



Investigating the Impact of Novel Gelatin-Cellulose Nanocrystal Coatings Containing Cinnamon Essential Oil on the Shelf Life of ‘Golden Delicious’ Apples Mehdi Panahyan-Kivi^{1*}, Abazar Abbasi², Saied Alipour³

¹Correspondence: Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email Address: panahyan@pnu.ac.ir

²Instructor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email Address: a.abbasi@pnu.ac.ir

³Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email Address: saiedalipour@pnu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 20 November 2025

Received in revised form: 6 Desember 2025

Accepted: 16 Desember 2025

Available online: 20 Desember 2025

Keywords:

Cinnamon Essential Oil

Edible Coating

Apple

Shelf-life

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the effects of emulsion-based coatings formulated with bacterial cellulose nanocrystals (BCNCs) and gelatin (GelA), containing cinnamon essential oil (CEO) at three concentration levels (1200, 1800, and 2400 $\mu\text{L/L}$), on the ripening and senescence processes of Golden Delicious apples during cold storage (60 days at 4 °C). The results showed that application of the coatings significantly reduced fruit weight loss compared with uncoated samples, decreasing it from approximately 14.68% to about 8.89% in the treatment containing 2400 $\mu\text{L/L}$ cinnamon essential oil. In addition, increasing the concentration of cinnamon essential oil showed a direct relationship with respiration rate and ethylene production. Coated samples at all concentration levels exhibited higher flesh firmness than the control samples, with the highest firmness observed at 2400 $\mu\text{L/L}$ cinnamon essential oil (18.23 N at 2400 $\mu\text{L/L}$ compared with 16.69 N at 1200 $\mu\text{L/L}$ after 60 days). This trend was consistent with the changes observed in indices such as titratable acidity, soluble solids content, pH, ascorbic acid content, and the activities of polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) enzymes. Overall, the use of BCNCs–GelA/CEO coating systems preserved the physicochemical quality of apples, controlled the senescence process, and extended their shelf life under cold storage conditions. The findings of this study indicate that the application of such coatings can be an effective strategy for enhancing postharvest longevity and reducing economic losses along the fresh fruit supply chain.

Cite this article: M. Panahyan-Kivi, A. Abbasi, and S. Alipour, “Investigating the Impact of Novel Gelatin-Cellulose Nanocrystal Coatings Containing Cinnamon Essential Oil on the Shelf Life of ‘Golden Delicious’ Apples, vol. 16, no. 3, pp. 75-92, 2025. **DOI:** <https://doi.org/10.47176/packaging.2026.1248>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights



Publisher: Imam Hossein University.

Introduction

Apple (*Malus domestica* Borkh.) is among the most important horticultural crops worldwide due to its wide consumer acceptance, high nutritional value, and richness in bioactive compounds such as phenolics, organic acids, vitamins, and dietary fiber. Despite these advantages, apples are climacteric fruits and are highly susceptible to postharvest quality degradation as a result of elevated respiration rate, ethylene production, moisture loss, enzymatic browning, and softening during storage. These physiological and biochemical changes significantly limit storage life and marketability, leading to considerable economic losses in the fresh fruit supply chain.

Cold storage is commonly used to delay ripening and senescence; however, low temperature alone is insufficient to fully control quality deterioration, especially during long-term storage. Consequently, the development of complementary and environmentally friendly preservation strategies has gained increasing attention in recent years. Among these strategies, edible and biodegradable coatings have emerged as promising alternatives to conventional synthetic packaging materials. Edible coatings function as semi-permeable membranes that regulate gas exchange, reduce water vapor permeability, and slow metabolic activity, thereby extending shelf life and maintaining fruit quality.

Protein-based coatings, particularly those derived from gelatin, have attracted interest due to their excellent film-forming ability, biodegradability, and edibility. Nevertheless, gelatin-based films often exhibit weak barrier and mechanical properties, which limit their effectiveness in postharvest applications. The incorporation of nanostructured materials, such as bacterial cellulose nanocrystals (BCNCs), has been proposed as an effective approach to overcome these limitations. BCNCs possess high crystallinity, large surface area, and strong hydrogen-bonding capacity, which can significantly enhance the structural integrity, mechanical strength, and barrier properties of biopolymer-based coatings.

In parallel, the incorporation of natural bioactive compounds into edible coatings has been widely investigated to impart antimicrobial and antioxidant functionality. Cinnamon essential oil (CEO) is a well-known natural preservative with strong antimicrobial and antioxidant activities, primarily attributed to cinnamaldehyde and related phenolic compounds. However, the volatility and hydrophobic nature of CEO limit its direct application on fresh produce. Emulsion-based systems combined with nanostructured carriers such as BCNCs offer an effective solution to stabilize CEO and control its release.

Although several studies have reported the application of gelatin–nanocellulose composite coatings on fruits, limited information is available regarding the combined use of fish gelatin, bacterial cellulose nanocrystals, and cinnamon essential oil for preserving the postharvest quality of Golden Delicious apples. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effectiveness of BCNCs–fish gelatin emulsion coatings enriched with different concentrations of cinnamon essential oil (1200, 1800, and 2400 $\mu\text{L/L}$) on physiological, physicochemical, mechanical, and enzymatic quality attributes of apples during 60 days of cold storage.

Results and Discussion

Weight loss is one of the most critical indicators of postharvest quality deterioration, as it directly affects fruit appearance, texture, and consumer acceptance. In the present study, weight loss increased progressively in all samples throughout the storage period; however, coated apples exhibited

significantly lower weight loss compared to uncoated controls ($p < 0.01$). After 60 days of storage, uncoated apples showed the highest weight loss, while apples coated with BCNCs–GelA containing 2400 $\mu\text{L/L}$ CEO exhibited the lowest weight loss. This reduction can be attributed to the formation of a compact and continuous coating layer that reduced transpiration by limiting water vapor diffusion through the fruit surface. The enhanced barrier properties of the coating are associated with the reinforcing effect of BCNCs within the gelatin matrix.

Respiration rate and ethylene production are key physiological processes governing ripening and senescence in climacteric fruits. The results indicated that both respiration rate (CO_2 production) and ethylene generation increased during the early stages of storage, reaching a peak around 20 days, followed by a gradual decline. Coated apples consistently exhibited significantly lower respiration and ethylene production rates compared to the control group throughout storage. This finding confirms that the coatings effectively modified the internal atmosphere of the fruit by restricting gas exchange, thereby slowing metabolic activity. Increasing the concentration of CEO slightly increased respiration and ethylene levels among coated samples, which may be attributed to the plasticizing effect of essential oil compounds on the gelatin matrix, increasing gas permeability. Nevertheless, all coated treatments remained significantly more effective than the uncoated control in suppressing metabolic processes.

Fruit firmness decreased over time in all treatments due to the natural degradation of cell wall polysaccharides during ripening. However, coated apples retained significantly higher firmness values than uncoated samples at all storage intervals ($p < 0.01$). Among the coated treatments, apples treated with 2400 $\mu\text{L/L}$ CEO maintained the highest firmness after 60 days of storage. The preservation of firmness can be explained by reduced ethylene production, lower respiration rate, and the inhibitory effects of CEO on cell wall-degrading enzymes such as polygalacturonase and pectin methylesterase.

Chemical quality attributes further supported the effectiveness of the coatings in delaying ripening. Total soluble solids (TSS) increased gradually during storage as a result of starch hydrolysis and sugar accumulation. However, coated apples exhibited significantly lower TSS values compared to uncoated samples, indicating a slower rate of carbohydrate metabolism. Titratable acidity (TA) decreased during storage in all treatments due to organic acid consumption during respiration, but coated apples retained higher TA values, particularly at higher CEO concentrations. Consequently, the pH of coated apples remained lower than that of the control, reflecting better preservation of organic acids and overall flavor balance.

Ascorbic acid content declined progressively during cold storage as a result of oxidative degradation. Apples coated with BCNCs–GelA/CEO showed a significantly slower reduction in vitamin C content compared to uncoated apples. This protective effect was more pronounced at higher CEO concentrations and can be attributed to reduced oxygen permeability of the coating as well as the antioxidant activity of cinnamon essential oil components.

Enzymatic activities associated with browning and oxidative stress were also influenced by the coatings. Polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) activities increased during storage in all treatments; however, coated apples exhibited significantly lower enzyme activities than the control. The strongest inhibition of PPO and POD was observed in apples coated with 2400 $\mu\text{L/L}$ CEO. This result highlights the combined effect of physical oxygen barrier properties and the biochemical inhibitory action of CEO phenolic compounds on oxidative enzymes, leading to reduced browning potential and improved visual quality.

Overall, the results demonstrate that BCNCs–GelA/CEO coatings effectively delayed physiological and biochemical changes associated with apple ripening and senescence. The synergistic interaction between bacterial cellulose nanocrystals and cinnamon essential oil played a critical role in enhancing coating performance and extending storage life.

Conclusion

The findings of this study confirm that emulsion-based edible coatings formulated from fish gelatin and bacterial cellulose nanocrystals and enriched with cinnamon essential oil represent an effective and sustainable approach for preserving the postharvest quality of Golden Delicious apples during cold storage. Among the tested treatments, the coating containing 2400 $\mu\text{L/L}$ CEO exhibited the most pronounced effects by significantly reducing weight loss, maintaining firmness, suppressing respiration and ethylene production, preserving organic acids and ascorbic acid, and inhibiting PPO and POD activities over 60 days of storage.

These results indicate that BCNCs–GelA/CEO coatings can successfully delay ripening and senescence processes while maintaining both physicochemical and biochemical quality attributes of apples. From an applied perspective, this coating system offers a promising alternative to synthetic preservatives and plastic packaging materials, contributing to reduced postharvest losses and improved sustainability in the fresh fruit industry. Future research may focus on sensory evaluation, consumer acceptance, scalability of the coating process, and the application of this technology to other climacteric fruits under commercial storage conditions.

بررسی تأثیر پوشش های نوین ژلاتین - نانوکریستال سلولز حاوی اسانس دارچین بر ماندگاری

سیب رقم گلدن دلشیز

مهدی پناهیان کیوی^{۱*}، اباذر عباسی^۲، سعید علی پور^۳

^۱ استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: panahyan@pnu.ac.ir

^۲ مربی، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: a.abbasi@pnu.ac.ir

^۳ استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: saiedalipour@pnu.ac.ir

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

کلیدواژه ها:

اسانس دارچین
پوشش خوراکی
سیب
ماندگاری

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر پوشش های امولسیون بر پایه نانوکریستال های سلولز باکتریایی (BCNCs) و ژلاتین (GelA)، حاوی اسانس دارچین (CEO) در سه سطح غلظتی (۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۴۰۰ $\mu\text{L/L}$)، بر روند رسیدگی و پیری میوه سیب رقم گلدن دلشیز طی دوره نگهداری سرد (۶۰ روز در دمای ۴ درجه سلسیوس) انجام گرفت. نتایج نشان داد که اعمال پوشش ها، افت وزن میوه را در مقایسه با نمونه های فاقد پوشش از حدود ۱۴/۶۸ درصد به حدود ۸/۸۹ درصد در تیمار حاوی $2400 \mu\text{L/L}$ اسانس دارچین کاهش داد. همچنین، افزایش غلظت اسانس دارچین با میزان نرخ تنفس و تولید اتیلن رابطه مستقیم داشت. نمونه های پوشش دار در تمام سطوح غلظتی، سفتی بافت بالاتری نسبت به نمونه های شاهد نشان دادند و بیشترین سفتی مربوط به غلظت $2400 \mu\text{L/L}$ اسانس دارچین بود (N ۱۸/۲۳). در غلظت $2400 \mu\text{L/L}$ در مقایسه با N ۱۶/۶۹ در غلظت $1200 \mu\text{L/L}$ بعد از ۶۰ روز. این روند با تغییرات مشاهده شده در شاخص هایی نظیر: اسیدیته قابل تیتراسیون، مواد جامد محلول، pH، محتوای اسید آسکوربیک و فعالیت آنزیم های پلی فنل اکسیداز (PPO) و پراکسیداز (POD) هم خوانی داشت. در مجموع، استفاده از سامانه های پوششی BCNCs-GelA/CEO موجب حفظ کیفیت فیزیکی و شیمیایی سیب ها، کنترل روند پیری و افزایش ماندگاری آن ها در شرایط سرمایی شد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که به کارگیری چنین پوشش هایی می تواند راهکاری مؤثر برای افزایش دوام پس از برداشت و کاهش افت اقتصادی در زنجیره تأمین میوه های تازه باشد.

استناد: پناهیان کیوی، مهدی، عباسی، اباذر، علی پور، سعید، بررسی تأثیر پوشش های نوین ژلاتین- نانوکریستال سلولز حاوی اسانس دارچین بر ماندگاری

سیب رقم گلدن دلشیز، نشریه علوم و فنون بسته بندی، دوره ۱۶، شماره ۳، صفحات ۷۵-۹۲، ۱۴۰۴. DOI: <https://doi.org/10.47176/packaging.2026.1250>

©نویسنده (گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می دارند.



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).

OPEN ACCESS

۱- مقدمه

کهنز [۴] و نیز پوشش کیتوزان غنی شده با عصاره برگ و تفاله زیتون [۱۸] می‌باشند. به‌طور کلی، مرور این مطالعات نشان می‌دهد که انتخاب نوع پلیمر زیستی، نوع اسانس یا عصاره گیاهی و روش آماده‌سازی پوشش، نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی نهایی پوشش‌های خوراکی در حفظ کیفیت پس از برداشت سیب دارد.

در پژوهش‌های پیشین، پوشش‌های امولسیون بر پایه اسانس دارچین (CEO) طراحی شدند که در آن‌ها، اسانس درون نانوکریستال‌های سلولز باکتریایی (BCNCs)^۷ جای‌گذاری و به‌وسیله ژلاتین استخراج‌شده از ماهی (GelA)^۸ پایدارسازی گردید. این سامانه‌ها با هدف ایجاد فیلم‌های زیست‌پایه فعال توسعه یافتند و ویژگی‌های فیلم‌سازی و پایداری ساختاری آن‌ها با دقت ارزیابی شد [۲۱، ۱۹]. همچنین، تأثیر این پوشش‌ها بر محصولاتی نظیر قارچ دکمه‌ای، شلیل و سیب رقم رد دلشیز^۹ بررسی شد و نتایج قابل توجهی حاصل شد [۲۴، ۲۲]. جالب توجه است که به‌کارگیری پوشش‌های حاوی نانوکریستال‌های سلولز^{۱۰} (CNCs) برای محافظت از میوه‌ها در مراحل پس از برداشت، نوظهور و در حال رشد است. طی سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی اثرات بالقوه این پوشش‌ها بر محصولات میوه‌ای پرداخته‌اند؛ برای مثال، امولسیون پیکرینگ CNC همراه با کیتوزان بر روی گلابی‌های رقم بارلت^{۱۱} اعمال شده است [۲۵]. پکتین غنی‌شده با CNC و اسانس علف لیمو برای توت‌فرنگی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۶] و امولسیون پیکرینگ CNC^{۱۲} اسید اولئیک همراه با کیتوزان بر روی گلابی بارلت به‌کار گرفته شده است [۲۷]. همچنین، کیتوزان تقویت‌شده با CNC بر روی گلابی‌های دانژو^{۱۳} و بارلت مورد مطالعه قرار گرفت [۲۸]. ژلاتین ترکیب‌شده با CNC برای پوشش توت‌فرنگی استفاده شد [۲۹]. کامپوزیت کیتوزان-نانوسلولز بر روی توت‌فرنگی اعمال گردید [۳۰]. اثر پوشش نانوکریستال‌های سلولز باکتریایی حامل اسانس دارچین در غلظت‌های مختلف بر بستری از پلیمر زیستی ژلاتین ماهی بر خواص مکانیکی میوه شلیل بررسی شد [۳۱]. پوره آسرولا^{۱۴} و آلژینات^{۱۵} تقویت‌شده با کریستال‌های سلولز برای میوه آسرولا بررسی شد [۳۲]. همچنین، مقایسه اثر نانوسلولز و نانوسیلیکا بر خواص بسته‌بندی‌های مقوایی تولید شده از خمیر سفید ضایعاتی

سیب^۱ از جمله میوه‌های پرمصرف جهان به شمار می‌رود و سرشار از ترکیبات زیست‌فعال و مغذی همچون ویتامین‌ها، اسیدهای آلی، فلاونوئیدها^۲ و پلی‌فنول‌ها^۳ است. با وجود ارزش تغذیه‌ای بالا، یکی از مسائل اساسی در فرآیند نگهداری و عرضه تجاری آن، پیری و زوال سریع میوه در دوره پس از برداشت است. این پدیده عمدتاً به الگوی تنفسی شدید و تولید اتیلن (C₂H₄) در بافت‌های میوه مربوط می‌شود. ویژگی مذکور که مشابه با سایر میوه‌های فرازگرا مشاهده می‌گردد، موجب افزایش نرخ فسادپذیری و در نهایت کاهش قابل توجه عمر ماندگاری سیب می‌شود [۱، ۲].

برای رفع این محدودیت، پژوهش‌های فراوانی با هدف شناسایی و توسعه روش‌ها و ترکیبات کارآمد به‌منظور کاربرد بر سطح میوه‌ها انجام گرفته است [۱، ۳، ۴].

در این زمینه، استفاده از پوشش‌های خوراکی یا زیست‌تخریب‌پذیر به‌عنوان لایه‌هایی محافظ بر سطح میوه‌ها، روشی کارآمد و موفقیت‌آمیز برای افزایش ماندگاری محصولات تازه به شمار می‌رود. این پوشش‌ها با ایجاد یک سد فیزیکی نازک، ضمن بهبود جلوه ظاهری میوه (به‌ویژه افزایش درخشندگی سطح)، موجب کنترل نرخ انتقال بخار آب، اکسیژن (O₂) و دی‌اکسیدکربن (CO₂) می‌شوند. به‌دنبال این کنترل، شدت تنفس و واکنش‌های فیزیولوژیکی مرتبط با فرایند رسیدگی کاهش یافته و روند پیری و افت کیفیت کندتر می‌گردد. افزون بر این، انواع پوشش‌های فعال با دارا بودن ترکیبات ضد میکروبی، می‌توانند نقش مؤثری در جلوگیری از رشد عوامل فساد و افزایش ایمنی میوه‌ها ایفا کنند [۵، ۸].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی با هدف بهبود عملکرد پوشش‌های خوراکی و تأثیر آن‌ها بر افزایش ماندگاری و کیفیت پس از برداشت سیب انجام شده است. نتایج همگی این مطالعات بر کارایی پوشش‌های زیستی در کاهش افت کیفیت، کنترل تبخیر رطوبت و به‌تعویق انداختن فرآیند پیری میوه تأکید دارند [۹، ۱۳]. سایر نمونه‌های موفق شامل استفاده از پوشش کیتوزان ترکیب‌شده با عصاره پوست موز [۱۴]، پوشش‌های نشاسته‌ای بر روی رقم گروپس صورتی^۴ [۱۵]، پوشش کیتوزان همراه با عصاره اتانولی شیرین‌بیان [۱۶]، پوشش صمغ کتیرا حاوی ژل آلونهورا برای سیب‌های رقم رد و گلدن دلشیز^۵ [۱۷]، پوشش نانوکیتوزان بر روی سیب رقم گلاب

⁶ Cinnamon Essential Oil (CEO)

⁷ Bacterial Cellulose Nanocrystals (BCNCs)

⁸ Fish Gelatin

⁹ Red Delicious

¹⁰ Cellulose Nanocrystals (CNCs)

¹¹ Bartlett

¹² Pickering emulsion

¹³ D'Anjou

¹⁴ Acerola

¹⁵ Alginate

¹ Malus domestica cv. Borkh

² Flavonoids

³ Polyphenols

⁴ Gropps pink

⁵ Red and Golden Delicious

سلولز باکتریایی^۳ (BC) از طریق تخمیر استاتیک با استفاده از باکتری کوماگاتسائی باکتری سوکروفرماتانس دی اس ام^۴ ۱۵۹۷۳^۴ (تهیه شده از Leibniz Institute DSMZ—German Collection of and Cell Cultures, Braunschweig, Germany Microorganisms) و طبق روش گزارش شده توسط روورا و همکاران (۲۰۱۸) تولید شد [۳۷].

اتانول (غلظت ۹۶٪ v/v)، اسید سولفوریک (غلظت ۹۹٪ v/v) و غشای دیالیز^۵ (از جنس سلولز، وزن مولکولی اسمی ۱۲kDa، عرض متوسط ۴۳ mm) از شرکت‌های سیگما آلدریج^۶ یا مرک^۷ تهیه گردید. همچنین سدیم دی هیدروژن فسفات^۸، دی سدیم هیدروژن فسفات^۹، پلی وینیل پلی پیرولیدون^{۱۰}، تریاتون ایکس-۱۰۰^{۱۱}، کاتکول^{۱۲}، پارافنیلین دی آمین^{۱۳} پراکسید هیدروژن^{۱۴} و یدات پتاسیم^{۱۵} همگی از شرکت مرک خریداری شدند. علاوه بر این، یدید پتاسیم^{۱۶}، نشاسته، اسید کلریدریک^{۱۷}، سدیم هیدروکسید^{۱۸} و فنل فتالین^{۱۹} از شرکت مجلی (تهران، ایران) تهیه شدند.

۲-۲- آماده سازی پوشش

پوشش تهیه شده در این مقاله با استفاده از روش گزارش شده توسط رضوی و همکاران (۲۰۲۰) تولید شد [۱۹]. به طور خلاصه، تهیه امولسیون‌های BCNCs-GelA/CEO شامل یک فرآیند سه مرحله‌ای بود که با آماده سازی سوسپانسیون‌های آبی^{۲۰} BCNCs با غلظت ۰/۴ درصد وزنی/وزنی (w/w) [۳۷] آغاز شد. سپس مقادیر متفاوتی از^{۲۱} CEO (۶۰۰، ۹۰۰ و ۱۲۰۰ μL/L) در pH=۵ به آن افزوده شد تا در نهایت سری‌ای از غلظت‌های اسانس دارچین به ترتیب ۰/۸، ۰/۲ و ۱/۶ درصد حجمی/وزنی (v/w) حاصل شود.

و ارجحیت اثر مثبت نانوسلولز در خواص نهایی مقوای بسته‌بندی [۳۳] و در نهایت مقالات مروری از جمله امولسیون‌های پایدار شده توسط سلولز و نانو سلولز باکتریایی و کاربردهای آن در بسته‌بندی و پوشش‌های مواد غذایی [۳۴]، مروری بر فیلم‌های زیست تخریب پذیر سلولز باکتریایی [۳۵] و نیز کاربرد نانوکریستال‌های سلولزی در فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی [۳۵] انجام شده است.

به طور کلی، نتایج پژوهش‌های ذکر شده نشان می‌دهند که نانوکریستال‌های سلولز (CNCs) توانایی قابل توجهی برای به کارگیری در تولید پوشش‌های خوراکی دارند و می‌توانند نقش مؤثری در افزایش ماندگاری و طول عمر نگهداری میوه‌ها پس از برداشت ایفا کنند. با این وجود، ساختارهای دقیق اثرگذاری CNCs به عنوان اجزای کلیدی در پوشش‌های غذایی، به ویژه در انواع گوناگون میوه‌ها، هنوز به طور کامل روشن نشده‌اند و نیازمند مطالعات جامع و دقیق‌تری هستند [۳۶].

بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی تأثیر پوشش‌های BCNCs-GelA/CEO بر کیفیت سیب‌های رقم گلدن دلیشز^۱ انجام شد، رقمی که به دلیل فراوانی و دسترسی گسترده در بازار انتخاب گردید. به این منظور، در طول دوره نگهداری ۶۰ روزه در شرایط سرد، شاخص‌های مختلف فیزیکی شامل افت وزن، شاخص‌های فیزیولوژیکی مانند نرخ تولید CO₂ و C₂H₄ و ویژگی‌های مکانیکی از جمله: سفتی بافت و شاخص‌های بیوشیمیایی شامل اسیدیته کل، مواد جامد محلول کل، میزان ویتامین C، pH و فعالیت آنزیمی به طور منظم پایش شدند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه و مواد شیمیایی

میوه‌های سیب از رقم گلدن دلیشز در مرحله رسیدگی تجاری از یکی از باغ‌های شهر مشگین شهر (استان اردبیل، شمال غرب ایران) تهیه شدند.

مطالعه حاضر از چندین ماده تجاری آماده استفاده کرد. ژلاتین ماهی نوع A (استخراج شده با پیش تیمار اسیدی، دارای گواهی کوشر^۲ و حلال) با قدرت ژل دهی ۲۰۰ Bloom از شرکت Weishardt (Graulhet, France) تهیه شد. اسانس پوست دارچین (Cinnamon Bark Essential Oil, CEO)، از شرکت Plant Therapy Oils Corporate (Twin Falls, ID, USA) خریداری گردید.

³ Bacterial Cellulose

⁴ Komagataebacter sucofermentans DSM 15973

⁵ Dialysis membrane

⁶ Sigma-Aldrich (St. Louis, Missouri, USA)

⁷ Merck (Darmstadt, Germany)

⁸ Sodium dihydrogen phosphate (NaH₂PO₄)

⁹ Disodium hydrogen phosphate (Na₂HPO₄)

¹⁰ Polyvinylpyrrolidone (PVPP)

¹¹ Triton X-100

¹² Catechol

¹³ p-phenylenediamine

¹⁴ Hydrogen peroxide (H₂O₂)

¹⁵ Potassium iodate (KIO₃)

¹⁶ Potassium iodide (KI)

¹⁷ Hydrochloric acid (HCl)

¹⁸ Sodium hydroxide (NaOH)

¹⁹ Phenolphthalein

²⁰ Aqueous suspensions

²¹ Aqueous suspensions

¹ Golden Delicious

² Kosher

۲-۴-۲- نرخ تنفس

نرخ تولید CO₂ میوه بر اساس روشی که قبلاً توسط مفتونازاد و راماسوامی (۲۰۰۵) شرح داده شده بود [۵]، با تغییرات جزئی تعیین شد. پس از نمونه برداری، میوه‌ها قبل از انجام آزمایش‌ها در شرایط محیطی نگهداری شدند تا به دمای تعادلی برسند. برای هر دسته، سه عدد سیب با جرم و حجم مشخص در یک شیشه دربسته به حجم ۲ لیتر قرار داده شدند. یک دستگاه آشکارساز گاز CO₂/O₂ ۱ مجهز به سنسور سوزنی، هر ۳۰ دقیقه به مدت ۴ ساعت داخل شیشه وارد شد تا تغییرات غلظت (% CO₂) اندازه‌گیری شود.

صرف نظر از زمان نمونه برداری (۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ روز)، نرخ تنفس (RCO₂ بر حسب μmol/kg·h) مطابق معادله (۲) محاسبه شد [۴۰، ۳۹].

$$RCO_2 = (y_{CO_2} - y_i, CO_2) / (t - t_i) \times V_f / W \quad (2)$$

که در آن y_{i,CO₂} غلظت اولیه گاز در شیشه (%v/v)، y_{CO₂} غلظت نهایی گاز (%v/v) در زمان اولیه، t_i زمان اولیه (۴ ساعت)، W جرم کل سیب داخل شیشه (kg) و V_f حجم آزاد داخل شیشه (mL) می‌باشد. هر مجموعه اندازه‌گیری شامل حداقل سه تکرار بود.

۲-۴-۳- نرخ تولید C₂H₄

سه سیب با جرم و حجم مشخص که از هر دسته مورد بررسی جمع‌آوری شده بودند، در یک جار شیشه‌ای درزبندی شده با حجم ۲ لیتر قرار داده شدند. پس از ۲۴ ساعت، تولید C₂H₄ با نمونه برداری ۱ میلی لیتر گاز از فضای بالای ظرف شیشه‌ای با استفاده از سرنگ شیشه‌ای اندازه‌گیری شد. گاز نمونه برداری شده سپس به یک کروماتوگراف گازی (Agilent 7890A, Santa Clara, CA, USA) تزریق شد. برای جبران حجم هوای استخراج شده، ۱ میلی لیتر هوای محیط پس از نمونه برداری به داخل جار تزریق شد. تنظیمات GC به شرح زیر بود: دمای انژکتور و کوره: ۹۰ درجه سلسیوس؛ دمای آشکارساز: ۱۸۰ درجه سلسیوس؛ نرخ جریان گاز حامل (هلیوم): ۷ mL/min.

سپس از معادله زیر (معادله ۳) برای محاسبه نرخ تولید C₂H₄، RC₂H₄ بر حسب (μmol/kg·h) استفاده شد [۴۱]:

$$RC_2H_4 = (y_{C_2H_4} - y_i, C_2H_4) / (t - t_i) \times V_f / W \quad (3)$$

که در آن y_{i,C₂H₄} غلظت اولیه گاز در محفظه، y_{C₂H₄} غلظت گاز در زمان نهایی (۲۴ ساعت)، غلظت نهایی گاز (%v/v) در زمان اولیه، t_i زمان نهایی (۴ ساعت)، W جرم سیب (kg) و V_f حجم آزاد داخل شیشه (mL) می‌باشد. نتایج نهایی از میان سه تکرار به دست آمده‌اند.

در نهایت، سامانه CEO/BCNCs (۷۵ گرم) به صورت قطره‌قطره به محلول ژلاتین ماهی افزوده شد، مطابق روشی که در پژوهش رضوی و همکاران (۲۰۲۰) گزارش شده است [۱۹]. امولسیون نهایی CEO/BCNCs-GelA/BCNCs و ژلاتین به ترتیب با غلظت‌های ۰/۰۶ درصد (w/w) و ۳٪ (w/w) بود، در حالی که غلظت‌های نهایی اسانس دارچین برابر با ۰/۱۲، ۰/۱۸ و ۰/۲۴ درصد (v/w) (یا ۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۴۰۰ μL/L) بودند.

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

میوه‌های سیب به صورت دستی برداشت شدند و بر اساس یکنواختی در میزان رسیدگی، رنگ و اندازه انتخاب گردیدند. سیب‌ها بلافاصله به مدت ۱۵ ثانیه در محلول پوشش‌دهنده مشخص شده (حاوی ۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۴۰۰ μL/L اسانس دارچین) در دمای ۲۳ درجه سلسیوس غوطه‌ور شدند، به طوری که در نهایت چهار دسته متفاوت از ۲۳ عدد سیب ایجاد شد: C0 (نمونه‌های پوشش داده شده بدون CEO)، C1200 (پوشش با ۱۲۰۰ μL/L اسانس)، C1800 (پوشش با ۱۸۰۰ μL/L اسانس) و C2400 (پوشش با ۲۴۰۰ μL/L اسانس).

پس از پوشش دهی، نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در شرایط محیطی خشک شدند و سیب‌های بدون پوشش نیز به عنوان گروه شاهد مورد استفاده قرار گرفتند. سپس سیب‌ها در سبدهای پلاستیکی حاوی سینی‌های مخصوص قرار گرفته، با کاغذهای بسته‌بندی سنتی پوشانده شدند و تحت شرایط کنترل شده شامل دمای ۵/۰ ± ۴ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۵-۸۰٪ به مدت ۶۰ روز نگهداری شدند. در طول دوره ذخیره‌سازی، نمونه برداری‌ها هر ۲۰ روز انجام شد و در هر مرحله، چندین روش تعیین ویژگی‌ها اجرا شد که در زیر به طور مفصل شرح داده شده است.

۲-۴-۲- ارزیابی کیفیت نمونه

۲-۴-۱- کاهش وزن

کاهش وزن نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال (GF-600، شرکت A&D Weighing، توکیو، ژاپن) اندازه‌گیری شد. نتایج به صورت درصد کاهش وزن (%WL) ارائه شده‌اند [۳۸] و با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید (معادله (۱)):

$$WL (\%) = (W_i - W_t) / W_i \times 100 \quad (1)$$

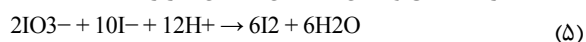
که در آن W_t و W_i به ترتیب نشان‌دهنده وزن اولیه میوه (t = 0) و وزن میوه در طول زمان هستند. مقادیر نهایی کاهش وزن (WL) از حداقل پنج تکرار به دست آمده‌اند.

¹ OXYBABY 6, WITT, Witten, Germany

۴-۴-۲- سفتی بافت

برای اندازه‌گیری pH عصاره میوه، از یک pH متر (Metrohm-827) (Zofingen, Switzerland) استفاده شد و اندازه‌گیری‌ها هر ۲۰ روز یکبار انجام گرفت [۵].

اسید آسکوربیک (ویتامین C) با روش تیتراسیون و با استفاده از محلول نشاسته (۵٪ وزنی/وزنی) به عنوان شاخص تعیین شد [۴۵]. به طور خلاصه، ۱۰۰ گرم بافت سیب با استفاده از مخلوط‌کن همگن شد و عصاره به دست آمده از طریق پارچه تنظیف فیلتر گردید تا آب سیب به دست آید. سپس آب سیب به سرعت با آب مقطر رقیق شد تا حجم نهایی ۱۰۰ mL حاصل شود که از این مقدار ۲۰ mL به داخل یک بالن ارلنمایر ریخته شد. پس از آن، ۱۵۰ mL آب مقطر به بالن افزوده شد و همزمان ۵ mL محلول پتاسیم یدید $0.006 M$ و ۵ mL محلول $1 M HCl$ به آن اضافه گردید. تیتراسیون با استفاده از پتاسیم یدایت $0.002 M$ انجام شد تا زمانی که رنگ سیاه یا آبی تیره مشاهده گردید. طبق واکنش اکسایش-کاهش^{۱۰} زیر (معادله ۵):



با دانستن تعداد مول‌های پتاسیم یدایت، تعداد مول‌های آسکوربیک اسید موجود در آب میوه محاسبه شد. بر اساس واکنش ذکر شده، هر یون آیودایت^{۱۱} (IO_3^-) سه یون آیوداید^{۱۲} (I_2) تولید می‌کند که با آسکوربیک اسید موجود در آب میوه واکنش می‌دهند. با دانستن غلظت (C, mol/L) و حجم (V , mL) KIO_3 مصرف شده در تیتراسیون، تعداد مول‌ها (n) به صورت زیر محاسبه شد (معادله ۶):

$$n = C \times V \quad (6)$$

به‌طور کلی، با دانستن استوکیومتری^{۱۳} واکنش زیر (معادله ۷):

$$Ascorbic\ acid + I_2 \rightarrow 2I^- + dehydroascorbic\ acid \quad (7)$$

با توجه به وزن مولکولی ویتامین C ($176/12\ g/mol$)، میزان اسید آسکوربیک تعیین شده و سپس به صورت $mg/100\ mg$ (یا $\%$) از آب میوه بیان شد.

صرف‌نظر از شاخص اندازه‌گیری شده (TSS, TA, pH) و ویتامین C، پنج تکرار برای هر دسته از نمونه‌ها انجام شد.

۴-۴-۲-۶- فعالیت آنزیمی پلی‌فنل اکسیداز^{۱۴} و پراکسیداز^{۱۵}

تجزیه و تحلیل‌ها و آزمایشات مطابق روش گزارش شده توسط رضوی همکاران (۲۰۲۵) و عموقین و همکاران (۲۰۲۴) انجام شد [۴۶]. [۴۷]. ابتدا، عصاره آنزیمی از بافت‌های میوه با استفاده از بافر فسفات

سختی بافت سیب‌ها با استفاده از تست نفوذ و به کمک یک دستگاه^۱ STM-20 مجهز به لودسل^۲ (نیروسنج) $100\ N$ اندازه‌گیری شد. ابتدا سیب‌ها پوست‌کنده شدند و سپس یک میله با نوک کرومی از جنس استیل ضدزنگ (به قطر $11\ mm$) برای نفوذ به بافت سیب تا عمق $9\ mm$ با سرعت ثابت $20\ mm/min$ استفاده شد. در طول آزمایش، نمونه‌های سیب به‌طور محکم روی یک صفحه فولادی ثابت شدند و میله به سمت پایین حرکت کرد. بیشترین نیرو در نمودار نیرو-تغییر شکل به‌عنوان سختی بافت سیب در نظر گرفته شد [۴۲]. برای هر دسته، مقادیر نهایی سختی بافت از شش تکرار به دست آمدند.

۴-۴-۲-۵- جامد محلول کل (TSS)، اسیدیته قابل تیتراسیون^۳

(TA, pH) و ویتامین ث یا آسکوربیک اسید^۴

برای اندازه‌گیری مواد جامد محلول، از یک مخلوط‌کن آزمایشگاهی برای استخراج آب میوه‌ها استفاده شد. آب میوه به‌دست آمده سپس بر اساس شاخص بریکس^۵ (%) با استفاده از رفکٹومتر دستی^۶ (RHB-32/ATC, Brix 0-32%, 0.2% accuracy; Hong Kong, China) مورد سنجش قرار گرفت.

اسیدیته قابل تیتراسیون^۷ (TA) با استفاده از تیتراسیون با $0.1\ M NaOH$ در حضور محلول معرف فنل‌فتالین تا رسیدن به pH تقریباً ۸ و رنگ صورتی روشن تعیین شد. برای این منظور، عصاره میوه ابتدا با استفاده از پارچه تنظیف صاف شد؛ سپس ۵ mL از آن جدا شده، در یک ارلنمایر^۸ ریخته و با آب مقطر تا حجم $200\ mL$ رقیق شد. تیتراسیون ادامه یافت تا رنگ عصاره رقیق‌شده به صورتی روشن تبدیل شد. در نهایت، اسیدیته کل قابل تیتراسیون به صورت میلی‌گرم معادل اسید مالیک در هر میلی‌لیتر آبمیوه (mg/mL) بر اساس فرمول زیر (معادله ۴) بیان شد [۴۳، ۴۴]:

$$Total\ acidity = (N \times V1 \times Eq.wt) / V2 \quad (4)$$

که در آن N نرمالیتته^۹ سود مصرفی (molEq/mL)، $V1$ حجم مصرفی سود (mL)، Eq.wt وزن معادل اسید غالب (mg/molEq) و $V2$ حجم آب میوه استفاده‌شده (mL) می‌باشد. وزن معادل اسید مالیک برابر با $67\ mg/molEq$ است.

¹ Instron Universal Testing Machine

² Loadcell

³ Titratable acidity

⁴ Ascorbic acid

⁵ Brix

⁶ Handheld Refractive

⁷ Titratable acidity

⁸ Erlenmeyer

⁹ Normality

¹⁰ Redox Reaction

¹¹ Iodate

¹² iodide

¹³ Stoichiometry

¹⁴ Polyphenol Oxidase (PPO)

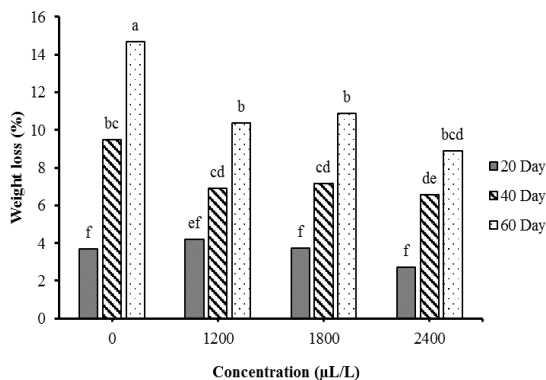
¹⁵ Peroxidase (POD)

یک طرفه استفاده شد. سطح معنی داری (p) در ۰/۰۱ تعیین گردید و برای مقایسه میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.2 به کار گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- کاهش وزن

در طول دوره نگهداری ۶۰ روزه در شرایط سرد، کاهش وزن (WL) در هر دو گروه میوه‌های بدون پوشش و پوشش داده شده مشاهده شد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده، صرف‌نظر از میزان اسانس دارچین (CEO) موجود در پوشش ($p < 0.01$)، پس از گذشت ۶۰ روز، نمونه‌های بدون پوشش کاهش وزن بیشتری نسبت به نمونه‌های پوشش داده شده داشتند، به‌طور مشخص، در ۲۰ روز اول نگهداری، نمونه‌های کنترل و C1800 تقریباً کاهش وزن مشابهی را نشان دادند (به ترتیب ۳/۶۸ و ۳/۷۳ درصد)؛ اما در روزهای ۴۰ و ۶۰، نمونه‌های C1800 و C1200 کاهش وزن نسبتاً مشابه با اختلاف اندک داشتند (به ترتیب ۶/۸۸ و ۶/۵۴ درصد در روز ۴۰ و ۱۰/۳۷ و ۱۰/۸۷ درصد در روز ۶۰)، اگرچه این اختلاف از نظر آماری معنادار نبود ($p > 0.01$). همچنین، زمان به‌طور قابل توجهی باعث افزایش کاهش وزن در تمامی تیمارها شد ($p < 0.01$). از میان تیمارها، C2400 بیشترین اثر را در محدود کردن افزایش اولیه کاهش وزن داشت که احتمالاً ناشی از قابلیت آن در ایجاد یک غشاء نیمه‌تراوا است که سرعت انتقال رطوبت از سطح میوه را کاهش می‌دهد.



شکل (۱): تغییرات وزن نمونه‌ها طی ۶۰ روز نگهداری

این موضوع با نتایج گزارش شده در تحقیقات پیشین مطابقت دارد [۲۰]، بیشترین اثر محافظتی در برابر از دست رفتن آب، در بالاترین غلظت اسانس مشاهده شد که می‌تواند ناشی از افزایش تعداد قطرات آب‌گریز CEO باشد؛ قطراتی که احتمالاً به‌طور مستمر از تبخیر جلوگیری کرده‌اند. این یافته‌ها با مطالعات گذشته که در آن‌ها از پوشش‌های زیست‌پلمیری برای محافظت از سطح سیب استفاده

شدیم ۰/۴ M تهیه شد. این بافر از محلول‌های دی‌سدیم هیدروژن فسفات (Na_2HPO_4) با $\text{pH} = 6/5$ و سدیم دی‌هیدروژن فسفات (NaH_2PO_4) با $\text{pH} = 6/5$ به دست آمد. سپس، محلول استخراج آنزیمی با افزودن ۴٪ (w/v) پلی‌وینیل‌پیرولیدون (PVP) و ۱٪ تریتون X-۱۰۰ (v/v) به بافر فسفات سدیم ۰/۲ M ($\text{pH} = 6/5$) تهیه شد. در نهایت، بافت‌های میوه همگن‌سازی شده و ۱۰ g از عصاره با ۲۰ g از محلول استخراج آنزیمی مخلوط گردید. این مخلوط به مدت ۱۰ min در دمای ۴ درجه سلسیوس و با نیروی گریز از مرکز نسبی ۷۵۰۰ rcf سانتریفیوژ^۱ شد (LISA, Château-Gontier, France). مایع شناور با دقت جدا گردید تا فعالیت‌های آنزیمی مورد ارزیابی قرار گیرند. برای هر تکرار، سه نمونه مجزا در نظر گرفته شد.

برای سنجش فعالیت پلی فنل اکسیداز (PPO)، ۷۵ میکرولیتر از مایع شناور با ۳ mL از بافر فسفات سدیم ۰/۰۵ M ($\text{pH} = 6/5$) حاوی ۰/۰۷ M کتکول مخلوط شد. به‌منظور نمونه‌های کنترل، روش مشابهی اتخاذ گردید، با این تفاوت که به جای محلول استخراج آنزیمی، از آب مقطر استفاده شد. جذب محلول با استفاده از یک اسپکتروفتومتر^۲ در طول موج ۴۲۰ nm و دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ min در حالت جنبشی^۳ اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیمی بر اساس تغییرات جذب اندازه‌گیری شده در هر دقیقه به‌ازای هر گرم نمونه تعیین گردید.

برای سنجش فعالیت پراکسیداز (POD)، ۵۰۰ µL/L از مایع شناور با ۱ mL از بافر فسفات سدیم ۰/۰۵ M ($\text{pH} = 6/5$) مخلوط شد. برای آغاز واکنش، ۱ mL از بافر فسفات سدیم ۰/۰۵ M ($\text{pH} = 6/5$) حاوی ۱٪ w/v پارا-فنیل‌دی‌آمین و ۵۰۰ µL/L هیدروژن پراکسید ۱/۵ درصد v/v اضافه گردید. سپس، جذب محلول آماده شده در طول موج ۴۸۵ nm و دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ min در حالت جنبشی اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیمی بر اساس تغییرات جذب اندازه‌گیری شده در هر دقیقه به‌ازای هر گرم نمونه تعیین گردید.

۲-۵- تجزیه و تحلیل آماری

تمام نتایج گردآوری شده به صورت فاکتوریل^۴ در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شدند و به‌صورت میانگین \pm انحراف معیار بیان گردیدند. برای بررسی تفاوت‌های بین نمونه‌ها از آنالیز واریانس

^۱ Centrifuge

^۲ Spectrophotometer

^۳ Kinetics

^۴ factorial

در مورد تأثیر پوشش‌دهی بر نمونه‌های سیب، مشاهده شد که میوه‌های فاقد پوشش، نسبت به میوه‌های دارای پوشش، میزان تولید گاز بالاتری داشتند که نشان‌دهنده نقش مؤثر پوشش‌ها در محدود کردن نفوذ CO_2 و C_2H_4 است. همچنین، رابطه‌ای مستقیم بین غلظت CEO (در محدوده ۱۲۰۰ تا ۲۴۰۰ $\mu\text{L/L}$) و نرخ تنفس و تولید C_2H_4 شناسایی شد که این نتیجه با گزارش‌های پیشین درباره ویژگی‌های نفوذپذیری فیلم‌های BCNCs-GelA/CEO همخوانی دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که افزایش غلظت CEO فرمولاسیون^۲، نرخ انتقال CO_2 را به‌ویژه در شرایط رطوبت نسبی ۵۰٪ افزایش می‌دهد [۲۰]. این پدیده را می‌توان با تأثیر نرم‌کننده‌ای CEO توضیح داد که احتمالاً منجر به افزایش حجم آزاد در فاز اصلی بیوپلیمر^۳ (ژلاتین) در شبکه پوشش داده شده شده و در نتیجه مسیرهای انتقال جرم را تسهیل می‌کند. تأثیر نرم‌کنندگی CEO با سایر نرم‌کننده‌های متداول همچون گلیسرول^۴، سوربیتول^۵ و حتی آب مقایسه شده است، اگرچه تفاوت‌های قابل توجهی میان آن‌ها مشاهده می‌شود [۲۰]. به بیان دیگر، حضور CEO موجب افزایش فاصله بین مولکولی در شبکه ژلاتین می‌گردد و به دلیل موانع فضایی (به عنوان یک مولکول کوچک با وزن مولکولی پایین) و ناسازگاری نسبی شیمیایی با فاز بیوپلیمر اصلی، نظم پیوندهای هیدروژنی ژلاتین را به نحوی مختل می‌کند.

نتایج به‌دست‌آمده با مشاهدات ساپر و همکاران [۹] همخوانی دارد؛ آن‌ها روند مشابهی را در نرخ تنفس میان میوه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش گزارش کردند. به‌طور خاص، افزودن اسانس کارواکرول^۶ به فاز پلیمری پایه پلی‌وینیل الکل^۷ موجب افزایش تولید CO_2 شد. همچنین، همان گروه پژوهشی کاهش قابل توجهی در تولید CO_2 در هنگام استفاده از پوشش‌های ترکیبی نشاسته-ژلان^۸ ثبت کردند [۶]. با این حال، زمانی که اسانس‌های گیاهی به‌صورت کپسوله‌شده با لسیتین^۹ در پوشش‌های نشاسته-ژلان به کار گرفته شدند، تفاوت قابل توجهی میان نمونه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش مشاهده نشد؛ این موضوع به تأثیر پلاستی‌سایزری^{۱۰} اسانس‌های گیاهی نسبت داده شد.

شده بود [۴، ۱۰، ۱۳، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۲۴]. همخوانی دارند، این نتیجه با یافته‌های ساپر و همکاران [۹، ۶] که نشان داده بودند پوشش‌ها تأثیری در جلوگیری یا کاهش کاهش وزن سیب‌ها ندارند، در تضاد است. نویسندگان آن مطالعات دو عامل اصلی را برای این موضوع مطرح کردند: (۱) خاصیت بسیار آب‌دوست پلیمرهای استفاده‌شده که باعث افزایش نفوذپذیری بخار آب شد و (۲) مقدار اندک مواد جامد جذب‌شده روی سطح میوه که منجر به تشکیل پوشش‌های نهایی بسیار نازک گردید. با این حال، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که پوشش اعمال شده می‌تواند با کاهش میزان تعرق و جلوگیری از هدررفت آب، به طور مؤثری ماندگاری سیب‌ها را بهبود بخشد.

۳-۲- نرخ تنفس و تولید C_2H_4

همان‌طور که در شکل ۲ الف قابل مشاهده است، بین تیمارهای مختلف و بازه‌های زمانی متنوع، تفاوت‌های معناداری در نرخ تنفس مشاهده شد ($p < 0.01$). همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد، پس از ۲۰ روز نگهداری، میزان تنفس در تمامی تیمارها افزایش یافت که نشان‌دهنده ادامه فعالیت‌های فیزیولوژیکی و فرآیند رسیدگی پس از برداشت بود. با گذشت ۴۰ و ۶۰ روز، الگوی متفاوتی پدیدار شد؛ کاهش قابل توجهی در نرخ تنفس هر دو گروه میوه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش مشاهده گردید.

روند مشابهی نیز برای تولید C_2H_4 ثبت شد که در بازه‌های زمانی مشابه با تولید CO_2 تغییر می‌کرد (شکل ۲ ب). مطابق الگوی رسیدگی میوه‌های فرازگرا مانند سیب، نرخ تنفس از حداقل مقدار پیش‌فرازگرایی به‌طور ناگهانی به اوج فرازگرایی افزایش می‌یابد. این جهش شدید باعث آغاز مجموعه‌ای از واکنش‌های بیوشیمیایی می‌شود که توسط تولید خودکاتالیزوری^۱ C_2H_4 تحریک شده و انتقال میوه از مرحله رسیدگی به مرحله پیری را شکل می‌دهد. هم‌زمان با این فرآیند، افزایش نرخ تنفس ادامه می‌یابد و در نهایت موجب رسیدگی کامل میوه می‌شود [۴۸]؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند رسیدگی سیب تا حدود ۲۰ روز پس از انبارداری ادامه داشته است که با افزایش ناگهانی CO_2 و C_2H_4 تا نقطه فرازگرایی تنفسی همراه بوده و پس از آن کاهش سریع هر دو گاز رخ داده است.

² Formulation

³ Biopolymer

⁴ Glycerol

⁵ Sorbitol

⁶ Carvacrol

⁷ Polyvinyl Alcohol (PVA)

⁸ Gellan Gum

⁹ Lecithin

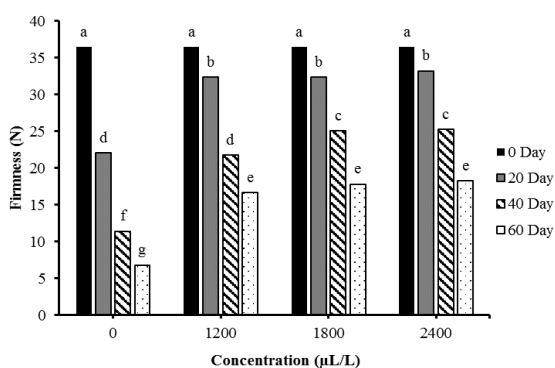
¹⁰ Plasticizer

¹ Autocatalysis

الف

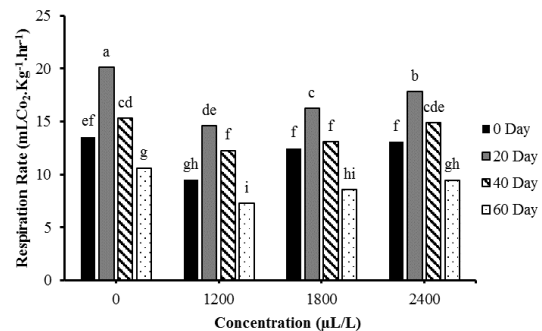
همی سلولز^۳ جای گرفته و پکتین^۴ به عنوان عامل اتصال دهنده بین سلول های مجاور عمل می کند [۵۱]. تغییرات ساختاری دیواره سلولی در طی فرآیند رسیدگی میوه شامل کاهش چسبندگی بین سلول ها، کاهش pH فضای آپوپلاستی^۵، دپلمریزاسیون^۶ و حل شدگی پکتین و همی سلولز و در نهایت افزایش انعطاف پذیری و تخلخل دیواره سلولی است [۵۲].

در طول دوره نگهداری، اختلاف معناداری ($p < 0.01$) میان تیمارها مشاهده نشد که نشان دهنده تأثیر غلظت اسانس گیاهی دارچین (CEO) بر میزان نرم شدن بافت می باشد. یکی از آنزیم های کلیدی مرتبط با تجزیه دیواره سلولی و تغییرات بافتی در سیب، پلی گالاکتوروناز^۷ (PG) است [۵۳]. کاهش سرعت نرم شدن بافت در نمونه های پوشش دار نسبت به نمونه های بدون پوشش را می توان به کاهش تولید اتیلن نسبت داد؛ نتیجه ای که با یافته های سحرایی خوش گردش و همکاران [۴] و همچنین ژانگ و همکاران [۱۴] هم راستا است. پس از ۴۰ روز نگهداری در شرایط سرد، افزایش تدریجی نرم شدن احتمالاً به دلیل تجمع اتیلن و شروع فرآیند پیری فیزیولوژیکی بوده است. نمونه های شاهد در طول کل دوره آزمایش، مقادیر سختی پایین تری نسبت به سایر تیمارها نشان دادند؛ این موضوع می تواند به دلیل کاهش وزن بیشتر، افزایش نرخ تنفس و تولید بالاتر اتیلن در این نمونه ها باشد که همگی موجب تسریع پیری و نرم شدن بافت می شوند [۶، ۹].

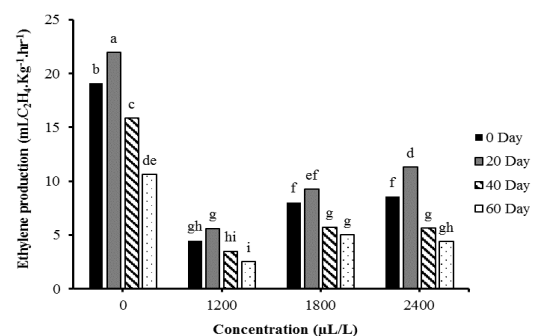


شکل (۳): تغییرات سفتی بافت نمونه ها طی ۶۰ روز نگهداری

همچنین می توان فرض کرد که اسانس دارچین با مهار مستقیم فعالیت آنزیم PG نقش مؤثری در کاهش نرم شدن بافت دارد، همان طور که اخیراً توسط لویز-گومز و همکاران [۵۴] گزارش



ب



شکل (۲): تغییرات میزان نرخ تنفس (الف) و تولید اتیلن (ب) در نمونه ها طی ۶۰ روز نگهداری

دنگ و همکاران [۴۹] شان دادند که پوشش های امولسیون حای نانوالیاف سلولزی بر روی موز سبب کاهش چشمگیر تولید هر دو گاز CO_2 و C_2H_4 نسبت به نمونه های بدون پوشش شدند و این کاهش باعث تأخیر در رسیدگی و پیری میوه طی دوره نگهداری گردید. در مطالعه ای جدیدتر، دنگ و همکاران [۲۷] اثر پوشش های کیتوزانی امولسیون پیکرینگ CNC بر نگهداری پس از برداشت میوه گلابی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تمام نمونه های پوشش دار میزان تولید C_2H_4 کمتری نسبت به نمونه شاهد داشتند و بهترین عملکرد مربوط به فرمولاسیون های حای CNC بود. نویسندگان این اثر را ناشی از افزایش آب گریزی پوشش های حای CNC دانستند.

۳-۳- سفتی بافت

بر اساس داده های ارائه شده در شکل (۳)، سختی بافت در طول زمان در هر دو گروه شامل نمونه های پوشش دار و نمونه های بدون پوشش کاهش یافته است. در مراحل اولیه، نرم شدن بافت می تواند ناشی از فعالیت آنزیمی در دیواره های سلولی میوه باشد که این روند تحت تأثیر تولید اتیلن نیز قرار دارد [۵۰]. دیواره های سلولی میوه عمدتاً از میکروفیبریل های سلولزی^۱ تشکیل شده اند که در ماتریکسی^۲ از

² Matrix

³ Hemicellulose

⁴ Pectin

⁵ Apoplasty

⁶ Depolymerization

⁷ Polygalacturonase

¹ Cellulose microfibrils

شرایط محیطی، SSC را در میوه‌های پوشش‌دار برای مدت طولانی‌تری نسبت به نمونه‌های بدون پوشش حفظ کند.

همان‌طور که در شکل ۴ ب نشان داده شده است، مقادیر TA در تمامی تیمارها طی دوره نگهداری کاهش یافت. در هر نقطه زمانی مورد ارزیابی، نمونه‌های دارای پوشش سطحی TA بالاتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند؛ این امر احتمالاً به دلیل کاهش نرخ تنفس در میوه‌های پوشش‌دار در مقایسه با نمونه‌های بدون پوشش است. با توجه به این‌که اسیدهای آلی، از جمله اسید مالیک، در واکنش‌های تنفسی به سرعت مصرف می‌شوند [۱۷، ۳۰، ۴۹، ۶۱]، سطوح TA رابطه معکوسی با شدت فرآیند تنفس و نوع پوشش داشتند؛ به‌گونه‌ای که پایین‌ترین مقادیر در نمونه‌های بدون پوشش و بالاترین مقادیر در تیمار C2400 مشاهده شد که با الگوی تنفسی نمایش داده شده در شکل ۴ ب همخوانی دارد.

کاهش تدریجی TA در طول زمان با روند تغییرات SSC طی دوره ۶۰ روزه و همچنین با تغییرات pH (شکل ۴ ج) هم‌راستا بود. این یافته‌ها با نتایج مطالعات قبلی در رابطه با اثر پوشش‌های مختلف روی سیب [۱۷، ۶۱]، توت‌فرنگی [۲۶، ۳۰]، گلابی [۲۷، ۲۸] و موز [۴۹] سازگار است. در این پژوهش‌ها گزارش شده است که مقدار SSC در نمونه‌های شاهد بالاتر از نمونه‌های پوشش‌دار بوده و افزایش SSC در طول دوره نگهداری با فرآیند هیدرولیز نشاسته به قند، کاهش وزن و حل شدن پکتین‌ها، پلی‌اورونیدها^۲ و همی‌سلولزهای دیواره سلولی مرتبط است. همچنین، این مطالعات کاهش TA را طی دوره نگهداری تأیید به‌طوری‌که میوه‌های پوشش‌دار مقادیر بالاتری از TA نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند؛ نتیجه‌ای که با مشاهدات این مطالعه همخوانی دارد.

مقادیر pH میوه‌ها در طول دوره نگهداری، بین نمونه‌های دارای پوشش و نمونه‌های کنترل تغییرات معناداری نشان داد ($p < 0.01$) (شکل ۴ ج). به‌طور خاص، نمونه‌های پوشش‌دار دارای مقادیر pH پایین‌تری نسبت به میوه‌های شاهد بودند، به‌گونه‌ای که کمترین pH در تیمار C2400 ثبت شد. نتایج مشابهی توسط جهان‌شاهی و همکاران [۱۷] گزارش شده است که در آن‌ها از پوشش صمغ کنیرای طبیعی روی سیب‌های رقم رد دلیشز^۳ استفاده گردید و اثر مثبت این پوشش در حفظ pH طی ۱۲۰ روز نگهداری سرد مورد تأیید قرار گرفت.

کرده‌اند. در میان تیمارها، نمونه C2400 با تفاوت جزئی، بالاترین میزان سفتی یافت را در ۴۰ و ۶۰ روز نخست نگهداری نشان داد.

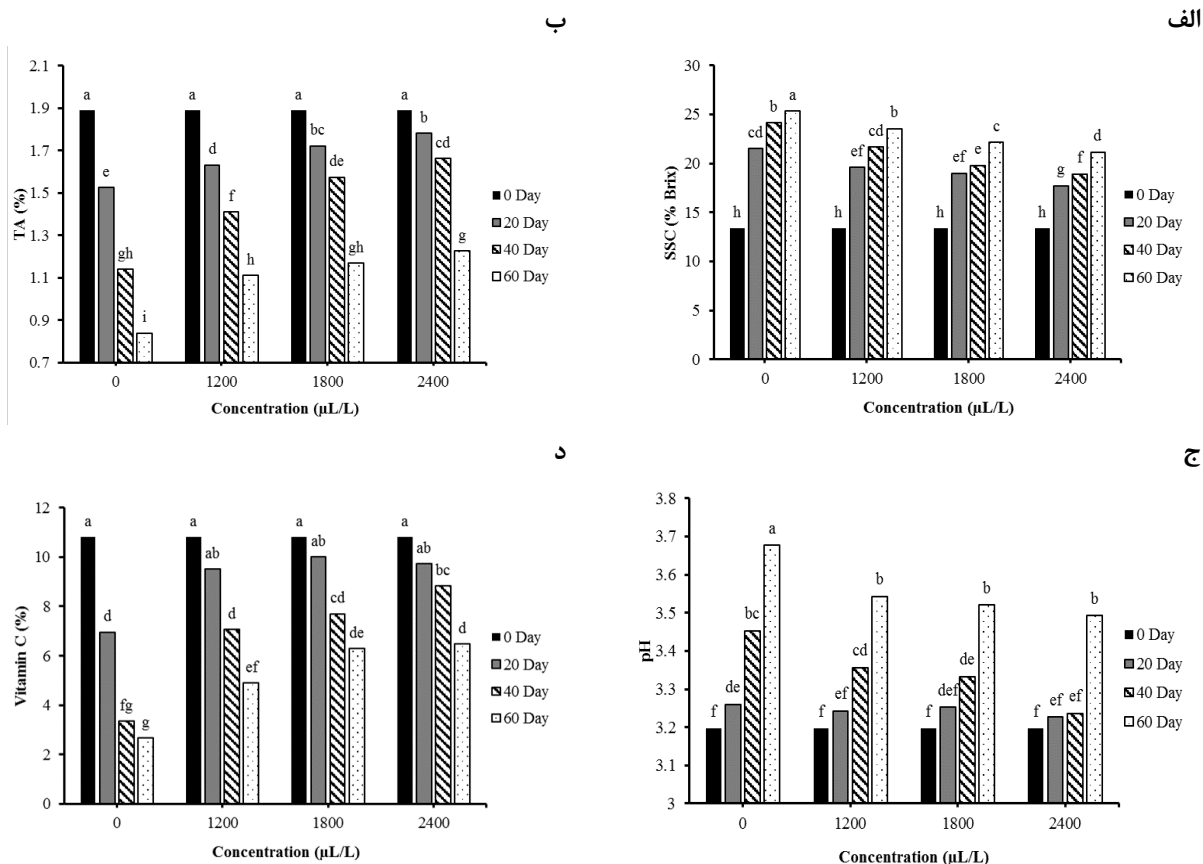
۳-۴- مواد جامد محلول کل (SSC)، اسیدیته قابل تیتراسیون (TA)، pH و آسکوربیک اسید

شکل (۴) مقادیر مواد جامد محلول کل (SSC)، اسیدیته قابل تیتراسیون (TA)، pH و آسکوربیک اسید را نشان می‌دهد. در تمامی تیمارها، مقدار SSC در طول دوره نگهداری نسبت به نمونه‌های شاهد در ابتدا به‌طور معناداری افزایش یافت ($p < 0.01$) (شکل ۴ الف). لازم به ذکر است که در تمام زمان‌های نمونه‌برداری، میزان SSC در نمونه‌های پوشش‌دار کمتر از نمونه‌های بدون پوشش بود. فرآیند تنفس به شدت به حضور بستر وابسته است؛ در بسیاری از بافت‌های گیاهی، این بستر به عنوان منبع ذخیره کربوهیدرات‌ها، به ویژه نشاسته، عمل می‌کند. این ترکیبات پیچیده در طی هیدرولیز^۱ به قندهای ساده تبدیل شده و در مسیر تنفس مورد استفاده قرار می‌گیرند تا انرژی مورد نیاز گیاه برای ادامه حیات تأمین شود. در این روند، میزان مصرف اکسیژن و آزاد شدن دی‌اکسیدکربن متغیر خواهد بود [۵۵]. با توجه به شروع هیدرولیز نشاسته در طول فرآیند رسیدن و نگهداری میوه‌ها [۵۶-۵۸]، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش مقادیر SSC در سیب‌های پوشش‌دار نسبت به نمونه‌های بدون پوشش، ناشی از کند شدن سرعت تنفس است؛ این نکته با نتایج شکل ۴ الف که کاهش قند کل در بافت میوه را نشان می‌دهد، هم‌خوانی دارد.

علاوه بر این، در درون هر گروه زمانی مشخص، مشاهده شد که با افزایش غلظت اسانس دارچین (CEO) در پوشش امولسیون، مقدار SSC کاهش می‌یابد. همان‌طور که تاندا-پالمو و گروسو [۵۹] گزارش کرده‌اند، این روند به این دلیل رخ می‌دهد که افزایش میزان افت وزن (WL) با افزایش SSC همبستگی دارد. یافته‌های ما نیز نشان داد که با افزایش غلظت اسانس دارچین، SSC کاهش می‌یابد (شکل ۴ الف) و بنابراین بیشترین مقدار SSC در نمونه شاهد ثبت شد. علاوه بر این، رابطه مستقیم میان SSC و WL می‌تواند به فعالیت‌های متابولیکی مرتبط با فرآیند رسیدن میوه مربوط باشد، به‌ویژه تبدیل نشاسته به قند و افزایش شیرینی در طول دوره نگهداری [۲۶، ۶۰]. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که استفاده از پوشش‌ها می‌تواند با کنترل تبادل گازی و حفاظت از میوه در برابر

² Polyuronids
³ Red Delicious

¹ Hydrolysis



شکل (۴): تغییرات میزان SSC (الف)، TA (ب)، pH (ج) و (د) ویتامین C (د) در نمونه‌ها طی ۶۰ روز نگهداری کرده‌اند.

۳-۵- فعالیت آنزیم‌های PPO و POD

فعالیت آنزیم‌های PPO و POD در تمام تیمارها در طول دوره ۶۰ روزه نگهداری افزایش پیدا کرد (شکل ۵ الف و ب). آنزیم PPO با استفاده از اکسیژن، ترکیبات فنولی موجود در میوه‌ها را اکسید کرده و کینون‌ها را تولید می‌کند؛ فرآیندی که در نهایت باعث تشکیل رنگدانه‌های قهوه‌ای می‌شود [۶۴-۶۶]. از سوی دیگر، آنزیم POD در واکنش‌های پراکسیداسیون، اکسیداسیون-کاتالیستی و هیدروکسیلاسیون^۲ نقش دارد و در فرآیندهای رسیدگی، پیری و تغییر رنگ بافت‌های گیاهی دخیل است [۶۷]. حساسیت میوه به قهوه‌ای شدن و میزان فعالیت این آنزیم‌ها می‌تواند بسته به رقم و شرایط مدیریتی پیش و پس از برداشت متفاوت باشد [۶۸].

اسید آسکوربیک به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان، در مهار قهوه‌ای شدن آنزیمی ناشی از فعالیت PPO نقش مؤثری دارد [۶۹]. [۷۰]. با توجه به کاهش میزان ویتامین C در نمونه‌های پوشش‌دار طی دوره نگهداری (شکل ۴ ج)، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فعالیت PPO ممکن است رخ داده باشد. این موضوع با این واقعیت

ویتامین C به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی کیفیت میوه‌ها شناخته می‌شود، زیرا به دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی خود نقش مهمی به‌عنوان ترکیب زیست‌فعال ایفا می‌کند [۶۲]. در این مطالعه، میزان ویتامین C در تمامی تیمارها طی ۶۰ روز کاهش قابل توجهی داشت ($p < 0.01$) (شکل ۴ د). با این حال، کاهش این ویتامین در نمونه‌های دارای پوشش با غلظت بالاتر اسانس CEO به‌صورت ملایم‌تری مشاهده شد. همچنین، از دست دادن آب نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش اسید آسکوربیک دارد، زیرا در این شرایط سرعت اکسایش^۱ افزایش می‌یابد [۵، ۶۳]؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که پوشش‌ها با محدود کردن نفوذ اکسیژن، فرآیند اکسیداسیون ویتامین C را کاهش داده و در نتیجه روند رسیدگی و پیری میوه را کند می‌کنند [۱۲]. این برداشت با نتایج آزرود و همکاران [۳۲] نیز تقویت می‌شود که در پژوهش خود بر روی میوه آسرولا با استفاده از پوشش‌های آلژینات تقویت‌شده با نانوسولوز کریستالی (CNC)، اثربخشی CNC را به‌عنوان مانعی در برابر نفوذ اکسیژن و کاهش نرخ اکسیداسیون اسید آسکوربیک اثبات کردند.

^۲ Hydroxylation

^۱ Oxidation

محیط، دسترسی به اکسیژن، نوع و میزان ترکیبات فنولی موجود و رقم گیاهی قرار دارد که می‌تواند علت نتایج متضاد ذکر شده باشد [۷۰، ۶۶].

روندی تقریباً مشابه در مورد آنزیم پراکسیداز (POD) نیز مشاهده شد؛ به طوری که در تمام تیمارها و در طول دوره نگهداری، پوشش‌ها باعث تأخیر در واکنش‌های رسیدگی و تیره شدن سیب شدند (شکل ۵ ب). با این حال، واضح است که فعالیت آنزیم POD، به ویژه پس از ۶۰ روز، نسبت به PPO نرخ واکنش بالاتری نشان داد. علاوه بر این، افزایش غلظت اسانس دارچین به عنوان یک ترکیب آنتی‌اکسیدانی موجب کاهش قابل توجه فعالیت POD شد (شکل ۵ ب)، به طوری که بیشترین اثرگذاری در غلظت C2400 مشاهده گردید و حداقل میزان فعالیت آنزیمی را ارائه داد. نتایج مشابهی نیز توسط اوتمن [۷۰] در خصوص فعالیت آنزیم POD در میوه‌های مختلف (آناناس، انبه و پاپایا) در طول فرآیند رسیدگی گزارش شده است.

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که استفاده از پوشش امولسیون BCNCs-GelA/CEO نقش مؤثری در ارتقای کیفیت پس از برداشت سیب رقم «گلدن دلشیز» در شرایط نگهداری سرد ایفا می‌کند. به طور ویژه، این پوشش توانست سرعت فرآیند رسیدگی و پیری میوه را کاهش دهد، موضوعی که از طریق بررسی‌های بیوشیمیایی، فیزیکی و مکانیکی تأیید شد. علاوه بر این، کاهش تبخیر و تعرق میوه در حضور این پوشش، روند رسیدگی را کندتر کرده و باعث افزایش طول عمر مفید میوه گردید.

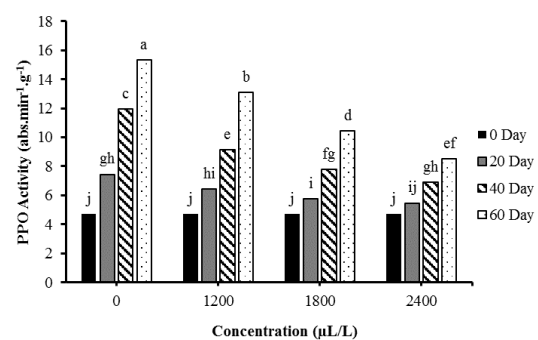
با توجه به سادگی فرآیند تهیه و اثربخشی بالای پوشش BCNCs-GelA/CEO، می‌توان آن را به عنوان گزینه‌ای عملی و کارآمد برای استفاده صنعتی در نگهداری میوه‌های تازه پیشنهاد کرد تا قابلیت ماندگاری پس از برداشت در طول دوره‌های ذخیره‌سازی سرد بهبود یابد.

۵- مراجع

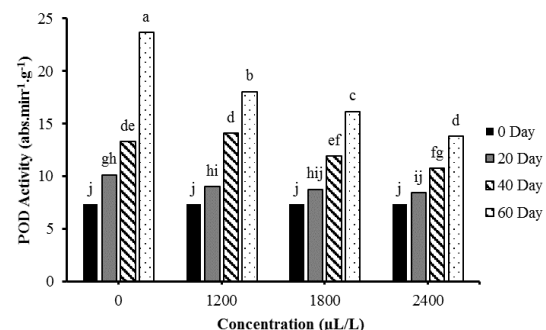
- [1] L. Z. Wang, L. Liu, J. Holmes, J. F. Kerry, and J. P. Kerry, "Assessment of film-forming potential and properties of protein and polysaccharide-based biopolymer films," *Int J Food Sci Technol*, vol. 42, no. 9, pp. 1128-1138, 2007. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01440.x>
- [2] A. Mditshwa, O. A. Fawole, and U. L. Opara, "Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples—A review," *Food Packag Shelf life*, vol. 16, pp. 59-68, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.01.011>
- [3] D. Prusky, "Reduction of the incidence of postharvest quality losses, and future prospects," *Food Secur*, vol. 3, no. 4, pp. 463-474, 2011. doi: <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0147-y>

پشتیبانی می‌شود که توانایی اسید آسکوربیک در مهار PPO تا حد زیادی به غلظت آن وابسته است و در سطوح پایین، اثر بازدارندگی آن محدود خواهد بود [۷۰]. بررسی شدت فعالیت PPO در تیمارها نشان داد که افزایش غلظت اسانس دارچین (CEO) در پوشش‌ها، به طور معناداری ($p < 0.01$) موجب کاهش فعالیت این آنزیم شد. این اثر می‌تواند ناشی از ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی CEO و حضور ترکیبات فنولی و پلی‌فنولی آن باشد. به ویژه، سینام‌آلدئید^۱ که ترکیب شاخص CEO محسوب می‌شود، تأثیر چشمگیری در مهار فعالیت آنزیمی دارد [۵۴، ۶۹].

الف



ب



شکل (۵): تغییرات میزان فعالیت آنزیم‌های پلی‌فنل اکسیداز (PPO) (الف) و پراکسیداز (POD) (ب) در نمونه‌ها طی ۶۰ روز نگهداری

نتایج به دست آمده با یافته‌های پژوهش عشقی و همکاران [۶۳] که از پوشش نانوکیتوسان^۲ بارگذاری شده با مس بر روی توت‌فرنگی تازه بهره گرفتند و همچنین پژوهش کن و همکاران [۷۱] که اثر بازدارندگی آسکوربیک اسید بر فعالیت PPO در سیب را بررسی کردند، همسو است. با وجود این، برخی مطالعات نتایج متناقضی ارائه کرده‌اند؛ از جمله تحقیق اوتمن که افزایش فعالیت PPO را طی ۸ روز نگهداری در میوه‌های آناناس، انبه و پاپایا^۳ گزارش کرده است. شایان ذکر است که فعالیت PPO تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند دما، pH

¹ Cinnamaldehyde

² Nanochitosan

³ Papaya

- [19] M. S. Razavi, A. Golmohammadi, A. Nematollahzadeh, F. Fiori, C. Rovera, and S. Farris, "Preparation of cinnamon essential oil emulsion by bacterial cellulose nanocrystals and fish gelatin," *Food Hydrocoll*, vol. 109, p. 106111, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106111>
- [20] M. S. Razavi, A. Golmohammadi, A. Nematollahzadeh, C. Rovera, and S. Farris, "Cinnamon essential oil encapsulated into a fish gelatin-bacterial cellulose nanocrystals complex and active films thereof," *Food Biophys*, vol. 17, no. 1, pp. 38-46, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s11483-021-09696-6>
- [21] A. Golmohammadi, M. S. Razavi, M. Tahmasebi, D. Carullo, and S. Farris, "Cinnamon essential-oil-loaded fish gelatin-cellulose nanocrystal films prepared under acidic conditions," *Coatings*, vol. 13, no. 8, p. 1360, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13081360>
- [22] A. Golmohammadi, M. Tahmasebi, M. S. Razavi, V. Neysari-Fam, D. Carullo, and S. Farris, "Improved post-harvest preservation effects of mushroom (*Agaricus bisporus*) using bacterial cellulose nanocrystals-gelatin/cinnamon essential oil emulsion coatings," *Int J Food Sci Technol*, vol. 59, no. 10, pp. 7528-7540, 2024. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.17518>
- [23] R. Akbari, J. Tarighi, M. S. Razavi, M. Tahmasebi, D. Carullo, and S. Farris, "Extending the shelf-life of nectarines through fish gelatin/cellulose nanocrystals/cinnamon essential oil-based edible coatings," *Coatings*, vol. 14, no. 6, p. 736, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/coatings14060736>
- [24] M. Sadat Razavi et al., "Impact of bacterial cellulose nanocrystals-gelatin/cinnamon essential oil emulsion coatings on the quality attributes of 'red delicious' apples," *Coatings*, vol. 12, no. 6, p. 741, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12060741>
- [25] J. Jung, Z. Deng, and Y. Zhao, "Mechanisms and performance of cellulose nanocrystals Pickering emulsion chitosan coatings for reducing ethylene production and physiological disorders in postharvest 'Bartlett' pears (*Pyrus communis* L.) during cold storage," *Food chem*, vol. 309, p. 125693, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125693>
- [26] I. S. Vieira da Silva et al., "Edible coatings based on apple pectin, cellulose nanocrystals, and essential oil of lemongrass: improving the quality and shelf life of strawberries (*Fragaria Ananassa*)," *J Renew Mater*, vol. 7, no. 1, pp. 73-87, 2019. doi: <https://doi.org/10.32604/jrm.2019.00042>
- [27] Z. Deng, J. Jung, J. Simonsen, and Y. Zhao, "Cellulose nanocrystals Pickering emulsion incorporated chitosan coatings for improving storability of postharvest Bartlett pears (*Pyrus communis*) during long-term cold storage," *Food Hydrocoll*, vol. 84, pp. 229-237, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.06.012>
- [28] Z. Deng, J. Jung, J. Simonsen, Y. Wang, and Y. Zhao, "Cellulose nanocrystal reinforced chitosan coatings for improving the storability of postharvest pears under both ambient and cold storages," *J Food Sci*, vol. 82, no. 2, pp. 453-462, 2017. doi: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13601>
- [29] F. Fakhouri et al., "Effect of a gelatin-based edible coating containing cellulose nanocrystals (CNC) on the quality and nutrient retention of fresh strawberries during storage," in *IOP Conf. Ser: Mater Sci Eng*, 2014, vol. 64, no. 1: IOP Publishing, p. 012024, 2014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/64/1/012024>
- [30] F. Dong, S. Li, Z. Liu, K. Zhu, X. Wang, and C. Jin, "Improvement of quality and shelf life of strawberry with nanocellulose/chitosan composite coatings," *Bangladesh J Bot*, vol. 44, no. 5, pp. 709-717, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.008>
- [31] J. Tarighi, M. Tahmasebi, and M. S. Razavi, "Impact of Bacterial Cellulose Nanocrystals-Gelatin/Cinnamon Essential Oil Emulsion Coatings on the Mechanical Properties of Red Gold Nectarine Fruit during Shelf Life," *Packag Sci Art*, vol. 14, no. 56, pp. 23-30, 2024. (In Persian)
- [32] H. M. Azeredo, K. W. Miranda, H. L. Ribeiro, M. F. Rosa, and D. M. Nascimento, "Nanoreinforced alginate-acerola puree coatings on acerola fruits," *J food eng*, vol. 113, no. 4, pp. 505-510, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.006>
- [4] A. S. K. Gardesh, F. Badii, M. Hashemi, A. Y. Ardakani, N. Maftoonazad, and A. M. Gorji, "Effect of nanochitosan based coating on climacteric behavior and postharvest shelf-life extension of apple cv. Golab Kohanz," *LWT- Food Sci. Technol*, vol. 70, pp. 33-40, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.02.002>
- [5] N. Maftoonazad and H. Ramaswamy, "Postharvest shelf-life extension of avocados using methyl cellulose-based coating," *LWT- Food Sci Technol*, vol. 38, no. 6, pp. 617-624, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.08.007>
- [6] M. Sapper, L. Palou, M. B. Pérez-Gago, and A. Chiralt, "Antifungal starch-gellan edible coatings with thyme essential oil for the postharvest preservation of apple and persimmon," *Coatings*, vol. 9, no. 5, p. 333, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/coatings9050333>
- [7] K. Ncama, L. S. Magwaza, A. Mditshwa, and S. Z. Tesfay, "Plant-based edible coatings for managing postharvest quality of fresh horticultural produce: A review," *Food Packag Shelf life*, vol. 16, pp. 157-167, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.03.011>
- [8] L. Salvia-Trujillo, M. A. Rojas-Graü, R. Soliva-Fortuny, and O. Martín-Belloso, "Use of antimicrobial nanoemulsions as edible coatings: Impact on safety and quality attributes of fresh-cut Fuji apples," *Postharvest Biol Technol*, vol. 105, pp. 8-16, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.03.009>
- [9] M. Sapper, M. E. Martin-Esparza, A. Chiralt, and C. Gonzalez Martinez, "Antifungal polyvinyl alcohol coatings incorporating carvacrol for the postharvest preservation of golden delicious apple," *Coatings*, vol. 10, no. 11, p. 1027, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/coatings10111027>
- [10] U. Ali, S. Basu, and K. Mazumder, "Improved postharvest quality of apple (Rich Red) by composite coating based on arabinoxylan and β -glucan stearic acid ester," *Int J Biol Macromol*, vol. 151, pp. 618-627, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.081>
- [11] U. Ali, S. Kanwar, K. Yadav, S. Basu, and K. Mazumder, "Effect of arabinoxylan and β -glucan stearic acid ester coatings on post-harvest quality of apple (Royal Delicious)," *Carbohydr Polym*, vol. 209, pp. 338-349, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.002>
- [12] E. d. O. A. Sena et al., "Calcium application via hydrocooling and edible coating for the conservation and quality of cashew apples," *Sci Hortic*, vol. 256, p. 108531, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.058>
- [13] F. Rashid, Z. Ahmed, K. Ameer, R. M. Amir, and M. Khattak, "Optimization of polysaccharides-based nanoemulsion using response surface methodology and application to improve postharvest storage of apple (*Malus domestica*)," *J Food Meas Charact*, vol. 14, no. 5, pp. 2676-2688, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00514-0>
- [14] W. Zhang, X. Li, and W. Jiang, "Development of antioxidant chitosan film with banana peels extract and its application as coating in maintaining the storage quality of apple," *Int J Biol Macromol*, vol. 154, pp. 1205-1214, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.275>
- [15] R. Thakur, P. Pristijono, C. J. Scarlett, M. Bowyer, S. Singh, and Q. V. Vuong, "Starch-based edible coating formulation: Optimization and its application to improve the postharvest quality of 'Cripps pink' apple under different temperature regimes," *Food Packag Shelf life*, vol. 22, p. 100409, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100409>
- [16] S. Madanipour et al., "Influence of postharvest application of chitosan combined with ethanolic extract of liquorice on shelflife of apple fruit," *J Environ Health Sci Eng*, vol. 17, no. 1, pp. 331-336, 2019. doi: <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00351-4>
- [17] B. Jahanshahi, A. Jafari, M. R. Vazifeshenas, and J. Gholamnejad, "A novel edible coating for apple fruits," *J Hortic Postharvest Res*, vol. 1, no. 1, pp. 63-72, 2018. doi: <https://doi.org/10.22077/jhpr.2018.1186.1009>
- [18] I. Khalifa, H. Barakat, H. A. El-Mansy, and S. A. Soliman, "Preserving apple (*Malus domestica* var. Anna) fruit bioactive substances using olive wastes extract-chitosan film coating," *Inf Process Agric*, vol. 4, no. 1, pp. 90-99, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.11.001>

- [49] Z. Deng, J. Jung, J. Simonsen, and Y. Zhao, "Cellulose nanomaterials emulsion coatings for controlling physiological activity, modifying surface morphology, and enhancing storability of postharvest bananas (*Musa acuminata*)," *Food chem*, vol. 232, pp. 359-368, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.028>
- [50] D. Valero et al., "Effects of alginate edible coating on preserving fruit quality in four plum cultivars during postharvest storage," *Postharvest Biol Technol*, vol. 77, pp. 1-6, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.10.011>
- [51] D. J. Cosgrove, "Expansive growth of plant cell walls," *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 38, no. 1-2, pp. 109-124, 2000. doi: [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(00\)00164-9](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(00)00164-9)
- [52] D. A. Brummell and M. H. Harpster, "Cell wall metabolism in fruit softening and quality and its manipulation in transgenic plants," *Plant mol biol*, vol. 47, no. 1, pp. 311-339, 2001. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1010656104304>
- [53] P. Dabesor, D. Sanni, A. Kolawole, V. Enujiugha, O. Lawal, and A. Edeh, "Changes in physicochemical properties and enzymes associated with ripening of snake tomato (*Trichosanthes Cucumerina* L.) fruit," *Biocatal Agric Biotechnol*, vol. 40, p. 102313, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102313>
- [54] A. López-Gómez, A. Navarro-Martínez, and G. B. Martínez-Hernández, "Active paper sheets including nanoencapsulated essential oils: A green packaging technique to control ethylene production and maintain quality in fresh horticultural products—A case study on flat peaches," *Foods*, vol. 9, no. 12, p. 1904, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/foods9121904>
- [55] S. Bodbodak and Z. Raffee, "Recent trends in active packaging in fruits and vegetables," in *Eco-friendly technology for postharvest produce quality*: Elsevier, 2016, pp. 77-125. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804313-4.00003-7>
- [56] Y. Ahlwat and T. Liu, "Varied expression of senescence-associated and ethylene-related genes during postharvest storage of brassica vegetables," *Int J Mol Sci*, vol. 22, no. 2, p. 839, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms22020839>
- [57] C. B. Watkins, "Principles and practices of postharvest handling and stress," in *Apples: Botany, production and uses*: CABI Publishing Wallingford UK, 2003, pp. 585-614. doi: <https://doi.org/10.1079/9780851995922.0585>
- [58] M. Thammawong and O. Arakawa, "Starch to sugar conversion in 'Tsugaru' apples under ethylene and 1-methylcyclopropene treatments," *J Agric Sci Technol*, vol. 12, no. 5, pp. 617-626, 2010. doi: <https://doi.org/10.1180/7073.2010.12.5.12.6>
- [59] P. S. Tanada-Palmu and C. R. Grosso, "Effect of edible wheat gluten-based films and coatings on refrigerated strawberry (*Fragaria ananassa*) quality," *Postharvest Biol Technol*, vol. 36, no. 2, pp. 199-208, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.12.003>
- [60] M. Z. Treviño-Garza, S. García, M. del Socorro Flores-González, and K. Arévalo-Niño, "Edible active coatings based on pectin, pullulan, and chitosan increase quality and shelf life of strawberries (*Fragaria ananassa*)," *J Food Sci*, vol. 80, no. 8, pp. M1823-M1830, 2015. doi: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12938>
- [61] F. D. Conforti and J. A. Totty, "Effect of three lipid/hydrocolloid coatings on shelf life stability of Golden Delicious apples," *Int J Food Sci Technol*, vol. 42, no. 9, pp. 1101-1106, 2007. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01365.x>
- [62] D. Sumedrea et al., "Influence of different storage methods on apples chemical properties," *Agric Life—Life Agric, Buchar*, vol. 1, no. 1, pp. 316-321, 2018. doi: https://doi.org/10.2478/alife-2018-0047?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26medium%3Darticle
- [63] S. Eshghi, M. Hashemi, A. Mohammadi, F. Badii, Z. Mohammadhoseini, and K. Ahmadi, "Effect of nanochitosan-based coating with and without copper loaded on physicochemical and bioactive components of fresh strawberry fruit (*Fragaria x ananassa*) during storage," *Food bioprocess technol*, vol. 7, no. 8, pp. 2397-2409, 2014. doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1281-2>
- [64] E. Aslmoshtaghi and A. Shahsavari, "Peroxidase, polyphenol oxidase and protein changes in olives during adventitious root
- [33] J. Ebrahimpour Kasmani, A. Samariha, and A. Alizadeh, "Comparison of the effect of nanocellulose and nanosilica on the properties of packaging cardboard made from waste white pulp," *Packag Sci Art*, vol. 15, no. 58, pp. 37-46, 2024. (In Persian)
- [34] M. S. Razavi and M. Tahmasebi, "A Review of Pickering Emulsions Stabilized with Cellulose and Bacterial Nanocellulose and Their Applications in Food Packaging," *Packag Sci Art*, vol. 14, no. 53, pp. 35-51, 2023. (In Persian)
- [35] D. Hoseinzade and A. Mehregan Nikoo, "Biodegradable films from bacterial cellulose: a Review," *Scientific Journal of Packag Sci Art*, vol. 15, no. 1, pp. 51-60, 2024. (In Persian)
- [36] J. Jung, Z. Deng, and Y. Zhao, "A review of cellulose nanomaterials incorporated fruit coatings with improved barrier property and stability: Principles and applications," *J Food Process Eng*, vol. 43, no. 2, p. e13344, 2020. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13344>
- [37] C. Rovera et al., "Enzymatic hydrolysis in the green production of bacterial cellulose nanocrystals," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 6, no. 6, pp. 7725-7734, 2018. doi: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsschemeng.8b00600>
- [38] AOAC, "Official Methods of Analysis of AOAC International," *The Association Official Analytical Chemistry*, vol. 18th ed, 2006. Arelington, VA, USA.
- [39] V. NeysariFam et al., "Effect of potato starch/guar gum/nanoclay/needle pine leaf essential oil packaging films on button mushroom postharvest quality," *Food Bioprocess Technol*, vol. 18, no. 5, pp. 4358-4369, 2025. doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03712-6>
- [40] M. S. Razavi et al., "Impact of Bacterial Cellulose Nanocrystals-Gelatin/Cinnamon Essential Oil Emulsion Coatings on the Quality Attributes of 'Red Delicious' Apples," *Coatings*, vol. 12, no. 6, p. 741, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12060741>
- [41] R. Mendoza, D. A. Castellanos, J. C. García, J. C. Vargas, and A. O. Herrera, "Ethylene production, respiration and gas exchange modelling in modified atmosphere packaging for banana fruits," *Int J Food Sci Technol*, vol. 51, no. 3, pp. 777-788, 2016. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13037>
- [42] M. S. Razavi, V. R. Sharabiani, M. Tahmasebi, S. Grassi, and M. Szymanek, "Chemometric and meta-heuristic algorithms to find optimal wavelengths and predict 'Red Delicious' apples traits using Vis-NIR," *Appl Food Res*, vol. 5, no. 1, p. 100853, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100853>
- [43] G. D. Sadler and P. A. Murphy, "pH and titratable acidity," in *Food analysis*: Springer, 2010, pp. 219-238.
- [44] M. Latifi Amoghini et al., "VIS/NIR spectroscopy as a non-destructive method for evaluation of quality parameters of three bell pepper varieties based on soft computing methods," *Appl Sci*, vol. 14, no. 23, p. 10855, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/app142310855>
- [45] V. NeysariFam et al., "Preservation of button mushrooms using modified atmosphere and bio-nanocomposite film: A combined approach," *Appl Food Res*, p. 101043, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101043>
- [46] M. S. Razavi, V. R. Sharabiani, M. Tahmasebi, and M. Szymanek, "Unveiling the fingerprint of apple browning: A Vis/NIR-metaheuristic approach for rapid polyphenol oxidase and peroxidases activities detection in red delicious apples," *J Food Compos Anal*, vol. 142, p. 107499, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107499>
- [47] M. L. Amoghini, Y. Abbaspour-Gilandeh, M. Tahmasebi, and J. I. Arribas, "Automatic non-destructive estimation of polyphenol oxidase and peroxidase enzyme activity levels in three bell pepper varieties by Vis/NIR spectroscopy imaging data based on machine learning methods," *Chemom Intell Lab Syst*, vol. 250, p. 105137, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2024.105137>
- [48] S. Mangaraj, M. Sadawarti, and S. Prasad, "Assessment of quality of pears stored in laminated modified atmosphere packages," *Int J Food Prop*, vol. 14, no. 5, pp. 1110-1123, 2011. doi: <https://doi.org/10.1080/10942910903582559>

- [69] L. Buendía et al., "Active cardboard box with a coating including essential oils entrapped within cyclodextrins and/or halloysite nanotubes. A case study for fresh tomato storage," *Food Control*, vol. 107, p. 106763, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106763>
- [70] O. C. Othman, "Polyphenoloxidase and peroxidase activity during open air ripening storage of pineapple (*Ananas comosus* L.), mango (*Mangifera indica*) and papaya (*Carica papaya*) fruits grown in Dar es Salaam, Tanzania," *Tanzania J Sci*, vol. 38, no. 3, pp. 84-94, 2012.
- [71] Z. Can, B. Dincer, H. Sahin, N. Baltas, O. Yildiz, and S. Kolayli, "Polyphenol oxidase activity and antioxidant properties of Yomra apple (*Malus communis* L.) from Turkey," *J enzyme inhib med chem*, vol. 29, no. 6, pp. 829-835, 2014. doi: <https://doi.org/10.3109/14756366.2013.858144>
- formation," *Trakia J Sci*, vol. 14, no. 2, pp. 176-182, 2016. doi: <https://10.15547/tjs.2016.02.010>
- [65] C. E. Deutch, "Browning in apples: Exploring the biochemical basis of an easily-observable phenotype," *Biochem Mol Biol Educ*, vol. 46, no. 1, pp. 76-82, 2018. doi: <https://doi.org/10.1002/bmb.21083>
- [66] O. Hutabarat and H. Halbwirth, "Polyphenol oxidase and peroxidase activity in apple: dependency on cultivar and fruit processing," in *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2019, vol. 355, no. 1: IOP Publishing, p. 012106. doi: <https://10.1088/1755-1315/355/1/012106>
- [67] F. Minibayeva, R. P. Beckett, and I. Kranter, "Roles of apoplastic peroxidases in plant response to wounding," *Phytochemistry*, vol. 112, pp. 122-129, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.06.008>
- [68] K. S. Fonseca et al., "Baby cassava: an alternative marketing strategy for freshly cut cassava," in *Cassava: Intech Open*, 2017. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.70902>