان بخشی از پوشش‌های خوراکی استفاده می‌شود، تعداد میکروبی را به‌طور قابل توجهی کاهش داده و خواص حسی را حفظ می‌کند، که نشان‌دهنده نقش آن در حفظ کیفیت و به‌طور بالقوه محدود کردن پراکسیداسیون لیپید است (Medany *et al.*, 2022; Moosavi-Nasab, Behroozi, Gahruie, & Tavakoli, 2023). به‌طور کلی، روغن ضروری آویشن به‌عنوان یک نگهدارنده طبیعی قوی، ایمن و مؤثر برای مدیریت پس از برداشت، افزایش ماندگاری و حفظ کیفیت با کنترل رشد میکروبی و احتمالاً کاهش نشانگرهای تنش اکسیداتیو مانند مالون دی آلدئید، ظاهر می‌شود (Ansarifar & Moradinezhad, 2022; Muthusamy *et al.*, 2024).



شکل ٤- اثر تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا با غلظت‌های (۰/۵ و ۱ درصد) در طول دوره انبارمانی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ روز) بر مالون دی‌آلدئید میوه فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا

هر ستون نشان‌دهنده میانگین سه تکرار ± خطای استاندارد (SE) است. میانگین‌هایی که دارای همان حرف هستند از نظر آماری در سطح $p\leq0.05$ تفاوت معناداری ندارند.

Fig. 4. The effect of treatments of Shirazi thyme, garden thyme, lemongrass, cinnamon and Luna fungicide at concentrations of (0.5 and 1%) during the storage period (10, 20 and 30 days) on malondialdehyde in the fruit of *Capsicum annuum* fruit of Kapia cultivar

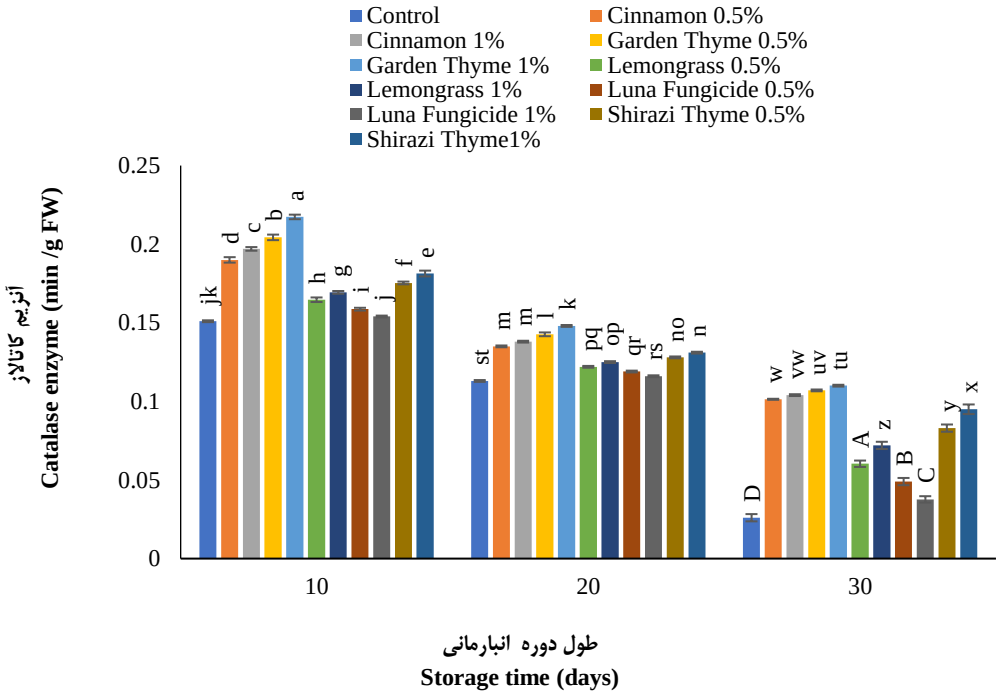
Each column represents the mean of three replicates ± standard error (SE). Means with the same letter are not statistically significantly different at the p≤0.05 level.

آنزیم کاتالاز

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، فعالیت آنزیم کاتالاز طی ۳۰ روز انبارمانی کاهش معنی‌داری یافت که می‌تواند ناشی از تشدید فرآیند پیری و تضعیف ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی بافت در طول نگهداری باشد. به‌ویژه، تیمار آویشن باغی ۱ درصد در روز بیستم انبارمانی موجب افزایش ۳۰/۹۷ درصدی فعالیت کاتالاز نسبت به شاهد شد. در پایان دوره انبارمانی نیز بیشترین فعالیت کاتالاز در تیمار آویشن باغی ۱ درصد و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد مشاهده شد. همچنین، کاربرد آویشن باغی ۱ درصد سبب افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم گردید، به‌طوری‌که فعالیت کاتالاز در مقایسه با شاهد ۴۰۳/۲۳۴ درصد (حدود ۴ برابر) بیشتر بود (شکل ۵). احتمالاً افزایش فعالیت کاتالاز در تیمار آویشن باغی به حضور ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی اسانس، به‌ویژه تیمول و کارواکرول، مربوط است. این ترکیبات می‌توانند با تحریک سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، افزایش توانایی حذف پراکسید هیدروژن و کاهش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، از غیرفعال شدن آنزیم جلوگیری کرده و در نتیجه موجب حفظ فعالیت کاتالاز و کاهش تنش اکسیداتیو در طول دوره انبارمانی شوند (Hammoudi Halat *et al.*, 2022). در کدو سبز، پوشش‌های نانوامولسیون حاوی روغن اسانس آویشن ارزیابی شدند و مشاهده شد که فعالیت CAT در پوست در پایان دوره انبارمانی افزایش ناگهانی نشان داد، به طوری‌که بالاترین فعالیت CAT در پوست کدو سبز با پوشش پس از ۴۲ روز در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شد (Bleoanca, Lanciu, Patrașcu, & Ceoromila, 2022). این پوشش‌ها همچنین پیری را به تأخیر انداختند و سفتی را حفظ کردند که نشان دهنده اثر محافظتی بر سیستم‌های آنزیمی آنتی‌اکسیدانی از جمله کاتالاز است.

آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز

فعالیت آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز در طول ۳۰ روز انبارمانی با کاهش معنی‌داری همراه بود (شکل ۶). کاهش فعالیت این آنزیم را می‌توان به افزایش شدت تنش اکسیداتیو، تجمع بیشتر گونه‌های فعال اکسیژن و تضعیف سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی بافت در اثر طولانی شدن مدت نگهداری نسبت داد. در مقابل، استفاده از تیمارهای مورد مطالعه از شدت افت فعالیت گلوتاتیون ردوکتاز کاست و سبب شد میزان فعالیت این آنزیم در مقایسه با میوه‌های شاهد، در سطح بالاتری حفظ شود.



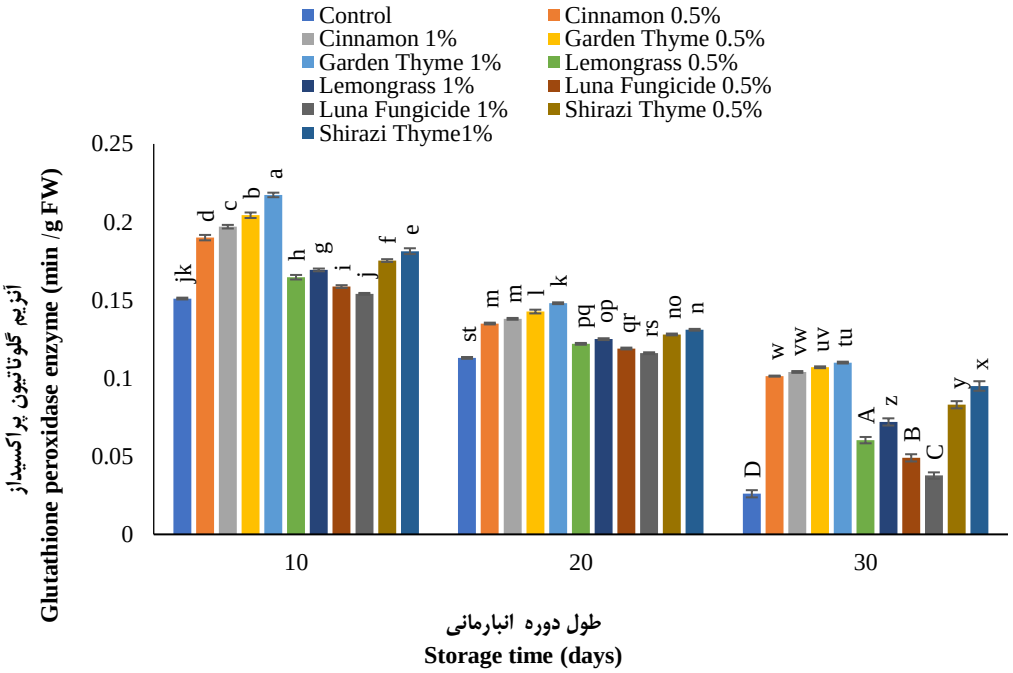
شکل ۵- اثر تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا با غلظت‌های (۰/۵ و ۱ درصد) در طول دوره انبارمانی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ روز) بر آنزیم کاتالاز میوه فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا

هر ستون نشان‌دهنده میانگین سه تکرار ± خطای استاندارد (SE) است. میانگین‌هایی که دارای همان حرف هستند از نظر آماری در سطح $p\leq0.05$ تفاوت معناداری ندارند.

Fig. 5. Effect of treatments of Shirazi thyme, garden thyme, lemongrass, cinnamon, and Luna fungicide at concentrations of (0.5 and 1%) during the storage period (10, 20, and 30 days) on catalase enzyme in the fruit of *Capsicum annuum* fruit of Kapia cultivar

Each column represents the mean of three replicates ± standard error (SE). Means with the same letter are not statistically significantly different at the $p\leq0.05$ level.

در روز بیستم انبارمانی، بیشترین فعالیت گلوتاتیون ردوکتاز در تیمار آویشن باغی ۱ درصد (۰/۱۴۸ واحد در دقیقه بر گرم وزن تر) و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد (۰/۱۱۳ واحد در دقیقه بر گرم وزن تر) مشاهده شد. در پایان دوره انبارمانی نیز بیشترین فعالیت این آنزیم در تیمار آویشن باغی ۱ درصد (۰/۱۱۰ واحد در دقیقه بر گرم وزن تر) و کمترین فعالیت در تیمار شاهد (۰/۰۲۶۰ واحد در دقیقه بر گرم وزن تر) به‌دست آمد. همچنین، کاربرد آویشن باغی ۱ درصد موجب افزایش معنی‌دار فعالیت گلوتاتیون ردوکتاز شد، به‌طوری‌که فعالیت این آنزیم در مقایسه با شاهد ۱۳۶/۳۶ درصد بیشتر بود (شکل ۶). احتمالاً افزایش فعالیت گلوتاتیون ردوکتاز در تیمار آویشن باغی به حضور ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی اسانس، به‌ویژه تیمول و کارواکرول، مربوط است. این ترکیبات می‌توانند با تقویت چرخه گلوتاتیون–آسکوربات، حفظ نسبت گلوتاتیون احیا به اکسیدشده (GSH/GSSG) و افزایش توانایی سلول در خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن، از غیرفعال شدن آنزیم جلوگیری کرده و موجب حفظ ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی بافت در طول دوره انبارمانی شوند. بنابراین، افزایش فعالیت گلوتاتیون ردوکتاز در تیمار آویشن باغی نشان‌دهنده بهبود وضعیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب اکسیداتیو در میوه فلفل طی نگهداری است (Eghlima, Aghamir, Hajizadeh, & Zarbakhsh, 2025). مطالعات روی سایر روغن‌های ضروری، مانند زیره سبز، نشان داده است که کپسوله کردن می‌تواند فعالیت بالای GR را در اندام‌های میوه در طول ذخیره‌سازی حفظ کند، که نشان می‌دهد استراتژی‌های کپسوله کردن مشابه با روغن ضروری آویشن ممکن است اثربخشی آن را در حفظ فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در میوه‌های انبار شده افزایش دهد (Karimirad, Behnamian, & Dezhsetan, 2018).



شکل ٦- اثر تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا با غلظت‌های (۰/۵ و ۱ درصد) در طول دوره انبارمانی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ روز) بر فعالیت آنزیم گلوتاتیون پراکسیداز میوه فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا

هر ستون نشان‌دهنده میانگین سه تکرار ± خطای استاندارد (SE) است. میانگین‌هایی که دارای همان حرف هستند از نظر آماری در سطح $p\leq0.05$ تفاوت معناداری ندارند.

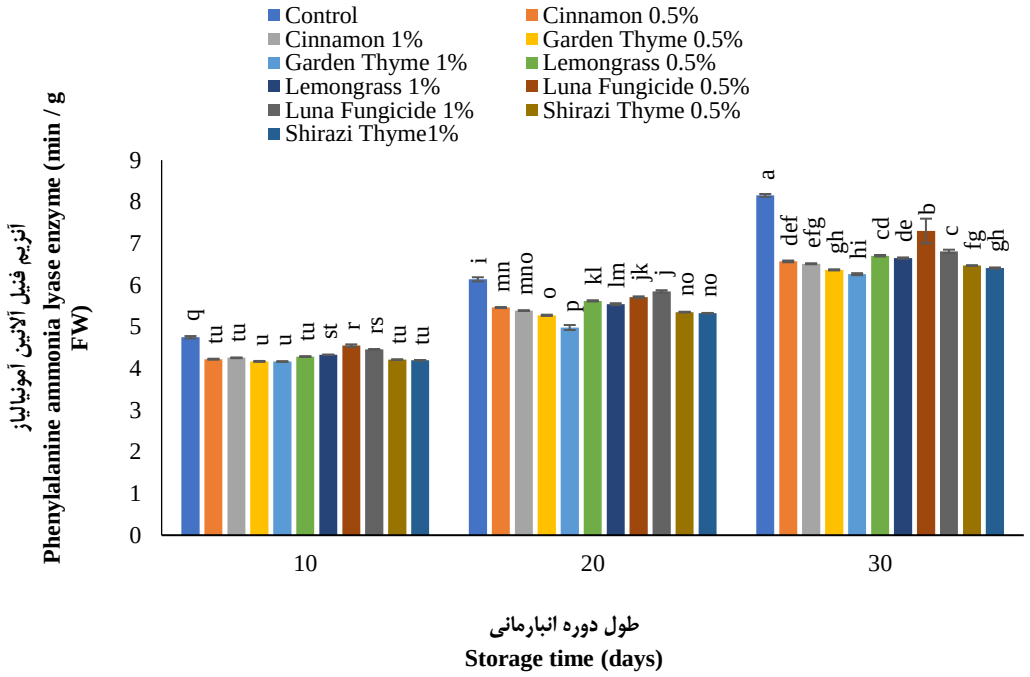
Fig. 6. Effect of treatments of Shirazi thyme, garden thyme, lemongrass, cinnamon, and Luna fungicide at concentrations of (0.5 and 1%) during the storage period (10, 20, and 30 days) on the glutathione peroxidase enzyme activity of the fruit of *Capsicum annuum* fruit of Kapia cultivar

Each column represents the mean of three replicates ± standard error (SE). Means with the same letter are not statistically significantly different at the $p\leq0.05$ level.

آنزیم فنیل آلانین آمونیالیاز

با افزایش مدت انبارمانی، فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین آمونیالیاز (PAL) تا روز سی‌ام روند افزایشی داشت (شکل ۷). این افزایش فعالیت احتمالاً به تحریک مسیر فنیل‌پروپانوئیدی در واکنش به تنش‌های ایجادشده طی دوره نگهداری مربوط می‌شود. فعال شدن این مسیر می‌تواند با تقویت مکانیسم‌های دفاعی و تشدید تغییرات مرتبط با پیری بافت در طول انبارمانی همراه باشد. در پایان دوره نگهداری، بیشترین فعالیت PAL در تیمار شاهد (۸/۱۵ واحد در دقیقه بر گرم وزن تر) و کمترین مقدار آن در تیمار آویشن باغی ۱ درصد (۶/۲۶ واحد در دقیقه بر گرم وزن تر) مشاهده شد. همچنین، کاربرد آویشن باغی ۱ درصد موجب کاهش معنی‌دار فعالیت این آنزیم شد، به‌طوری‌که فعالیت PAL در مقایسه با شاهد ۲۳/۱۹ درصد کمتر بود (شکل ۷). احتمالاً کاهش فعالیت PAL در تیمار آویشن باغی به حضور ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی اسانس، به‌ویژه تیمول و کارواکرول، مربوط است که با کاهش تنش اکسیداتیو، محدود کردن تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و حفظ وضعیت فیزیولوژیک بافت، نیاز به فعال شدن شدید مسیرهای دفاعی را کاهش داده‌اند. علاوه بر این، کند شدن روند رسیدگی و پیری پس از برداشت در اثر تیمار آویشن باغی می‌تواند موجب تضعیف فعالیت مسیر فنیل‌پروپانوئیدی و در نتیجه کاهش فعالیت PAL شود (Rezaie, Abdollahi Mandoulakani, & Fattahi, 2020). بنابراین، کاهش فعالیت PAL در این تیمار را می‌توان نشانه‌ای از کاهش تنش واردشده به بافت و حفظ بهتر کیفیت فیزیولوژیک میوه در طول دوره انبارمانی دانست. تحقیقات اخیر نشان داده است که روغن اسانس آویشن، هنگامی‌که در ترکیب با پوشش‌های آلژینات سدیم استفاده می‌شود، فعالیت فنیل‌آلانین آمونیالیاز را در پسته‌های تازه در طول نگهداری به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، و بیشترین فعالیت PAL در پسته‌های پوشش داده شده با ۱ درصد آلژینات و ۰/۳ درصد یا ۰/۵ درصد روغن اسانس آویشن مشاهده شد (Rezaie *et al.*, 2020). این تیمار همچنین کیفیت میوه پسته را تا ۳۹ روز حفظ کرد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت آن بر نگهداری پس از برداشت است (Hashemi, Dastjerdi, Shakerardekani, & Mirdehghan, 2021). علاوه بر این، مطالعات روی سایر روغن‌های اسانسی، مانند پونه کوهی و علف لیمو، نشان داده است که تیمارهای روغن اسانسی می‌توانند فعالیت PAL را در میوه‌هایی مانند زغال‌اخته

و نارنگی کینو القا و افزایش دهند و به افزایش مقاومت در برابر قارچ‌های بیماری‌زا و کاهش پوسیدگی پس از برداشت کمک کنند (Bajaj, Kumar, Gill, Jawandha, & Kaur, 2024; Ji, Hu, Guan, & Saren, 2024). این یافته‌ها در مجموع نشان می‌دهند که اسانس آویشن، به‌ویژه هنگامی‌که با پوشش‌های پلی‌ساکاریدی ترکیب شود، در تحریک فعالیت PAL و بهبود کیفیت پس از برداشت و مقاومت به بیماری میوه‌ها و سبزیجات در طول ذخیره‌سازی مؤثر است (Hashemi *et al*., 2021).



شکل ۷- اثر تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا با غلظت‌های (۰/۵ و ۱ درصد) در طول دوره انبارمانی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ روز) بر آنزیم فنیل آلانین آمونیالیاز میوه فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا

هر ستون نشان‌دهنده میانگین سه تکرار ± خطای استاندارد (SE) است. میانگین‌هایی که دارای همان حرف هستند از نظر آماری در سطح $p\leq0.05$ تفاوت معناداری ندارند.

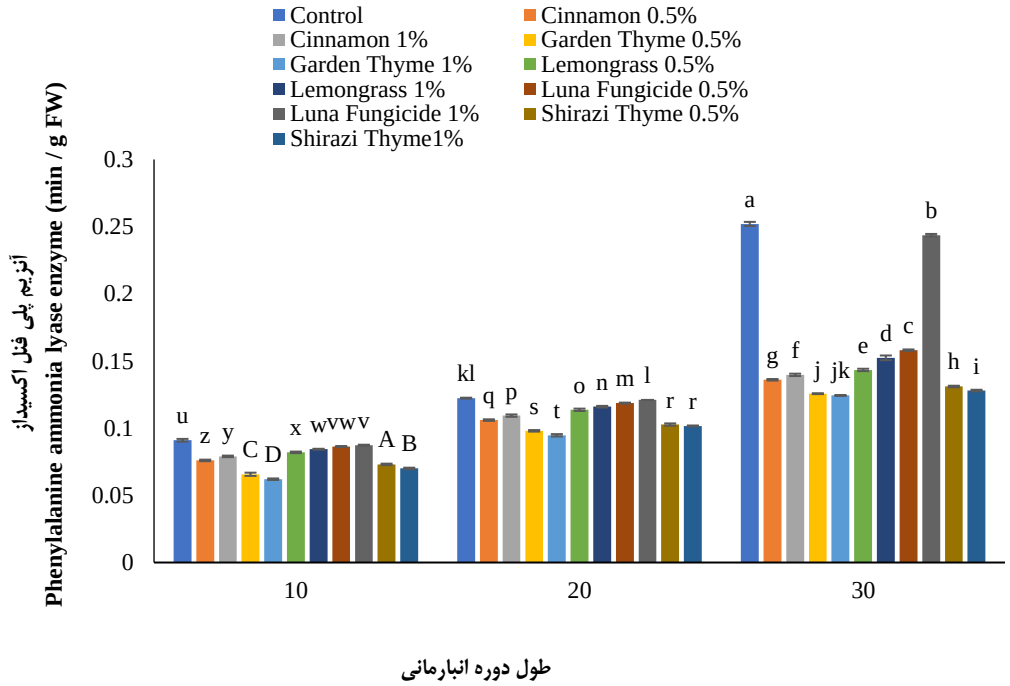
Fig. 7. The effect of treatments of Shirazi thyme, garden thyme, lemongrass, cinnamon and Luna fungicide at concentrations of (0.5 and 1%) during the storage period (10, 20 and 30 days) on the enzyme phenylalanine ammonia lyase of *Capsicum annuum* fruit of Kapia cultivar

Each column represents the mean of three replicates ± standard error (SE). Means with the same letter are not statistically significantly different at the $p\leq0.05$ level.

آنزیم پلی‌فنل اکسیداز

براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO) با افزایش مدت انبارمانی تا ۳۰ روز، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۸). این روند افزایشی می‌تواند با شدت گرفتن فرآیندهای اکسیداتیو و آسیب تدریجی ساختار غشاهای سلولی در طول نگهداری مرتبط باشد. تخریب غشاها در نهایت موجب افزایش تماس آنزیم PPO با ترکیبات فنولی شده و زمینه را برای افزایش فعالیت این آنزیم در میوه‌های فلفل فراهم می‌کند. در پایان دوره انبارمانی، کمترین و بیشترین فعالیت PPO به‌ترتیب در تیمار آویشن باغی ۱ درصد (۰/۱۲۴ واحد در دقیقه بر گرم وزن تر) و تیمار شاهد (۰/۲۵۲ واحد در دقیقه بر گرم وزن تر) مشاهده شد (شکل ۸). همچنین، کاربرد آویشن باغی ۱ درصد موجب کاهش معنی‌دار فعالیت این آنزیم شد، به‌طوری‌که فعالیت PPO در مقایسه با شاهد ۵۲/۷۹ درصد کمتر بود. احتمالاً کاهش فعالیت PPO در تیمار آویشن باغی به حضور ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی اسانس، به‌ویژه تیمول و کارواکرول، مربوط است. این ترکیبات می‌توانند با مهار اکسیداسیون فنل‌ها، کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی، از تماس مستقیم سوبستراهای فنولی با آنزیم جلوگیری کنند. در نتیجه، شدت قهوه‌ای شدن آنزیمی و فعالیت PPO در طول دوره انبارمانی کاهش یافته و کیفیت ظاهری میوه بهتر حفظ می‌شود (Aguilar & Hernández-Brenes, 2015; Khan *et al*., 2021). یافته‌های کلیدی در تحقیق در مورد تأثیر اسانس آویشن بر فعالیت پلی‌فنل اکسیداز (PPO) در طول نگهداری میوه‌ها و سبزیجات نشان می‌دهد که اسانس آویشن، به‌ویژه هنگامی که با پوشش‌های آلژینات سدیم

ترکیب می‌شود، فعالیت PPO را در پسته‌های تازه در مقایسه با سایر تیمارها به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (Hashemi *et al*., 2021). این کاهش در فعالیت PPO با بهبود حفظ رنگ و کیفیت و همچنین افزایش فنول‌های کل و فعالیت فنیل‌آلانین آمونیالیاز (PAL)، به‌ویژه در پسته‌های پوشش داده شده با ۱ درصد آلژینات و ۰/۳ تا ۰/۵ درصد اسانس آویشن، همراه است و کیفیت میوه را تا ۳۹ روز نگهداری حفظ می‌کند (Hashemi *et al*., 2021). در حالی‌که مطالعات روی سایر روغن‌های ضروری، مانند پونه کوهی، نشان داده است که، فعالیت PPO و سایر آنزیم‌های مرتبط با دفاع را در زغال‌اخته افزایش می‌دهد و در نتیجه مقاومت در برابر عوامل بیماری‌زای قارچی را افزایش داده و پوسیدگی پس از برداشت را کاهش می‌دهد (Ji *et al*., 2024)، استفاده خاص از روغن ضروری آویشن در پسته، اثربخشی آن را در سرکوب فعالیت PPO و حفظ کیفیت پس از برداشت نشان می‌دهد (Hashemi *et al*., 2021).



شکل ۸- اثر تیمارهای آویشن شیرازی، آویشن باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا با غلظت‌های (۰/۵ و ۱ درصد) در طول دوره انبارمانی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ روز) بر فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز میوه فلفل دلمه‌ای رقم کاپیا

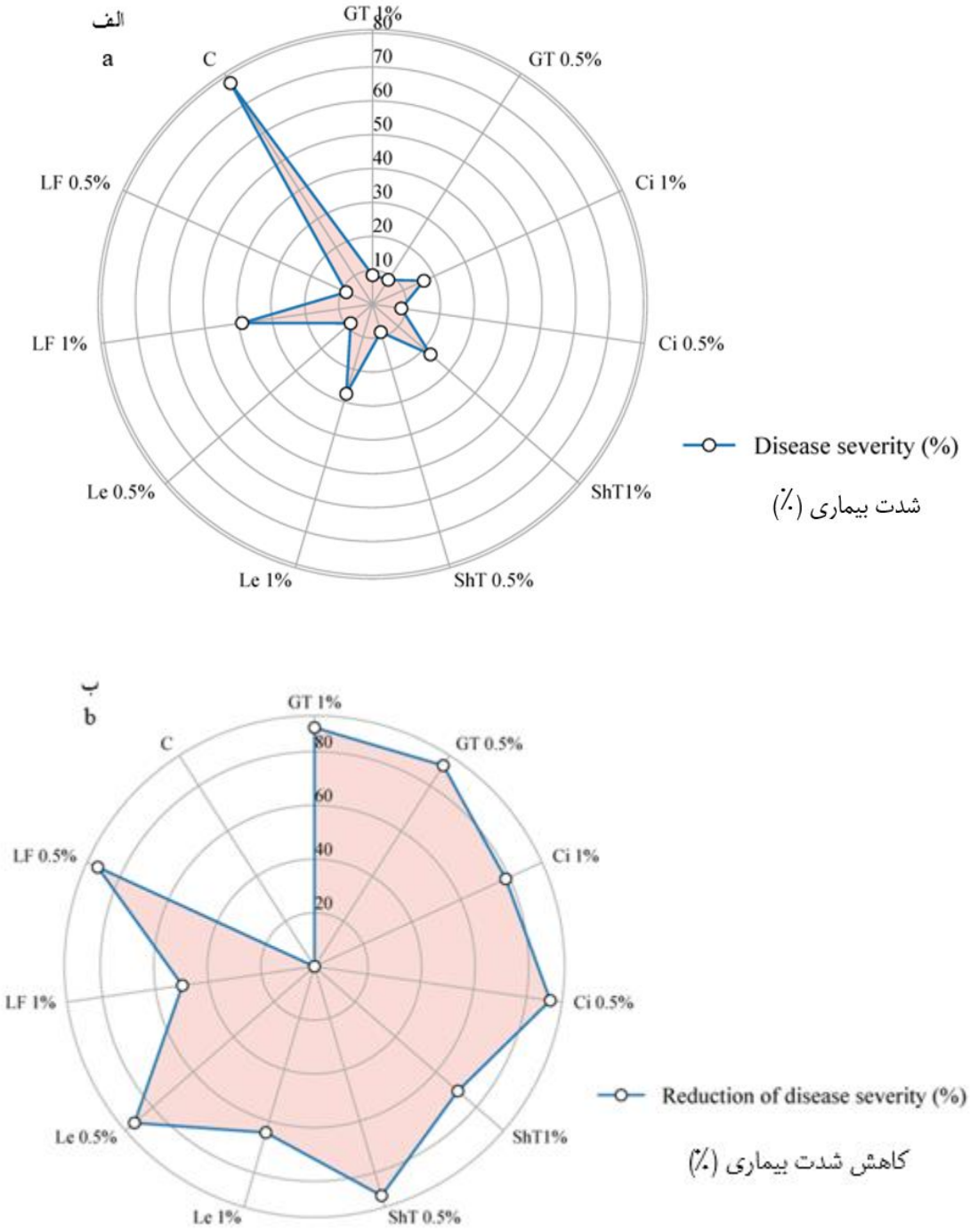
هر ستون نشان‌دهنده میانگین سه تکرار ± خطای استاندارد (SE) است. میانگین‌هایی که دارای همان حرف هستند از نظر آماری در سطح $p\leq0.05$ تفاوت معناداری ندارند.

Fig. 8. The effect of treatments of Shirazi thyme, garden thyme, lemongrass, cinnamon and Luna fungicide at concentrations of (0.5 and 1%) during the storage period (10, 20 and 30 days) on the polyphenol oxidase enzyme activity of *Capsicum annuum* fruit of Kapia cultivar

Each column represents the mean of three replicates ± standard error (SE). Means with the same letter are not statistically significantly different at the $p\leq0.05$ level.

شدت بیماری ناشی از *B. cinerea*

شدت بیماری ناشی از *B. cinerea* در تیمار شاهد بیشترین مقدار را نشان داد (۷۷/۵۷ درصد) که بیانگر توسعه شدید کپک خاکستری در طی دوره نگهداری بود. استفاده از اسانس‌ها موجب کاهش قابل توجه شدت بیماری شد. کمترین شدت بیماری در تیمار آویشن باغی ۱ درصد مشاهده گردید (۸/۵۷ درصد)، در حالی‌که تیمار دارچین ۱ درصد نیز شدت بیماری پایینی داشت (۱۶/۶۶ درصد). شدت بیماری در تیمارهای آویشن شیرازی ۱ درصد و علف لیمو ۱ درصد به‌ترتیب ۲۲/۶۲ درصد و ۲۷/۵۵ درصد بود که نشان‌دهنده اثر مهاری متوسط این اسانس‌ها است. در مقابل، قارچ‌کش لونا ۱ درصد با شدت بیماری ۳۸/۹۲ درصد نسبت به سایر تیمارهای مؤثر، شدت بیماری بیشتری نشان داد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که اسانس آویشن باغی، به‌ویژه در غلظت ۱ درصد، مؤثرترین تیمار در کاهش شدت بیماری کپک خاکستری میوه در طول دوره انبارمانی بوده است (شکل ۹ الف).



شکل ۹- اثر تیمارهای پس از برداشت شامل آویشن شیرازی و باغی، علف لیمو، دارچین و قارچ‌کش لونا در غلظت‌های شاهد (C)، ۰/۵ و ۱ درصد بر الف) شدت بیماری ب) کاهش شدت بیماری کپک خاکستری (*Botrytis cinerea*) در فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annuum* L.) رقم کاپیا در ۳۰ روز انبارمانی

Fig. 9. The effect of post-harvest treatments including Shirazi and garden thyme, lemongrass, cinnamon and Luna fungicide at concentrations of control (C), 0.5 and 1% on a) disease severity b) reduction of disease severity of *Capsicum annuum* fruit of Kapia cultivar in 30 days of storage

درصد کاهش شدت بیماری *B. cinerea*

درصد کاهش شدت بیماری نسبت به شاهد نشان داد که اسانس آویشن باغی در غلظت ۱ درصد، اسانس آویشن باغی در غلظت ۰/۵ درصد، اسانس دارچین در غلظت ۰/۵ درصد، اسانس آویشن شیرازی در غلظت ۰/۵ درصد، اسانس علف لیمو در غلظت ۰/۵ درصد و قارچ‌کش لونا در غلظت ۰/۵ درصد بیشترین اثر را داشته و شدت بیماری را به‌میزان ۸۸/۹۶ درصد نسبت به شاهد کاهش دادند. اسانس دارچین در غلظت ۱ درصد نیز کاهش قابل توجهی در شدت بیماری ایجاد کرد و شدت بیماری را ۷۸/۵۳ درصد کاهش داد. اسانس آویشن شیرازی در غلظت ۱ درصد و اسانس علف لیمو در غلظت ۱ درصد به‌ترتیب موجب ۷۰/۸۴ و ۶۴/۴۸ درصد کاهش شدت بیماری شدند که نشان‌دهنده اثر مهاری متوسط این تیمارها است. کمترین میزان کاهش شدت بیماری مربوط به قارچ‌کش لونا در غلظت ۱ درصد بود که تنها ۴۹/۸۳ درصد شدت بیماری را نسبت به شاهد کاهش داد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که بیشتر تیمارهای اسانسی مورد بررسی توانایی بالایی در کاهش شدت بیماری ناشی از *B. cinerea* داشته‌اند و برخی تیمارها توانستند شدت بیماری را نزدیک به ۸۹ درصد نسبت به شاهد کاهش دهند (شکل ۹ ب).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که اسانس آویشن باغی یک درصد با حفظ فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و حفظ ترکیبات کیفی، توانست ماندگاری فلفل دلمه‌ای آلوده به *B. cinerea* را بهبود بخشد. بنابراین این اسانس می‌تواند به‌عنوان یک نگهدارنده طبیعی و جایگزینی مناسب برای کاهش مصرف قارچ‌کش‌های شیمیایی در صنایع پس از برداشت مورد توجه قرار گیرد. با این حال، ارزیابی این تیمار در شرایط صنعتی و تجاری و همچنین در قالب پوشش‌های خوراکی و نانومولسیون‌ها پیشنهاد می‌شود.

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرد.

میزان مشارکت نویسندگان

رییسی: مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی، تحقیق و بررسی، نرم‌افزار، نوشتن–پیش‌نویس اصلی. **عبدالهی:** مفهوم‌سازی، تحلیل رسمی، تأمین مالی، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، اعتبارسنجی، نوشتن–بررسی و ویرایش. **جعفری:** مدیریت داده، تحلیل رسمی، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، نظارت، اعتبار سنجی. **میرزاعلیان دستجردی:** مفهوم‌سازی، تحلیل رسمی، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، منابع، نظارت، اعتبار سنجی.

References

1. Álvarez-García, S., Moumni, M., & Romanazzi, G. (2023). Antifungal activity of volatile organic compounds from essential oils against the postharvest pathogens *Botrytis cinerea*, *Monilinia fructicola*, *Monilinia fructigena*, and *Monilinia laxa*. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1274770. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1274770
2. Aguilar, O., & Hernández-Brenes, C. (2015). Use of modified phenolic thyme extracts (*Thymus vulgaris*) with reduced polyphenol oxidase substrates as anthocyanin color and stability enhancing agents. *Molecules*, *20*(12), 22422-22434. https://doi.org/10.3390/molecules201219854
3. Allagui, M.B., Moumni, M., & Romanazzi, G. (2023). Antifungal activity of thirty essential oils to control pathogenic fungi of postharvest decay. *Antibiotics*, *13*(1), 28. https://doi.org/10.3390/antibiotics13010028
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*(1), 2. https://doi.org/10.1186/s40538-021-00267-y
5. Bajaj, K., Kumar, A., Gill, P., Jawandha, S., & Kaur, N. (2024). Xanthan gum coatings augmented with lemongrass oil preserve postharvest quality and antioxidant defence system of Kinnow fruit under low-temperature storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, *262*, 129776. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129776
6. Babak Madani, B.M., Mahmud Tengku, M.M., Biggs, A.R., Jugah Kadir, J.K., Yahya Awang, Y.A., Amin Tayebimeigooni, A.T., & Taha Roodbar Shojaei, T.R.S. (2014). Effect of pre-harvest calcium chloride applications on fruit calcium level and post-harvest anthracnose disease of papaya. https://doi.org/10.1002/jsfa.7462
7. Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, *72*(1-2), 248-254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3
8. Bleoanca, I., Lanciu, A., Patrașcu, L., Ceoromila, A., & Borda, D. (2022). Efficacy of two stabilizers in nanoemulsions with whey proteins and thyme essential oil as edible coatings for zucchini. *Membranes*, *12*(3), 326. https://doi.org/10.3390/membranes12030326

9. Boubaker, H., Karim, H., El Hamdaoui, A., Msanda, F., Leach, D., Bombarda, I., & Aoumar, A.A.B. (2016). Chemical characterization and antifungal activities of four *Thymus* species essential oils against postharvest fungal pathogens of citrus. *Industrial Crops and Products*, *86*, 95-101. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.036
10. Castro, S.M., Saraiva, J.A., Domingues, F.M., & Delgadillo, I. (2011). Effect of mild pressure treatments and thermal blanching on yellow bell peppers (*Capsicum annuum* L.). *LWT-Food Science and Technology*, *44*(2), 363-369. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.09.020
11. Chen, C., Wang, L.-X., Li, M.-Y., Tan, G.-F., Liu, Y.-H., Liu, P.-Z., & Tao, J.-P. (2024). Effect of temperature on photosynthetic pigment degradation during freeze–thaw process of postharvest of celery leaves. *Horticulturae*, *10*(3), 267. https://doi.org/10.3390/horticulturae10030267
12. Chen, X., Shang, S., Yan, F., Jiang, H., Zhao, G., Tian, S., & Dang, Y. (2023). Antioxidant activities of essential oils and their major components in scavenging free radicals, inhibiting lipid oxidation and reducing cellular oxidative stress. *Molecules*, *28*(11), 4559. https://doi.org/10.3390/molecules28114559
13. Chowdhury, N.N., Islam, M.N., Jafrin, R., Rauf, A., Khalil, A.A., Emran, T.B., & Shariati, M.A. (2023). Natural plant products as effective alternatives to synthetic chemicals for postharvest fruit storage management. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *63*(30), 10332-10350. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2079112
14. Corpas, F.J., Freschi, L., Rodríguez-Ruiz, M., Mioto, P.T., González-Gordo, S., & Palma, J.M. (2018). Nitro-oxidative metabolism during fruit ripening. *Journal of Experimental Botany*, *69*(14), 3449-3463. https://doi.org/10.1093/jxb/erx453
15. Eghlima, G., Aghamir, F., Hajizadeh, H.S., & Zarbakhsh, S. (2025). Role of melatonin in promoting growth attributes, thymol, Rosmarinic acid and biochemical properties in *Thymus vulgaris* L. under water deficiency. *BMC Plant Biology*, *25*(1), 603. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06667-8
16. El-Sayed, S.F., Atress, A.S., Mahmoud, A.W.M., Maghraby, M.I., & El-Mogy, M.M. (2022). Effect of exogenous postharvest application with thyme and cinnamon oils on quality and storability of cherry tomato. *International Journal of Health Sciences*, *5*(S1), 519-531. https://doi.org/10.53730/ijhs.v5ns1.13245
17. Guo, Y., Chen, X., Gong, P., Wang, R., Han, A., Deng, Z., & Yao, W. (2023). Advances in the role and mechanisms of essential oils and plant extracts as natural preservatives to extend the postharvest shelf life of edible mushrooms. *Foods*, *12*(4), 801. https://doi.org/10.3390/foods12051046
18. Gyawali, R., & Ibrahim, S.A. (2014). Natural products as antimicrobial agents. *Food control*, *46*, 41. 492. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.05.047
19. Hallmann, E., & Rembiałkowska, E. (2012). Characterisation of antioxidant compounds in sweet bell pepper (*Capsicum annuum* L.) under organic and conventional growing systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *92*(12), 2409-2415. https://doi.org/10.1002/jsfa.5624
20. Hammoudi Halat, D., Krayem, M., Khaled, S., & Younes, S. (2022). A focused insight into thyme: Biological, chemical, and therapeutic properties of an indigenous Mediterranean herb. *Nutrients*, *14*(10), 2104. https://doi.org/10.3390/nu14102104
21. Hasanuzzaman, M., Nahar, K., & Fujita, M. (2012). Plant response to salt stress and role of exogenous protectants to mitigate salt-induced damages. In *Ecophysiology and responses of plants under salt stress* (pp. 25-87): Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4747-4_2
22. Hashemi, M., Dastjerdi, A.M., Shakerardekani, A., & Mirdehghan, S.H. (2021). Effect of alginate coating enriched with Shirazi thyme essential oil on quality of the fresh pistachio (*Pistacia vera* L.). *Journal of Food Science and Technology*, *58*(1), 34-43. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04510-6
23. Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, *125*(1), 189-198. https://doi.org/10.1016/j.abb.2022.109248
24. Hou, H., Zhang, X., Zhao, T., & Zhou, L. (2020). Effects of *Origanum vulgare* essential oil and its two main components, carvacrol and thymol, on the plant pathogen *Botrytis cinerea*. *PeerJ*, *8*, e9626. https://doi.org/10.7717/peerj.9626
25. Islam, T., Danishuddin, Tamanna, N.T., Matin, M.N., Barai, H.R., & Haque, M.A. (2024). Resistance mechanisms of plant pathogenic fungi to fungicide, environmental impacts of fungicides, and sustainable solutions. *Plants*, *13*(19), 2737. https://doi.org/10.3390/plants13192737
26. Jabir, M.S., Al-Shammari, A.M., Ali, Z.O., Albukhaty, S., Sulaiman, G.M., Jawad, S.F., & Najm, M.A. (2023). Combined oncolytic virotherapy gold nanoparticles as synergistic immunotherapy agent in breast cancer control. *Scientific Reports*, *13*(1), 16843. https://doi.org/10.1038/s41598-023-42299-4
27. Ji, Y., Hu, W., Guan, Y., & Saren, G. (2024). Effects of plant essential oil treatment on the growth of pathogenic fungi and the activity of defense-related enzymes of fungi-inoculated blueberry. *Horticulturae*, *10*(4), 318. https://doi.org/10.3390/horticulturae10040318

28. Kamyab, A., & Samsampour, D. (2025). How thyme thrives under drought: insights into photosynthetic and membrane-protective mechanisms. *BMC Biotechnology*, *25*(1), 95. https://doi.org/10.1186/s12896-025-01026-9
29. Karimirad, R., Behnamian, M., & Dezhsetan, S. (2018). Development and characterization of nano biopolymer containing cumin oil as a new approach to enhance antioxidant properties of button mushroom. *International Journal of Biological Macromolecules*, *113*, 662-668. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.043
30. Khan, M.R., Huang, C., Zhao, H., Huang, H., Ren, L., Faiq, M., & Xu, Y. (2021). Antioxidant activity of thymol essential oil and inhibition of polyphenol oxidase enzyme: a case study on the enzymatic browning of harvested longan fruit. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *8*(1), 61. https://doi.org/10.1186/s40538-021-00259-y
31. Kowalczyk, A., Przychodna, M., Sopata, S., Bodalska, A., & Fecka, I. (2020). Thymol and thyme essential oil—new insights into selected therapeutic applications. *Molecules*, *25*(18), 4125. https://doi.org/10.3390/molecules25184125
32. Kumar, S., Ye, F., Dobretsov, S., & Dutta, J. (2019). Chitosan nanocomposite coatings for food, paints, and water treatment applications. *Applied Sciences*, *9*(12), 2409. https://doi.org/10.3390/app9122409
33. Li, X., Wang, X., Chen, J., Luo, D., Cao, S., & Ba, L. (2025). Thymol maintains peppers quality by regulating antioxidant capacity, cell wall metabolism and membrane lipid metabolism. *Food Chemistry: X*, *25*, 102138. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102138
34. Lichtenthaler, H.K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, *1*(1), F3-1-F4. 3.8. https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01
35. Medany, M.S., Enas, A.H., Mohamed, E.N., & Yehia, A.H. (2022). Evalution of active edible caating containing essential oil emulsions to extend shelflife of orange. *Journal of Environmental Science*, *51*(5), 35-70. https://doi.org/10.21608/jes.2022.127410.1203
36. Moosavi-Nasab, M., Behroozi, B., Gahruie, H.H., & Tavakoli, S. (2023). Single-to-combined effects of gelatin and aloe vera incorporated with Shirazi thyme essential oil nanoemulsion on shelf-life quality of button mushroom. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, *15*(2)175-183. https://doi.org/10.15586/qas.v15i2.1241
37. Muthusamy, L., Balakumbahan, R., Rajangam, J., Sathiyamurthi, S., Anitha, T., Muthusamy, D., & Velmurugan, T. (2024). Spice and herb oil as potential alternative to agrochemicals in postharvest management of fruits and vegetables. *Discover Applied Sciences*, *6*(8), 404. https://doi.org/10.1007/s42452-024-06112-9
38. Rezaie, R., Abdollahi Mandoulakani, B., & Fattahi, M. (2020). Cold stress changes antioxidant defense system, phenylpropanoid contents and expression of genes involved in their biosynthesis in *Ocimum basilicum* L. *Scientific Reports*, *10*(1), 5290. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62090-z
39. Schaedle, M., & Bassham, J.A. (1977). Chloroplast glutathione reductase. *Plant physiology*, *59*(5), 1011-1012. https://doi.org/10.1104/pp.59.5.1011
40. Şirin, S., Aydaş, S.B., & Aslım, B. (2016). Biochemical evaluation of phenylalanine ammonia lyase from endemic plant cyathobasis fruticulosa (Bunge) Aellen. for the dietary treatment of phenylketonuria. *Food Technology and Biotechnology*, *54*(3), 296. https://doi.org/10.17113/ftb.54.03.16.4519
41. Spadaro, D., Ciavorella, A., Dianpeng, Z., Garibaldi, A., & Gullino, M.L. (2010). Effect of culture media and pH on the biomass production and biocontrol efficacy of a *Metschnikowia pulcherrima* strain to be used as a biofungicide for postharvest disease control. *Canadian Journal of Microbiology*, *56*(2), 128-137. https://doi.org/10.1139/w09-117
42. Tiamiyu, Q.O., Adebayo, S.E., & Ibrahim, N. (2023). Recent advances on postharvest technologies of bell pepper: A review. *Heliyon*, *9*(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15302
43. Wang, L., Hu, J., Li, D., Reymick, O.O., Tan, X., & Tao, N. (2022). Isolation and control of *Botrytis cinerea* in postharvest green pepper fruit. *Scientia horticulturae*, *302*, 11115.9. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111159
44. Yin, X., Chen, K., Cheng, H., Chen, X., Feng, S., Song, Y., & Liang, L. (2022). Chemical stability of ascorbic acid integrated into commercial products: A review on bioactivity and delivery technology. *Antioxidants*, *11*(1), 153. https://doi.org/10.3390/antiox11010153