

بهبود کیفیت و ماندگاری میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر با استفاده از نانومولسیون حاوی

موسیلاژ اسفرزه (*Plantago psyllium*) و اسانس مرزنجوش (*Origanum vulgare*)

چکیده

گوجه‌فرنگی گیلاسی (*Solanum lycopersicum* cv. Azar) به‌دلیل اندازه کوچک، طعم مطلوب و ارزش غذایی بالا از جمله ویتامین C، از اهمیت اقتصادی و تغذیه‌ای بالایی برخوردار است. این میوه به‌دلیل فساد میکروبی عمر کوتاهی دارد. در این راستا، بهره‌گیری از پوشش‌های خوراکی، ترکیبات ضد میکروبی طبیعی و فناوری نانومولسیون‌ها می‌تواند رویکردی مؤثر برای حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری این محصول محسوب شود. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر موسیلاژ اسفرزه، اسانس مرزنجوش و نانومولسیون حاوی این دو ترکیب بر ویژگی‌های فیزیکی‌وشیمیایی، میکروبی و حسی گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر انجام شد. این آزمایش در قالب طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به مدت ۲۸ روز نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد اجرا گردید. نتایج نشان داد اسانس مرزنجوش عمدتاً از ترکیبات مونوترپنی (۶۷/۵٪) مانند گاما-ترپینن (۲۴٪/۲)، -سیمن (۲۰٪/۱) و کارواکرول (۱۶٪/۹) تشکیل شد. نانومولسیون حاوی موسیلاژ اسفرزه و اسانس مرزنجوش با اندازه ذرات ۲۱۹/۳ نانومتر، پتانسیل زتای ۴۰/۵- میلی‌ولت و شاخص پراکندگی ۰/۱۸۴، پایداری بالایی را نشان داد. این تیمار به‌طور معنی‌داری، کمترین کاهش وزن (۷۸٪/۳) و بالاترین میزان آب میوه (۷۶٪)، کمترین چگالی آب میوه (۷۷/۶٪)، کمترین نشت الکترولیت و بار میکروبی را در مقایسه با گروه شاهد از خود نشان داد. علاوه‌براین، میزان ویتامین C (۴/۱۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، اسیدیته (۰/۶۱ درصد) و سفتی را حفظ نمود و در پایان دوره نگهداری کیفیت حسی برتری داشت. این اثرات مطلوب به دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی قوی اسانس مرزنجوش و همچنین نقش موسیلاژ اسفرزه در ایجاد یک لایه محافظ نیمه‌تراوا روی میوه بود که باعث کاهش تنفس، تبخیر آب و فعالیت عوامل میکروبی گردید. در مجموع، استفاده از نانومولسیون موسیلاژ اسفرزه حاوی اسانس مرزنجوش به‌عنوان یک پوشش طبیعی مؤثر، برای افزایش عمر انباری و حفظ کیفیت گوجه‌فرنگی گیلاسی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: عمر انباری، فسادپذیری، کیفیت پس از برداشت، نشت الکترولیت، ویتامین ث

مقدمه

میوه‌ها و سبزی‌ها تازه، به دلیل ارزش غذایی بالا و وجود ترکیبات فیتوشیمیایی، ویتامین‌ها و مواد معدنی، نقش حیاتی در رژیم غذایی و سلامت انسان ایفا می‌کنند. مصرف حداقل ۴۰۰ گرم از این محصولات به صورت روزانه، توسط سازمان جهانی بهداشت برای پیشگیری از بیماری‌های مزمن توصیه شده است. با این حال، ماهیت فسادپذیر این محصولات به دلیل رطوبت بالا و فعالیت‌های بیولوژیکی، آن‌ها را در برابر عوامل مختلفی همچون آسیب‌های مکانیکی، نوسانات دما و رشد میکروارگانیسم‌ها آسیب‌پذیر می‌سازد. این عوامل به طور مستقیم بر کیفیت و عمر پس از برداشت محصولات تأثیر گذاشته و منجر به ضایعات پس از برداشت (۲۰ تا ۴۰٪) می‌شوند که بخش عمده‌ای از تلفات محصولات کشاورزی در جهان را تشکیل می‌دهد (Umcohia & Olapade, 2024). گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.) به عنوان یکی از مهم‌ترین سبزیجات در سطح جهان و منبع غنی آنتی‌اکسیدان‌ها، از این قاعده مستثنی نیست و به دلیل ماهیت فرازگرا، عمر پس از برداشت کوتاهی دارد. کنترل عوامل پوسیدگی ناشی از قارچ‌هایی نظیر *Rhizopus nigricans*, *Alternaria alternata* و *Penicillium digitatum* که به طور مستقیم بر کیفیت، استحکام و سفتی میوه تأثیر می‌گذارند، از مهم‌ترین اهداف در مدیریت پس از برداشت است (Abdel-Rahman et al., 2020).

در پاسخ به مشکلات بهداشتی و زیست‌محیطی ناشی از استفاده گسترده از قارچ‌کش‌های شیمیایی، رویکردهای جایگزین و دوست‌دار محیط زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند. اسانس‌های گیاهی به عنوان متابولیت‌های ثانویه و ترکیبات معطر، از پتانسیل بالایی برای کنترل پاتوژن‌های پس از برداشت برخوردارند. این ترکیبات، به دلیل خواص ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی قوی، می‌توانند به عنوان نگهدارنده‌های طبیعی عمل کرده و عمر ماندگاری محصولات را افزایش دهند. با این حال، استفاده مستقیم از اسانس‌ها با محدودیت‌هایی همچون فرارپذیری بالا، ناپایداری در برابر نور و حرارت و تأثیر نامطلوب بر خواص ارگانولپتیک محصولات همراه است که کارایی آن‌ها را کاهش می‌دهد و استفاده در مقیاس صنعتی را دشوار می‌سازد (Yang et al., 2023).

اسانس گیاه مرزنجوش، به ویژه به دلیل ترکیبات فنلی خود مانند کارواکرول، خواص ضدقارچی و آنتی‌اکسیدانی قوی که از خود نشان می‌دهد، تحقیقات نشان می‌دهند که این اسانس می‌تواند به عنوان یک نگهدارنده طبیعی در کاربردهای پس از برداشت عمل کند و به طور قابل توجهی پوسیدگی را در میوه‌هایی مانند گیلان و شلیل کاهش دهد (Paudel et al., 2022). این اسانس با کند کردن فرآیند رسیدن و حفظ ویژگی‌های کیفی مانند سفتی، اسیدیته و محتوای آنتی‌اکسیدانی، به افزایش ماندگاری میوه در طول نگهداری کمک می‌کند. فعالیت ضدقارچی اسانس مرزنجوش به خصوص در برابر پاتوژن‌های مختلفی که عامل پوسیدگی میوه‌ها هستند، مؤثر است. مطالعات نشان داده‌اند که این اسانس می‌تواند رشد قارچ‌هایی مانند *Candida albicans* و *Aspergillus niger* را مهار کند، که این امر آن را به جایگزینی مناسب و سازگار با محیط زیست برای مواد نگهدارنده شیمیایی مضر تبدیل می‌سازد. علاوه بر این، خواص آنتی‌اکسیدانی آن نیز با جلوگیری از آسیب‌های اکسیداتیو، به حفظ کیفیت میوه‌ها کمک می‌کند (Kaskatepe et al., 2022).

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، فناوری نانوکپسوله کردن به عنوان یک راهکار نوین و مؤثر مطرح شده است. نانوکپسوله کردن فرآیندی است که در آن مواد فعال (مانند اسانس) در ابعاد نانومتری درون یک ماده پوشش‌دهنده محصور می‌شوند. این فناوری مزایای متعددی دارد،

از جمله افزایش پایداری اسانس در برابر عوامل محیطی، کنترل رهایش تدریجی و افزایش اثربخشی آن در طولانی مدت، بهبود پراکندگی در محیط‌های آبی، و به حداقل رساندن تأثیر بر طعم و بوی محصول. در این میان، نانوامولسیون‌ها به عنوان نوعی از نانوکپسول‌ها، با ساختاری متشکل از قطرات ریز اسانس در محیط آبی، پایداری بالا و کارایی چشمگیری در کنترل عوامل بیماری‌زا دارند (Duong et al., 2024).

پژوهش‌های حاضر با هدف بهبود کارایی اسانس مرزنجوش و رفع ناپایداری آن در شرایط نامساعد با استفاده از تکنیک نانوامولسیون به همراه ماده محصور کننده‌ای بنام موسیلاژ اسفرزه به منظور کنترل عوامل بیماری‌زای قارچی و حفظ کیفیت محصولات فسادپذیر باغبانی مانند گوجه‌فرنگی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور ارزیابی تأثیر موسیلاژ اسفرزه، اسانس مرزنجوش و نانوامولسیون حاوی موسیلاژ اسفرزه و اسانس مرزنجوش بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و افزایش ماندگاری گوجه فرنگی گیلاسی رقم آذر در دما ۴ درجه سانتی‌گراد در آزمایشگاه علوم باغبانی دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد.

۱- موسیلاژ اسفرزه

بذور اسفرزه (*Plantago psyllium*) از عطاری خریداری شد. برای استخراج موسیلاژ از دانه‌ی اسفرزه، از روش امیری عقدایی و همکاران (Amiri Aghdaei et al., 2012) با اندکی تغییرات استفاده شد. ابتدا ناخالصی‌های دانه‌ی اسفرزه شامل سنگ، برگ و شاخه جدا شدند. سپس، ۱۰۰ گرم از دانه‌ی اسفرزه با استفاده از آسیاب آزمایشگاهی (مدل) آسیاب و با الک مش ۳۰، پوسته از مغز دانه جدا گردید. پوسته‌ی حاصل با نسبت ۱ به ۵۰ با آب مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار داده شد تا پوسته‌ها به خوبی آب جذب کرده و متورم شوند. مخلوط حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ (مدل) شد. ناخالصی‌ها و بقایای دانه از ژل جدا شدند.

۲- اسانس مرزنجوش

اسانس مرزنجوش از شرکت زردبند خریداری شد. برای شناسایی و آنالیز کمی و کیفی اسانس، ابتدا آن با هگزان نرمال به نسبت ۱:۱۰ رقیق شد. این محلول رقیق شده سپس به دستگاه کروماتوگراف گازی-اسپکترومتر جرمی (GC-MS) تزریق شد تا ترکیبات سازنده آن جداسازی و طیف‌های جرمی و کروماتوگرام‌ها به دست آیند. شناسایی کمی و کیفی ترکیبات اسانس بر اساس زمان بازداری، شاخص بازداری کوانتس، بررسی طیف‌های جرمی و مقایسه با ترکیبات استاندارد و منابع معتبر (Adams, 2007) صورت گرفت. شرایط دقیق دستگاه GC-MS در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات دستگاه GC-MS

Table 1- Specifications of the GC-MS

دستگاه GC	Finnigan-Thermo Trace
نوع ستون	HP-5MS
ابعاد ستون	طول ۳۰ متر، قطر ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت فیلم ۰/۳۲ میکرون
برنامه ریزی دمایی ستون	دمای اولیه ۶۰ (۳ دقیقه)، گرادیان دمایی ۳ °C/min، دمای نهایی ۲۲۰
محل تزریق	Split/split less (نسبت ۱ به ۱۰۰)
دمای محل تزریق	۲۵۰
گاز حامل	هلیوم با شدت جریان ۱ میلی لیتر در دقیقه
دستگاه mass	DSQ Mass Spectrometer
انرژی یونش	۷۰ الکترون ولت

۳- نانوامولسیون و بررسی خصوصیات آن

سنتز فرمولاسیون‌های نانوامولسیونی موسیلاژ اسفرزه حاوی اسانس مرزنجوش در قالب طرح کاملاً تصادفی با روش امواج فراصوت انجام شد. برای تهیه ۵۰ میلی‌لیتر محلول نانوامولسیون، ابتدا مقدار ۰/۵ گرم موسیلاژ اسفرزه با مقدار ۱ گرم روغن زیتون بخوبی باهم مخلوط گردید سپس مقدار ۰/۵ گرم توپین ۸۰ و ۳۰ میکرولیتر اسانس مرزنجوش به مخلوط اضافه و با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد و با استفاده از همزن مغناطیسی (دور ۱۰ و مدت ۴۰ دقیقه) همزده شد. امولسیون شیری رنگ سریعاً درون ظرف بزرگتر که حاوی یخ بود گذاشته و ظرف را زیر دستگاه اولتراسونیک (UP 400s- Hielscher) پروب دار فرکانس ۲۴ کیلو هرتز و توان ۴۰۰ وات به صورت ۲ ست ۳ دقیقه‌ای با ۳۰ ثانیه مکث قرار داده تا هموژنیزه انجام شود و محلول نانوامولسیون تهیه شد.

برای بررسی اندازه ذره‌ای (Z-average)، شاخص پراکندگی (PDI) و پتانسیل زتا (Z-potential) از دستگاه نانو پارتیکل آنالایزر^۱ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد استفاده شد (Vakili-Ghartavol et al., 2024). این دستگاه اندازه ذرات را بر حسب تعداد حجم و شدت نور بیان می‌کند.

۴- بررسی اثر تیمارهای مختلف بر روی میوه گوجه فرنگی گیلاسی رقم آذر

این پژوهش بصورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به منظور ارزیابی تاثیر ۴ تیمار (شاهد، اسانس، نانوامولسیون حاوی اسانس، و موسیلاژ اسفرزه) با ۳ تکرار و ۱۰ مشاهده در هر تکرار در دمای ۴ درجه سانتیگراد انجام گرفت که صفات فیزیکوشیمیایی در ۵ دوره زمانی (۰، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز) مورد ارزیابی قرار گرفتند.

¹ Particle size analyzer

میوه‌ها در مرحله بلوغ فیزیولوژیکی (قرمز شدن ۷۵٪ سطح، با رسیدن به حد مطلوب در شاخص‌های رنگ، اندازه، مواد جامد محلول و اسید) برداشت شدند. پس از بازرسی چشمی، حذف میوه‌های معیوب (خراشیده، بریده یا زخمی) و انتخاب میوه‌های سالم، یکنواخت و هم‌رنگ، آن‌ها با آب شسته و به مدت یک دقیقه در محلول هیپوکلریت سدیم (۲٪) ضدعفونی شدند. جهت آلوده‌سازی، میوه‌ها با سوسپانسیون قارچی (۵۱۰ کنیدی بر میلی‌لیتر) به مدت یک دقیقه غوطه‌ور شده و سپس برای تثبیت قارچ، یک تا دو ساعت در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. سپس میوه‌ها با تیمارهای مورد نظر به مدت ۹۰ ثانیه به روش غوطه‌وری تیمار شدند. در نهایت، میوه‌ها پس از خشک شدن روی ورقه آلومینیومی ضدعفونی شده، در ظروف پلاستیکی مخصوص چیده و به مدت ۲۸ روز در سردخانه نگهداری شدند تا صفات فیزیوشیمیایی آن‌ها در فواصل زمانی مشخص ارزیابی گردد ([Vakili-Ghartavol et al., 2024](#)).

۵- کاهش وزن میوه

در ابتدای آزمایش (روز صفر)، پیش از اجرای تیمارها، و همچنین در انتهای هر دوره ارزیابی (در روزهای ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸)، میوه‌های هر واحد آزمایشی با دقت وزن شدند. این کار با استفاده از یک ترازوی دیجیتالی با دقت ۰.۰۰۱ گرم صورت گرفت. درصد کاهش وزن با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید ([Razzaq et al., 2014](#)):

$$\text{کاهش وزن (درصد)} = \frac{\text{وزن ثانویه} - \text{وزن اولیه}}{\text{وزن اولیه}} \times 100$$

۶- درصد آب میوه

میزان ۲ گرم از میوه هر تکرار در فویل آلومینیومی پیچیده شد و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفت. پس از خشک شدن، وزن نمونه‌ها مجدداً اندازه‌گیری شد.

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

۷- چگالی آب میوه

ابتدا، ۲ میلی‌لیتر از عصاره صاف شده میوه، با استفاده از ترازوی دقیق (با دقت یک هزارم گرم) توزین شد. سپس، چگالی آب میوه با بهره‌گیری از روش ذیل محاسبه گردید ([Gbarakoro et al., 2020](#)):

$$D = \frac{\text{وزن آب میوه (گرم)}}{\text{حجم آب میوه (میلی‌لیتر)}}$$

۸- سفتی

برای ارزیابی سفتی بافت، از دستگاه کشش-فشار Zwick ساخت آلمان با پروب دایره‌ای صاف (قطر ۳ میلی‌متر) استفاده شد. آزمون با سرعت ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و زمان فشار ۲ ثانیه، طبق استاندارد ASAE S ۳۶۸.۳، انجام گرفت. میوه‌ها روی پایه‌ای محکم قرار داشتند و تمام اندازه‌گیری‌ها توسط یک فرد برای کاهش خطای انسانی صورت گرفت. بیشترین نیروی وارد شده جهت تغییر شکل، به‌عنوان شاخص سفتی ثبت شد (Tian & Xu., 2023).

۹- قند

مواد جامد محلول نمونه‌های آبمیوه با استفاده از یک رفرکتومتر اندازه‌گیری شد و نتایج بر حسب درجه بریکس گزارش گردید. دستگاه قبل از هر بار استفاده با آب مقطر در دمای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد دارای شاخص انکساری ۱/۳۳۳ کالیبره شد. تأثیر دما بر نتایج، با استفاده از سیستم جبران گر حرارتی (ATC) دستگاه، به صورت خودکار اصلاح گردید.

۱۰- اسید

برای تعیین اسیدیته قابل تیتراسیون (TA)، ابتدا ۲/۵ میلی‌لیتر از نمونه آبمیوه با ۵ میلی‌لیتر آب مقطر رقیق شد. سپس، ۲ تا ۳ قطره فنول فتالین به عنوان شناساگر به آن افزوده شد. نمونه رقیق‌شده با محلول استاندارد سدیم هیدروکسید (NaOH) ۰/۲ نرمال تیتر شد تا به نقطه هم‌ارزی در pH ۸/۲ رسید. حجم دقیق NaOH مصرفی یادداشت گردید. در نهایت، غلظت اسیدیته با استفاده از فرمول زیر محاسبه و برحسب درصد گزارش شد:

$$A = \frac{(V \times N \times F \times E)}{C} \times 100$$

در این فرمول، V حجم NaOH مصرفی (میلی‌لیتر)، N نرمالیه NaOH، F فاکتور سود، E اکی‌والان اسید مورد نظر و C حجم آبمیوه بر حسب میلی‌لیتر (Du et al., 2019).

۱۱- طعم

شاخص طعم به عنوان معیاری برای سنجش کیفیت طعم میوه است. این شاخص از طریق تقسیم میزان مواد جامد محلول (TSS) بر اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) به دست می‌آید (TSS/TA). بالا بودن این نسبت (شاخص طعم) به این معنی است که میوه شیرین‌تر و اسیدیته کمتری دارد، که معمولاً مورد پسند مصرف‌کنندگان است. با مقایسه مقادیر این شاخص در تیمارهای مختلف، می‌توان تأثیر اسانس و نانوحامل‌ها را بر کنترل و کند کردن سرعت رسیدگی میوه به دقت مورد ارزیابی قرار داد (Du et al., 2019).

۱۲- pH

برای آماده‌سازی نمونه، ابتدا آب میوه با بهره‌گیری از دستگاه آبمیوه‌گیری استخراج گردید. سپس، به منظور حذف هرگونه ذرات

جامد، عصاره به دست آمده صاف گردید. نهایتاً، pH این عصاره آماده شده با استفاده از یک pH متر اندازه‌گیری و مقادیر آن ثبت شد.

۱۳- ویتامین ث

برای تعیین میزان ویتامین ث (اسید اسکوربیک)، ۲۵ میلی‌لیتر از هر نمونه آبمیوه در ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد. سپس، ۲۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۲ نرمال و ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن افزوده شد. پس از مخلوط کردن، ۳ میلی‌لیتر محلول نشاسته به عنوان شناساگر به نمونه اضافه گردید. سپس محلول با ید ۰/۱ نرمال تیترو شد. برای اطمینان از صحت نتایج، یک تیتراسیون بلانک نیز انجام گرفت. نقطه پایانی تیتراسیون با ظهور رنگ آبی-تیره پایدار مشخص شد ([Suntornsuk et al., 2002](#)).

۱۴- نشت یونی

برای سنجش آسیب غشای سلولی، ۲ گرم از نمونه میوه در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل قرار گرفت. پس از ۲۴ ساعت شیکر، هدایت الکتریکی اولیه (Ci) با دستگاه EC متر ثبت شد. سپس، نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۱ سانتی‌گراد اتوکلاو و پس از سرد شدن، هدایت الکتریکی نهایی (Cs) آن‌ها اندازه‌گیری گردید ([Vakili-Ghartavol et al., 2024](#)).

$$EL = (Ci/Cs) \times 100$$

۱۵- بار میکروبی

۱۰ گرم از هر میوه با استفاده از یک مخلوط‌کن با پیتون واتر ۰/۱٪ (سیگما) هموژنیزه شد. سپس، ۳ رقت سریالی از هر تیمار به پلیت‌های حاوی نوترینت آگار (مرک) منتقل و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند ([Lastochkina et al., 2022](#)). نتایج بر اساس لوگاریتم کلنی‌های تشکیل‌دهنده در هر گرم (log CFU/g) محاسبه گردید.

۱۶- تست پنل

برای ارزیابی حسی، نمونه‌های میوه توسط ده فرد آموزش‌دیده، از نظر جذابیت ظاهری و میزان پذیرش، بررسی شدند. جذابیت ظاهری بر اساس تازگی، بافت، میزان چروکیدگی و شکل میوه ارزیابی شد و تمایل به خرید به عنوان معیاری برای بازارپسندی در نظر گرفته شد. ارزیابی با مقیاس ۵ درجه‌ای انجام شد که در آن امتیازات از عالی (بالاترین کیفیت ظاهری) تا بسیار ضعیف (پژمرده و دارای علائم پوسیدگی) متغیر بود. علاوه بر ظاهر، عطر و طعم میوه‌ها نیز با مقیاس مشابهی ارزیابی شد، به طوری که امتیازات از عطر و طعم اصیل و مطلوب تا غلبه بوی اسانس و نامطلوب بودن کلی متغیر بود ([Lastochkina et al., 2022](#)).

۱۷- آنالیز آماری

پیش از تحلیل، توزیع طبیعی داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک ارزیابی شد و در صورت نیاز، تبدیل‌های آماری مناسب اعمال گردید. برای مقایسه میانگین‌ها، آنالیز واریانس (ANOVA) در نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۴) اجرا شد. جهت تعیین تفاوت‌های معنی‌دار، از

آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطوح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ استفاده گردید. هر آزمایش در سه تکرار انجام شده و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شده است. نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار اکسل ۲۰۲۰ ترسیم گردیدند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از میانگین مربعات (جدول ۲) نشان داد که اثر ساده تیمارهای اعمال شده، زمان نگهداری و اثر متقابل تیمار $\times$ زمان بر کلیه شاخص‌های کیفی مورد بررسی شامل کاهش وزن میوه، چگالی آب میوه، مقدار آب میوه، سفتی بافت، اسیدیته قابل تیتر (TA)، طعم، محتوای آسکوربیک اسید (ویتامین C)، نشت الکترولیت‌ها، بار میکروبی، و ارزیابی حسی (پنل تست) در طول ۲۸ روز نگهداری در دمای ۴ درجه سانتیگراد در سطوح اطمینان ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار بودند. یعنی یک از تیمارها و همچنین گذشت زمان به‌طور مستقل و نیز در تعامل با یکدیگر توانسته‌اند بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، میکروبی و حسی میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر تأثیرگذار باشند. در حالیکه اثر متقابل تیمار در زمان بر میزان مواد جامد محلول (TSS) اثر قابل توجهی نداشتند.

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر؛ در مدت زمان ۲۸ روز انبارداری در دمای ۴ درجه سلسیوس

Table 1- Variance analysis of quantitative and qualitative traits of cherry tomato fruit 'Azar' during 28 days of storage at 4°C

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares					
		کاهش وزن میوه Weight loss	درصد آب میوه Juice percentage	چگالی آب میوه Juice density	سفتی Firmness	مواد جامد محلول Total soluble solids	اسید کل Titratable acidity
زمان Time	4	235**	1613**	205**	0.326**	18.2**	0.405**
تیمار Treatment	3	233**	983**	233**	0.259**	8.31**	0.181**
تیمار $\times$ زمان Treatment $\times$ time	12	27.2**	109**	27.2**	0.013**	0.223 ^{ns}	0.013**
خطا Error	40	0.000	0.037	0.001	0.002	0.410	0.00
ضریب تغییرات CV (%)	-	0.9	18.8	25.2	23.8	25.1	0.02

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

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

ادامه جدول ۲- تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی میوه گوجه فرنگی گیلاسی رقم آذر؛ در مدت زمان ۲۸ روز انبارداری در دمای ۴ درجه سلسیوس

Table 1- Variance analysis of quantitative and qualitative traits of cherry tomato fruit 'Azar' during 28 days of storage at 4°C

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares				
		طعم میوه	pH	الکترولیت Electrolyte leakage	ویتامین ث	بار میکروبی
زمان Time	4	318.81**	7.56**	843.69**	3.37**	11.41**
تیمار Treatment	3	245.35**	0.184**	458.01**	4.25**	4.61**
تیمار × زمان Treatment × time	12	48.42**	0.017**	45.61**	0.32**	0.367**
خطا Error	40	0.173	0.004	5.14	0.01	0.00
ضریب تغییرات CV (%)	-	0.6	0.13	0.14	0.18	0.76

ns، *، ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی داری

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

اسانس مرزنجوش

یافته‌ها (جدول ۳) نشان داد که بیشترین ترکیب‌های تشکیل دهنده اسانس مرزنجوش با مقادیر بیش از ۱۰٪ مربوط به α-سیمن (۲۰/۱٪)، گاما-ترپینن (۲۴٪/۲)، کارواکرول (۱۶٪/۹) بود که این ۳ ترکیب مجموعاً حدود ۶۱/۲٪ اسانس را تشکیل داد. بطور کلی، این اسانس متشکل از ۱۳ ترکیب مونوترپن هیدروکربنی (۶۷٪/۵)، ۶ ترکیب مونوترپن‌های اکسیژن‌دار (۲۳٪/۵)، ۴ ترکیب سزکوئی‌ترین هیدروکربنی (۵٪/۲) و یک ترکیب سزکوئی‌ترین اکسیژن‌دار (۴٪/۰) بود. بنابراین، بیشترین ترکیب اسانس مرزنجوش را مونوترپن‌های هیدروکربنی مانند گاما-ترپینن، α-سیمن و مونوترپن‌های فنولی اکسیژن‌دار مانند کارواکرول تشکیل دادند. این نتایج با مطالعات پیشین که ترکیبات اصلی اسانس مرزنجوش را مونوترپن‌های هیدروکربنی و اکسیژن‌دار گزارش کرده‌اند، همسو است (Bina & Rahimi, 2017; Jelali et al., 2011). این ترکیبات در فعالیت‌های بیولوژیکی این اسانس، مانند خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدباکتریایی و ضدقارچی نقش دارند (Yang et al., 2020). با این حال، تفاوت‌های مشاهده شده در درصد ترکیبات اسانس ممکن است ناشی از عوامل محیطی، روش استخراج یا ژنوتیپ گیاه باشد (Jelali et al., 2011).

Table 3- Chemical composition of the essential oil of marjoram (GC-MS)

No.	Components	Amount (%)	Retention time (RT)
1	α -Phellandrene	3.9	8.96
2	α -Pinene	1.7	9.19
3	Camphene	0.4	9.79
4	β -Phellandrene	3.8	10.62
5	β -Pinene	0.5	10.79
6	Amyl vinyl carbinol	0.5	10.93
7	β -Myrcene	3.2	11.22
8	Terpilene	3.9	12.23
9	o-Cymene	20.1	12.56
10	trans- β -Ocimene	1.9	12.95
11	β -Ocimene	3.1	13.34
12	γ -Terpinene	24.2	13.8
13	cis-Sabinene hydrate	0.5	14.27
14	α -Terpinolene	0.3	14.8
15	cis-2-Menthenol	0.3	17.52
16	Isoborneol	0.3	18.08
17	Terpinen-4-ol	1.5	18.39
18	Isothymol methyl ether	0.6	20.46
19	Thymol	3.9	22.31
20	Carvacrol	16.9	22.62
21	Caryophyllene	3.4	26.57
22	Humulene	0.4	27.72
23	α -Farnesene	0.7	29.22
24	β -Bisabolene	0.7	29.34
25	Caryophyllene oxide	0.4	31.67
26	Total	97.1	

نانوامولسیون (سایز، پتانسیل زتا، شاخص پراکندگی)

نانوامولسیون موسیلاژ اسفرزه حاوی اسانس مرزنجوش دارای اندازه ۲۱۹/۳ نانومتر، شاخص پراکندگی ۰/۱۸۴ و پتانسیل زتای ۴۰/۵-

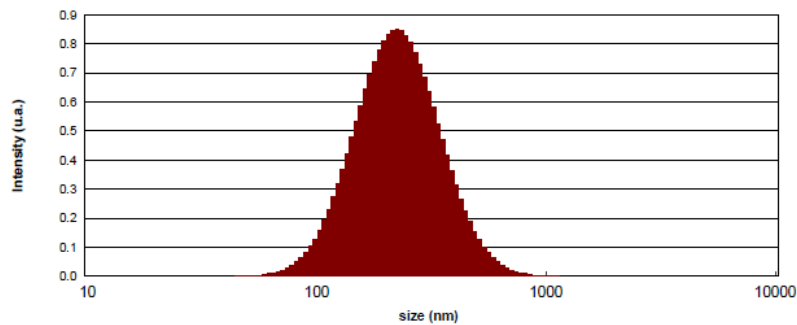
میلی‌ولت بود که نشان‌دهنده تشکیل یک سیستم نانوامولسیون پایدار با ویژگی‌های مطلوب است (شکل ۱). شاخص پراکندگی (PDI) 0.184

نشان‌دهنده توزیع یکنواخت ذرات است که برای پایداری و عملکرد سیستم بسیار مهم است (Kumar et al., 2017; Purwanto et al., 2024).

پتانسیل زتای ۴۰/۵- میلی‌ولت نشان‌دهنده دافعه الکترواستاتیکی قوی بین ذرات است که باعث کاهش تجمع و تضمین پایداری

طولانی مدت می‌شود. این با یافته‌هایی که پتانسیل زتا بالاتر از ± 30 میلی‌ولت معمولاً نشان‌دهنده سیستم‌های کلئیدی پایدار است، سازگار

است (Abdelaal et al., 2021).



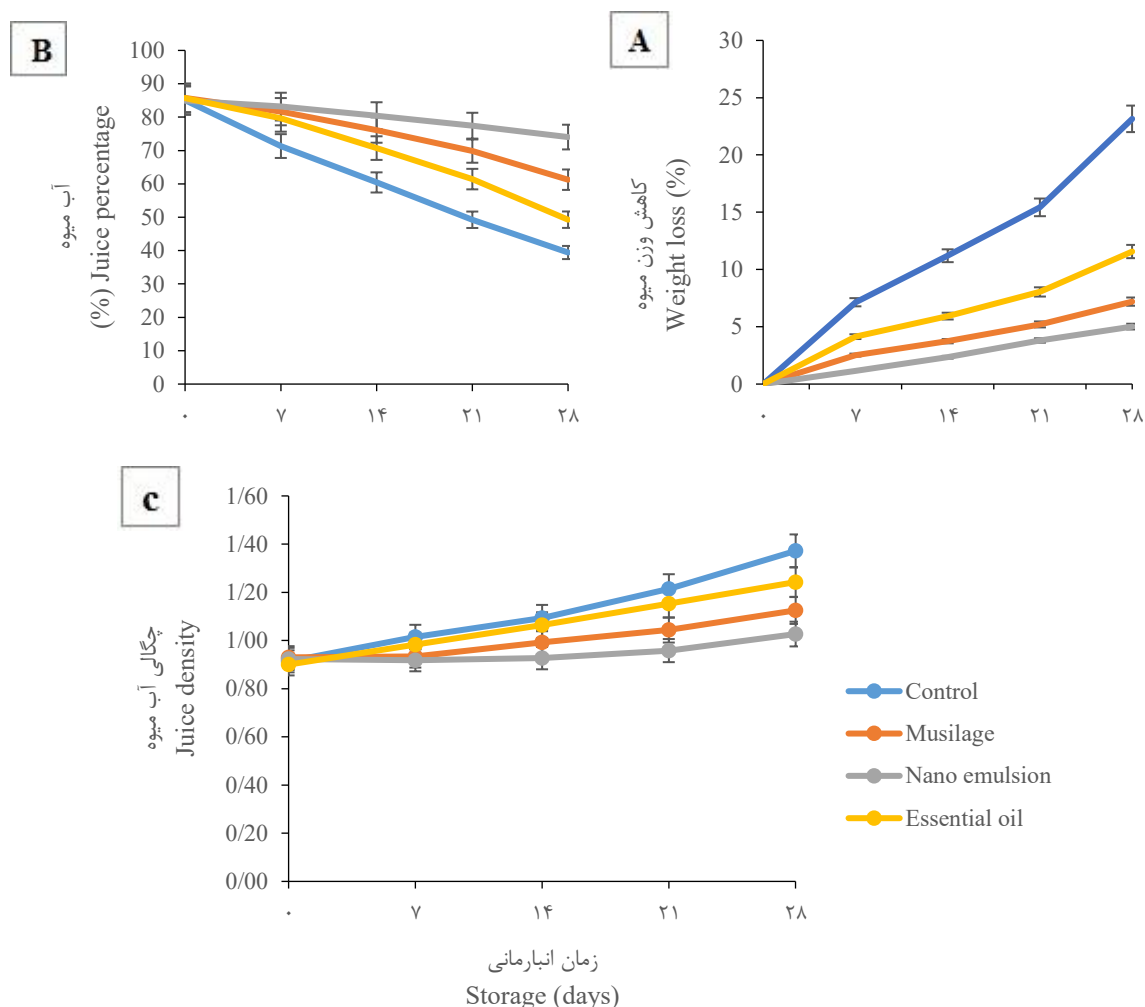
شکل ۱- اندازه نانوامولسیون موسیلاژ اسفرزه حاوی اسانس مرزنجوش

Fig. 1- Size of *Plantago psyllium* mucilage nanoemulsion containing marjoram essential oil

میزان کاهش وزن میوه، درصد آب میوه و چگالی آب میوه

نتایج نگهداری میوه‌ها در طول مدت ۲۸ روز در دمای ۴ درجه سانتیگراد نشان داد که میزان کاهش وزن میوه‌ها بتدریج افزایش، میزان آب میوه‌ها بتدریج کاهش و میزان چگالی آب میوه‌ها بتدریج افزایش یافت (شکل ۲). با این حال، پس از گذشت ۲۸ روز از زمان نگهداری، میوه‌هایی که با محلول نانوامولسیون تیمار شده بودند، در مقایسه با گروه شاهد، بالاترین میزان آب (۷۴ درصد) و پایین‌ترین چگالی آب (۱/۰۲ گرم بر میلی‌لیتر) را از خود نشان دادند. همچنین، این میوه‌ها کمترین میزان کاهش وزن (۵/۰۲ درصد) را داشتند. این میوه‌ها در مقایسه با میوه‌های شاهد به طور قابل ملاحظه‌ای ۷۸/۳ درصد میزان کاهش وزن کمتری، ۷۶ درصد میزان آب بیشتری و ۷۷/۶ درصد میزان چگالی آب میوه کمتری داشتند.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نانوامولسیون‌ها با ایجاد یک لایه نیمه‌تراوا روی سطح میوه، از تبخیر آب و خروج گازهای متابولیک جلوگیری می‌کنند. این امر منجر به کاهش قابل‌توجهی در کاهش وزن میوه‌ها می‌شود (Cenobio-Galindo et al., 2019; Miranda et al., 2021). برای مثال، در مطالعه‌ای روی پرتقال، پوشش‌های نانوامولسیون باعث کاهش وزن کمتر نسبت به گروه شاهد شدند (Radi et al., 2018). نانوامولسیون‌ها با کاهش نرخ تنفس و تبخیر آب، محتوای آب میوه‌ها را حفظ می‌کنند. این ویژگی در مطالعات مختلفی از جمله بررسی روی آووکادو و پرتقال مشاهده شده است (Cenobio-Galindo et al., 2019; Miranda et al., 2021). کاهش چگالی آب در میوه‌های تیمار شده با نانوامولسیون ممکن است به دلیل حفظ یکنواختی بافت و جلوگیری از تجمع مواد جامد در اثر سرعت کمتر از دست دادن آب باشد. این موضوع در مطالعات مرتبط با پوشش‌های نانوامولسیون تأیید شده است (Oliveira Filho et al., 2022).



شکل ۲: میزان کاهش وزن میوه (A)، درصد آب میوه (B) و چگالی آب میوه (C) در گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر پوشش داده‌شده با اسانس مرزنجوش، موسیلاژ اسفرزه و فرمولاسیون‌های نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در دمای چهار درجه سلسیوس

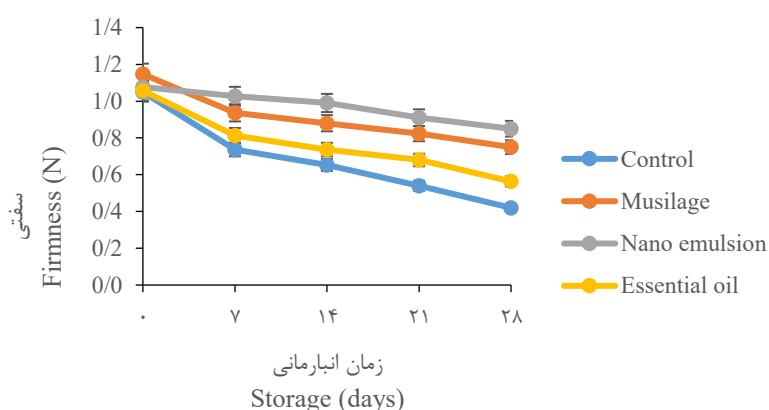
Fig. 2- The percentage of weight loss (A), fruit juice (B) and the fruit juice density (C) in cherry tomatoes 'Azar' coated Marjoram essential oil, *Plantago psyllium* mucilage and nanoemulsion formulations containing marjoram essential oil, over a storage period of 28 days in a refrigerator at 4°C

میزان سفتی

تغییر در میزان سفتی میوه‌های تیمار شده در [شکل ۳](#) آمده است. نتایج نشان داد که در طول مدت نگهداری، به‌طور کلی میزان سفتی به تدریج کاهش یافت. با این حال، میوه‌های تیمار شده با محلول نانوامولسیون کاهش کمتری داشتند. در این پژوهش، بیشترین مقدار سفتی (۰/۸۵ نیوتن) مربوط به میوه‌های تیمار شده با نانوامولسیون موسیلاژ اسفرزه حاوی اسانس مرزنجوش بود که حدود ۶۴/۹ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود.

نتایج این مطالعه نشان داد که تیمار میوه‌ها با نانوامولسیون موسیلاژ اسفرزه حاوی اسانس مرزنجوش به‌صورت معنی‌داری از

کاهش سفتی میوه‌ها در طول مدت نگهداری جلوگیری کرد. این یافته با مطالعات متعددی که تأثیر پوشش‌های نانوامولسیون و ترکیبات فعال گیاهی را بر حفظ کیفیت میوه‌ها بررسی کرده‌اند، همسو است. به‌عنوان مثال، پژوهش‌های مشابه نشان داده‌اند که نانوامولسیون‌های حاوی اسانس‌های گیاهی می‌توانند با کاهش تنفس و فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده دیواره سلولی (مانند پکتین متیل استراز و پلی گالاکتروناز)، از نرم شدن بافت میوه جلوگیری کنند (Liguori et al., 2023). همچنین تفاوت‌های مشاهده‌شده در میزان سفتی تیمارها می‌تواند ناشی از اثر سینرژیستی ترکیبات فنولی و ترپنوییدی موجود در اسانس مرزنجوش باشد که خاصیت آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی دارند و از تخریب دیواره سلولی جلوگیری می‌کنند (Liguori et al., 2023; Hussein et al., 2025). از سوی دیگر، موسیلاژ اسفرزه به‌عنوان یک پایه پلی ساکاریدی، با تشکیل لایه‌ای محافظ روی سطح میوه، کاهش رطوبت و مهاجرت گازها را کنترل کرده و به حفظ یکپارچگی ساختار میوه کمک می‌کنند (Noshad et al., 2019; Liguori et al., 2023).



شکل ۳: میزان سفتی میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر پوشش داده‌شده با اسانس مرزنجوش، موسیلاژ اسفرزه و فرمولاسیون‌های نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در دمای چهار درجه سلسیوس

Fig. 3- Firmness in cherry tomatoes ‘Azar’ coated Marjoram essential oil, *Plantago psyllium* mucilage and nanoemulsion formulations containing marjoram essential oil, over a storage period of 28 days in a refrigerator at 4°C

میزان قند، اسید، pH و طعم میوه

نتایج این مطالعه نشان داد که در طول مدت نگهداری به‌طور کلی اثر متقابل زمان و تیمار بر میزان مواد جامد محلول میوه معنی‌دار نبود. با این حال، تیمار شاهد (۶/۵۰ بریکس) بالاترین و تیمار نانوامولسیون موسیلاژ اسفرزه حاوی اسانس مرزنجوش (۴/۸۰ بریکس) پایین‌ترین مقدار میزان مواد جامد محلول را به خود اختصاص دادند (جدول ۴).

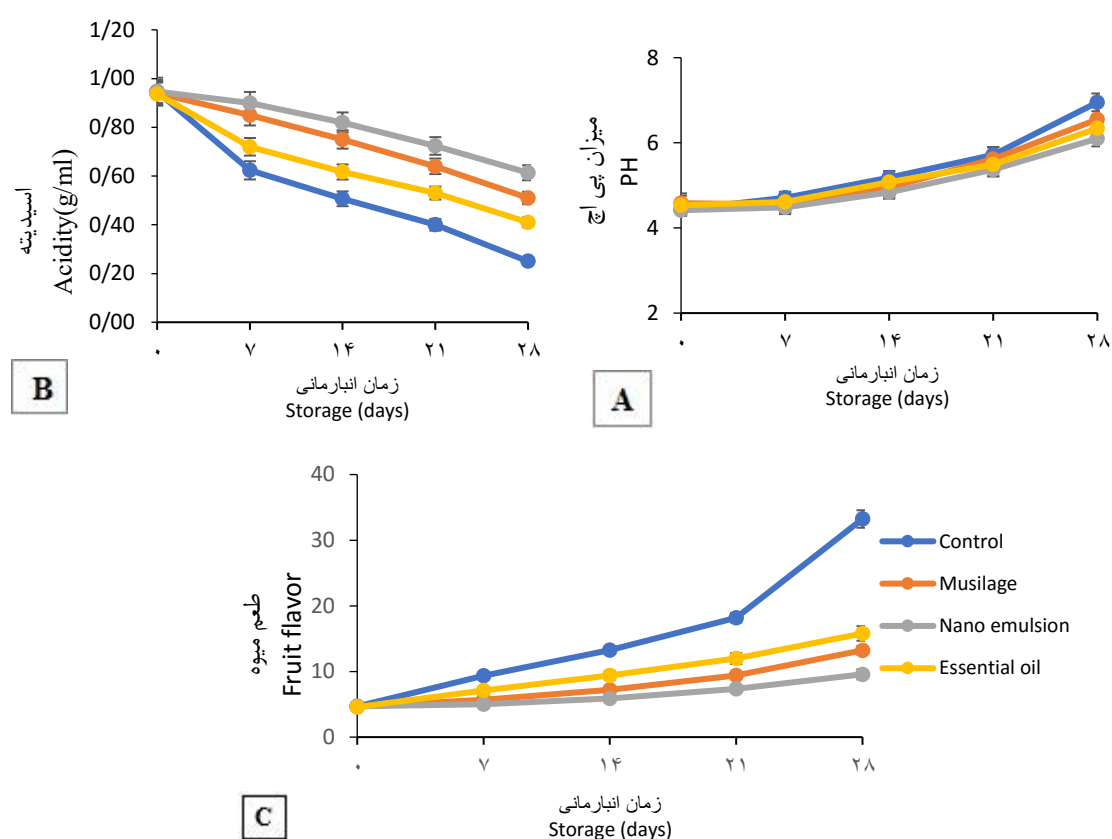
نتایج این پژوهش نشان داد که در طول دوره نگهداری، کیفیت میوه گوجه‌فرنگی تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد. نگهداری میوه‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به تدریج باعث کاهش اسیدیته و افزایش pH و طعم آن‌ها شد (شکل ۴). با این حال، پس از گذشت ۲۸ روز از زمان نگهداری، میوه‌هایی که با محلول نانوامولسیون تیمار شده بودند، در مقایسه با گروه شاهد، کمترین میزان pH (۶/۱۰) و بیشترین اسید (۰/۶۱٪) را از خود نشان دادند. همچنین، این میوه‌ها کمترین میزان طعم (۹/۵۷) را داشتند.

جدول ۴. میزان مواد جامد محلول میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر پوشش داده‌شده با اسانس مرزنجوش، موسیلاژ اسفرزه و فرمولاسیون‌های نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در دمای چهار درجه سلسیوس

Fig. 3- Total soluble solids in cherry tomatoes 'Azar' coated Marjoram essential oil, *Plantago psyllium* mucilage and nanoemulsion formulations containing marjoram essential oil, over a storage period of 28 days in a refrigerator at 4°C

	کنترل	اسانس	موسیلاژ	نانوامولسیون
	Control	Essential oil	Musilage	Nanoemulsion
مواد جامد محلول	6.50 ^a	5.87 ^b	5.24 ^c	4.80 ^c

Total soluble solids



شکل ۴: میزان کاهش پی‌اچ (A)، اسیدیته (B) و طعم میوه (C) در گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر پوشش داده‌شده با اسانس مرزنجوش، موسیلاژ اسفرزه و فرمولاسیون‌های نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در دمای چهار درجه سلسیوس

Fig. 4- The PH (A), Acidity (B) and Fruit flavor (C) in cherry tomatoes 'Azar' coated Marjoram essential oil, *Plantago psyllium* mucilage and nanoemulsion formulations containing marjoram essential oil, over a storage period of 28 days in a refrigerator at 4°C

این تغییرات، که نشان‌دهنده فرآیند رسیدن و پیری میوه است، با نتایج بسیاری از مطالعات قبلی همخوانی دارد. تحقیقات پیشین نیز گزارش کرده‌اند که با پیشرفت فرآیند رسیدن، اسیدهای آلی میوه به عنوان سوبسترای تنفسی مصرف شده و در نتیجه، اسیدیته کل میوه

کاهش می‌یابد و pH افزایش پیدا می‌کند. این امر به دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌هایی مانند پکتین‌متیل‌استراز است که باعث تخریب دیواره سلولی و کاهش اسیدیته می‌شود. افزایش طعم نیز معمولاً نتیجه تبدیل نشاسته به قندهای ساده و کاهش اسیدیته است (Paudel et al., 2022).

با این حال، نتایج ما به وضوح نشان داد که تیمار میوه‌ها با نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش توانست این تغییرات را به طور چشمگیری کنترل کند. میوه‌های تیمار شده، در مقایسه با گروه شاهد، پس از ۲۸ روز کمترین میزان افزایش pH و بیشترین میزان اسیدیته را حفظ کردند. این امر نشان‌دهنده توانایی نانوامولسیون در کند کردن فرآیندهای متابولیک میوه، به ویژه تنفس و فعالیت آنزیم‌های دخیل در رسیدن، است. اسانس مرزنجوش به دلیل وجود ترکیبات فعالی همچون کارواکرول، دارای خواص ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی قوی است که می‌تواند با مهار فعالیت آنزیم‌ها و کاهش سرعت تنفس، فرآیند پیری میوه را به تأخیر بیندازد. این یافته‌ها با مطالعاتی که اثربخشی نانوامولسیون‌ها را در افزایش ماندگاری میوه‌ها و سبزیجات نشان داده‌اند، سازگار است. نانوکپسوله کردن اسانس‌ها باعث افزایش پایداری و بهبود توزیع آن‌ها در سطح میوه شده و اثربخشی بیشتری را در کنترل فرآیندهای فساد فراهم می‌آورد (Kaskatepe et al., 2022).

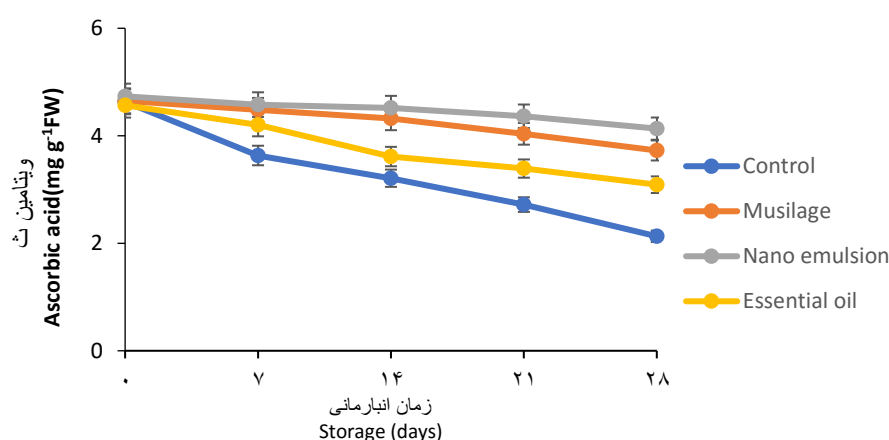
کاهش میزان طعم در میوه‌های تیمار شده با نانوامولسیون نیز می‌تواند به همین دلیل باشد؛ چرا که کند شدن فرآیند رسیدن، باعث می‌شود که تبدیل اسیدها به قند و در نتیجه افزایش طعم میوه، با سرعت کمتری انجام شود. این نتیجه، تأییدی بر اثربخشی تیمار در حفظ کیفیت اولیه میوه است. به طور کلی، نتایج این پژوهش بر اهمیت استفاده از نگهدارنده‌های طبیعی و فناوری‌های نوین مانند نانوامولسیون در مدیریت پس از برداشت و افزایش عمر مفید گوجه‌فرنگی گیلانی و زیتونی تأکید می‌کند و راه را برای توسعه روش‌های پایدارتر در صنعت غذا هموار می‌سازد (Badee et al., 2013).

ویتامین ث

نتایج این پژوهش نشان داد که در طول دوره نگهداری ۲۸ روزه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، میزان ویتامین C میوه‌های گوجه‌فرنگی به تدریج کاهش می‌یابد (شکل ۵). با این حال، پس از گذشت ۲۸ روز از زمان نگهداری، میوه‌هایی که با محلول نانوامولسیون تیمار شده بودند، در مقایسه با گروه شاهد، بالاترین میزان ویتامین ث (۴/۱۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر میوه) را داشتند. این یافته با مطالعات متعدد دیگری همخوانی دارد که نشان می‌دهند ویتامین C به عنوان یک آنتی‌اکسیدان حساس، در برابر عوامل محیطی مانند اکسیژن، نور و حرارت ناپایدار بوده و به راحتی از طریق واکنش‌های اکسیداتیو تخریب می‌شود. ویتامین C، به عنوان یک شاخص مهم برای ارزیابی تازگی و حفظ ارزش تغذیه‌ای محصولات در طول دوره نگهداری، شناخته می‌شود. و کاهش آن به طور مستقیم با کیفیت و ارزش غذایی میوه مرتبط است، زیرا ویتامین C نقش کلیدی در حفظ سلامت انسان ایفا می‌کند (Feszterová et al., 2023).

با این حال، نتایج ما به وضوح نشان داد که تیمار میوه‌ها با نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش توانست این کاهش را به طور چشمگیری مهار کند. میوه‌های تیمار شده، پس از ۲۸ روز، بالاترین میزان ویتامین C را در مقایسه با گروه شاهد حفظ کردند. این امر نشان‌دهنده توانایی نانوامولسیون در محافظت از ویتامین C در برابر تخریب است. اسانس مرزنجوش، به دلیل ترکیبات آنتی‌اکسیدانی قوی خود (به ویژه کارواکرول و تیمول)، می‌تواند رادیکال‌های آزاد را خنثی کرده و از واکنش‌های اکسیداتیو که منجر به از دست رفتن ویتامین C می‌شوند، جلوگیری کند.

مطالعات پیشین نیز اثبات کرده‌اند که اسانس‌ها با خواص آنتی‌اکسیدانی قوی می‌توانند از کاهش ترکیبات زیست‌فعال در میوه‌ها در طول انبارداری جلوگیری کنند (Tolasa et al., 2021). نانوکپسوله کردن اسانس در فرم نانوامولسیون، مزیت دیگری نیز فراهم می‌کند. این فناوری با ایجاد یک لایه پوششی پایدار و یکنواخت بر روی سطح میوه، نه تنها دسترسی اکسیژن به بافت میوه را کاهش می‌دهد، بلکه از فراریت ترکیبات فعال اسانس نیز جلوگیری می‌کند. این مکانیسم دوگانه، سرعت تخریب ویتامین C را به شدت کاهش می‌دهد و در نتیجه، به حفظ ارزش تغذیه‌ای و کیفیت کلی محصول در طولانی‌مدت کمک می‌کند. این یافته‌ها، بر اهمیت استفاده از فناوری‌های نوین مانند نانوامولسیون برای حفظ ارزش تغذیه‌ای و کیفیت محصولات کشاورزی در طولانی‌مدت تاکید می‌کند و راه را برای تولید محصولات سالم‌تر با ماندگاری بیشتر هموار می‌سازد (Shehu & Garba, 2025).



شکل ۵: میزان ویتامین C میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر پوشش داده‌شده با اسانس مرزنجوش، موسیلاژ اسفرزه و فرمولاسیون‌های نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در دمای چهار درجه سلسیوس

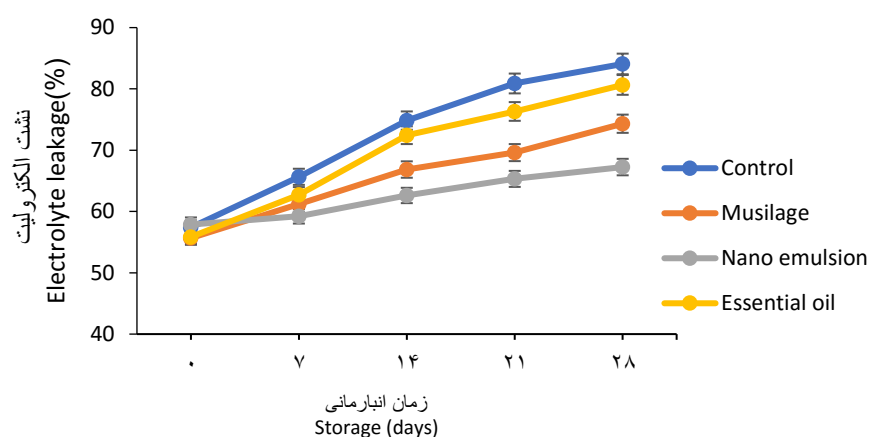
Fig. 5- Ascorbic acid in cherry tomatoes 'Azar' coated Marjoram essential oil, *Plantago psyllium* mucilage and nanoemulsion formulations containing marjoram essential oil, over a storage period of 28 days in a refrigerator at 4°C

نشت یونی

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که طی دوره نگهداری ۲۸ روزه گوجه‌فرنگی در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، میزان نشت الکترولیت به تدریج افزایش یافته است (شکل ۶). با این حال، پس از گذشت ۲۸ روز از زمان نگهداری، میوه‌هایی که با محلول نانوامولسیون تیمار شده بودند، در مقایسه با گروه شاهد، کمترین میزان نشت الکترولیت (۶۷/۲۵ درصد) را داشتند.

این شاخص به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای سنجش آسیب به غشای سلولی، فرایند پیری و افت کیفیت میوه شناخته می‌شود. افزایش نشت الکترولیت بیانگر بالا رفتن نفوذپذیری غشا و خروج یون‌های داخلی به فضای بین‌سلولی است؛ پدیده‌ای که در اثر تشدید تخریب بافتی و کاهش یکپارچگی سلولی طی دوره انبارداری رخ می‌دهد. چنین الگویی پیش‌تر نیز در تحقیقات متعدد به‌عنوان پیامد اصلی از دست رفتن سلامت غشای سلولی در میوه‌ها گزارش شده است (Natalini et al., 2021).

با وجود این، نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش توانست روند افزایش نشت الکترولیت را به طور محسوسی مهار کند. در پایان دوره نگهداری، میوه‌های تیمار شده کمترین میزان نشت را نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند که نشان‌دهنده نقش حفاظتی این فرمولاسیون در حفظ ساختار و عملکرد غشای سلولی است. خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی اسانس مرزنجوش، با کاهش استرس اکسیداتیو و مهار رشد عوامل بیماری‌زا، نقش مهمی در محافظت مستقیم از غشا ایفا می‌کند (Almasi et al., 2020). افزون بر این، کپسوله‌سازی اسانس در قالب نانوامولسیون موجب ایجاد لایه‌ای محافظ بر سطح میوه می‌شود که با کاهش تبخیر و تعرق، از آسیب‌های فیزیکی و بیولوژیکی جلوگیری کرده و پایداری بافت را افزایش می‌دهد. برآیند این اثرات نشان می‌دهد که بهره‌گیری از فناوری نانوامولسیون می‌تواند رویکردی مؤثر در مدیریت پس از برداشت، کاهش تخریب بافتی، حفظ سفتی و افزایش طول عمر انباری میوه باشد (Patel et al., 2025).



شکل ۶: میزان نشت الکترولیت میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر پوشش داده شده با اسانس مرزنجوش، موسیلاژ اسفرزه و فرمولاسیون‌های نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در دمای چهار درجه سلسیوس

Fig. 6- Electrolyte leakage in cherry tomatoes 'Azar' coated Marjoram essential oil, *Plantago psyllium* mucilage and nanoemulsion formulations containing marjoram essential oil, over a storage period of 28 days in a refrigerator at 4°C

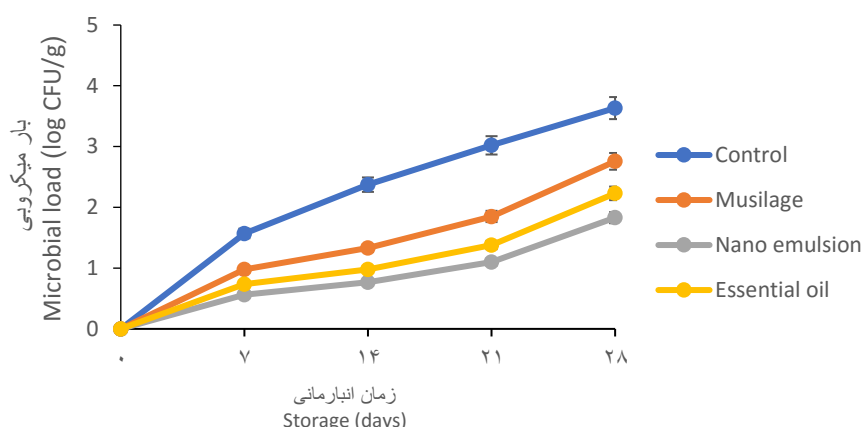
بار میکروبی

نتایج این پژوهش نشان داد که در طول دوره نگهداری ۲۸ روزه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، میزان بار میکروبی میوه‌های گوجه‌فرنگی به تدریج افزایش یافت (شکل ۷). با این حال، پس از گذشت ۲۸ روز از زمان نگهداری، میوه‌هایی که با محلول نانوامولسیون تیمار شده بودند، در مقایسه با گروه شاهد، کمترین میزان بار میکروبی (۱/۸۳ لگ) را داشتند. این افزایش، که ناشی از رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و عوامل فسادزا نظیر باکتری‌ها و قارچ‌هاست، از مهم‌ترین عوامل افت کیفیت، بروز پوسیدگی‌های سطحی و داخلی و کاهش قابل توجه ماندگاری میوه پس از برداشت محسوب می‌شود. بررسی نمونه‌های شاهد بیانگر آن بود که روش‌های متداول نگهداری توانایی کافی برای مهار رشد میکروبی را ندارند و این موضوع، علاوه بر کاهش کیفیت، می‌تواند خطر آلودگی پاتوزنی و تهدید سلامت مصرف‌کننده را به همراه داشته باشد (Pirozzi et al., 2020).

با این حال، تیمار میوه‌ها با نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش اثر چشمگیری در کنترل رشد میکروبی داشت. پس از ۲۸ روز

نگهداری، کمترین بار میکروبی در نمونه‌های تیمار شده مشاهده شد که مؤید نقش ضد میکروبی قوی این اسانس است. ترکیبات فعال اصلی موجود در مرزنجوش، به‌ویژه کارواکرول و تیمول، از طریق تخریب یکپارچگی غشای سلولی باکتری‌ها و قارچ‌ها و افزایش نفوذپذیری آن، موجب نشت محتویات حیاتی سلول و در نهایت مرگ میکروارگانیسم‌ها می‌شوند (Aisyah et al., 2022).

افزون بر این، به‌کارگیری اسانس در قالب نانوامولسیون کارایی آن را به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است. نانوکپسوله‌سازی در ابعاد ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر، سه مزیت عمده فراهم می‌کند: نخست، افزایش سطح تماس ترکیبات فعال با سلول‌های میکروبی و تقویت اثر بازدارندگی؛ دوم، بهبود نفوذ این ترکیبات به عمق بافت میوه و ایجاد حفاظت مؤثرتر؛ و سوم، افزایش پایداری اسانس در برابر تبخیر و تخریب، که موجب تداوم فعالیت آن در دوره‌های طولانی نگهداری می‌شود. مطالعه اثرات اسانس نعناع فلفلی (*Mentha × Piperita L*) و نانوذرات لیپیدی جامد حاوی این اسانس را بر بار میکروبی و کیفیت گوجه‌فرنگی گیلاسی در طول ۲۸ روز نگهداری در دمای ۸ درجه سانتی‌گراد بررسی کرد. نتایج نشان داد که پوشش‌دهی میوه‌ها با نانوذرات لیپیدی حاوی اسانس در غلظت‌های ۰.۰۷۵٪ تا ۰.۲٪، به طور موثری کیفیت میوه‌ها حفظ کرد. این پوشش همچنین باعث کاهش بار میکروبی شد. در مقابل، اسانس آزاد در غلظت‌های بالاتر (۰.۱٪ و ۰.۲٪) به بافت میوه آسیب زد. در مجموع، استفاده از نانوذرات لیپیدی به همراه اسانس نعناع فلفلی باعث کاهش بار میکروبی و افزایش عمر ماندگاری و کیفیت گوجه‌فرنگی گیلاسی شد (Vakili-Ghartavol et al., 2024).



شکل ۷: میزان بار میکروبی میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر پوشش‌دهی شده با اسانس مرزنجوش، موسیلاژ اسفرزه و فرمولاسیون‌های نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در دمای چهار درجه سلسیوس

Fig. 6- Microbial load in cherry tomatoes 'Azar' coated Marjoram essential oil, *Plantago psyllium* mucilage and nanoemulsion formulations containing marjoram essential oil, over a storage

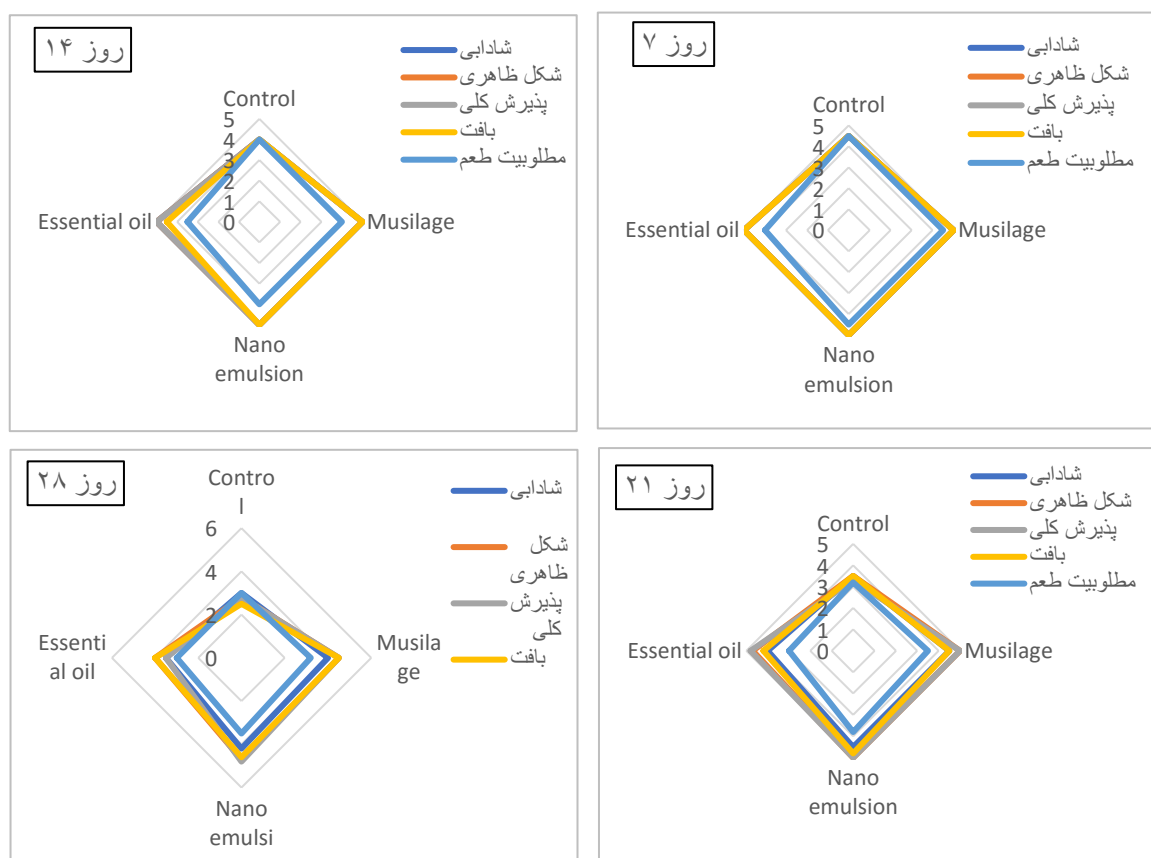
تست پتل

نتایج ارزیابی حسی، که برای سنجش پذیرش مصرف‌کننده از میوه‌های تیمار شده ضروری است، نشان داد که عوامل کلیدی مانند طعم، سفتی و ظاهر، نقش مهمی در کیفیت نهایی محصول دارند. با گذشت زمان انبارداری، تمام میوه‌ها از نظر شادابی، سفتی بافت، ظاهر

کلی (شامل چروکیدگی و سوختگی) و مقبولیت عمومی، افت کیفیت را تجربه کردند (شکل ۸). با این حال، میوه‌هایی که با نانوکپسول‌ها پوشش داده شده بودند، در مقایسه با میوه‌های گروه شاهد یا آن‌هایی که با اسانس آزاد تیمار شده بودند، امتیازات بالاتری کسب کردند. این میوه‌ها بافت سفت‌تر، چروکیدگی کمتر و تغییرات رنگی محدودتری داشتند که نشان‌دهنده تأخیر در فرآیند رسیدن و پیری بود. این نتایج به‌طور خاص در گوجه‌فرنگی‌ها پس از ۲۸ روز نگهداری مشاهده شد، جایی که هیچ گونه آسیب میکروبی دیده نشد. در مقابل، میوه‌های تیمار شده با فرم آزاد اسانس مرزنجوش، امتیازات نامناسبی را به دست آوردند. به نظر می‌رسد خاصیت سیتوتوکسیک (سمی بودن برای سلول) اسانس در فرم آزاد، منجر به سوختگی و آسیب به بافت پوست میوه‌ها شده و به کاهش کیفیت ظاهری آن‌ها منجر گردیده است.

در مورد طعم، اسانس‌ها مخلوطی از ترکیبات فرار هستند که بخش قابل توجهی از آن‌ها را ترپن‌ها تشکیل می‌دهند و سهم کمی در طعم دارند. اما بخش اکسیژن‌دار آن‌ها، که بسیار معطر است، عمدتاً مسئول طعم و مزه خاص اسانس‌هاست. با توجه به اینکه در اسانس نعنای فلفلی مورد استفاده در این پژوهش، ترکیبات اکسیژن‌دار (مانند منتول و متون) بیش از ۹۴ درصد را تشکیل می‌دادند، احتمالاً افزایش طعم میوه‌های تیمار شده نسبت به گروه شاهد به دلیل همین ترکیبات بوده است. یافته‌های ما نشان داد که تیمار با اسانس مرزنجوش طعم میوه‌ها را بهبود بخشید و استفاده از نانوکپسول‌ها توانست تندی طعم اسانس را تعدیل کند، که این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد

(de Matos et al., 2019).



شکل ۸: تست پنل میوه گوجه‌فرنگی گیلاسی رقم آذر پوشش داده‌شده با اسانس مرزنجوش، موسیلاژ اسفرزه و فرمولاسیون‌های نانوامولسیون حاوی اسانس مرزنجوش در طول مدت ۲۸ روز نگهداری در دمای چهار درجه سلسیوس

Fig. 6- Sensory quality in cherry tomatoes 'Azar' coated Marjoram essential oil, *Plantago psyllium*

نتایج ارزیابی حسی نشان داد که میوه‌های گوجه‌فرنگی گیلای پوشش داده شده با کیتوزان حاوی اسانس مرزنجوش، طعم بهتری داشتند و نمرات بالاتری کسب کردند. این بهبود طعم به دلیل محتوای بالاتر قندهایی مانند گلوکز و فروکتوز و همچنین اسید سیتریک در این میوه‌ها بود. احتمالاً این پوشش توانسته است تعادل بهتری بین قندها و اسیدها ایجاد کند، که نسبت این دو جزء نقش کلیدی در طعم یک گوجه‌فرنگی رسیده دارد (Won et al., 2018). پوشش کیتوزان به همراه اسانس مرزنجوش، فرآیند پوسیدگی گوجه‌فرنگی گیلای را به تأخیر انداخت و به این ترتیب کیفیت و ویژگی‌های حسی مهم میوه را در شرایط نگهداری سرد و دمای اتاق بهبود بخشید (Barreto et al., 2016). این یافته‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای این پوشش در افزایش ماندگاری و کیفیت کلی میوه برای مصرف‌کنندگان است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی تأثیر موسیلاژ اسفرزه، اسانس مرزنجوش و نانوامولسیون حاوی موسیلاژ اسفرزه و اسانس مرزنجوش بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و افزایش ماندگاری گوجه‌فرنگی گیلای رقم آذر در دما ۴ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از نانوامولسیون حاوی موسیلاژ اسفرزه و اسانس مرزنجوش به‌طور معناداری کیفیت و ماندگاری میوه‌های گوجه‌فرنگی گیلای رقم آذر را در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بهبود بخشید. تیمار نانوامولسیونی در مقایسه با اسانس و موسیلاژ به‌صورت آزاد، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی میوه مانند آب میوه، آسکوربیک اسید و سفتی میوه را به‌طور مؤثرتری حفظ کرد. همچنین، میزان کاهش وزن میوه، چگالی میوه، میزان pH آب میوه و میزان بار میکروبی آب میوه را به‌طور قابل توجهی کاهش داد. از سوی دیگر، افزایش نشت الکترولیت در نمونه‌های تیمار شده با اسانس مرزنجوش به‌صورت آزاد، احتمالاً ناشی از آسیب غشای سلولی تحت تأثیر ترکیبات فرار است. به‌طور کلی، این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم‌های نانوحامل مانند نانوامولسیون‌ها می‌توانند با محافظت از ترکیبات فعال (مانند اسانس‌ها) و بهبود رهایش هدفمند، راهکار مناسبی برای افزایش عمر انباری محصولات کشاورزی باشند. این یافته‌ها از دیدگاه توسعه روش‌های پایدار و جایگزین برای نگهداری پس از برداشت میوه‌ها، به‌ویژه در کاهش ضایعات و حفظ کیفیت تغذیه‌ای، حائز اهمیت است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، تأثیر این فناوری بر سایر میوه‌های حساس و همچنین ارزیابی جنبه‌های اقتصادی و ایمنی آن مورد بررسی قرار گیرد. این نتایج گامی امیدوارکننده در جهت جایگزینی روش‌های سنتی با فناوری‌های نوین در صنعت کشاورزی و غذایی است.

منابع

- Abdelaal, K., Essawy, M., Quraytam, A., Abdallah, F., Mostafa, H., Shoueir, K., ... & Hafez, Y. (2021). Toxicity of essential oils nanoemulsion against *Aphis craccivora* and their inhibitory activity on insect enzymes. *Processes*, 9(4), 624. DOI: 10.22101/JRIFST.2012.05.21.113
- Abdel-Rahman, F. A., Rashid, I. A., & Shoala, T. (2020). Nanoactivities of natural nanomaterials rosmarinic acid, glycyrrhizic acid and glycyrrhizic acid ammonium salt against tomato phytopathogenic fungi *Alternaria*

- alternata* and *Penicillium digitatum*. Journal of Plant Protection Research, 60(2).
- Adams, R. P. (2007). Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectrometry (Vol. 456): Allured publishing corporation Carol Stream, IL.
- Aisyah, Y., Murlida, E., & Maulizar, T. A. (2022). Effect of the edible coating containing cinnamon oil nanoemulsion on storage life and quality of tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill) fruits. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 951, No. 1, p. 012048). IOP Publishing.
- Almasi, H., Azizi, S., & Amjadi, S. (2020). Development and characterization of pectin films activated by nanoemulsion and Pickering emulsion stabilized marjoram (*Origanum majorana* L.) essential oil. Food Hydrocolloids, 99, 105338.
- Amiri Aghdaei S.S., Aalami, M., and Rezaei, R., Dadpour, M., & Khomeiri, M. (2012). Effect of isfarzeh and basil seed mucilages on physicochemical, rheological and sensory properties of ice cream. Journal of Research and Innovation in Food Sciences and Industries. 1(1): 23-38. DOI: 10.22101/JRIFST.2012.05.21.113, In Persian with English abstract.
- Badee, A. Z. M., Moawad, R. K., ElNoketi, M. M., & Gouda, M. M. (2013). Improving the quality and shelf-life of refrigerated chicken meat by marjoram essential oil.
- Barreto, T. A., Andrade, S. C., Maciel, J. F., Arcanjo, N. M., Madruga, M. S., Meireles, B., ... & Magnani, M. (2016). A chitosan coating containing essential oil from *Origanum vulgare* L. to control postharvest mold infections and keep the quality of cherry tomato fruit. Frontiers in Microbiology, 7, 1724.
- Gbarakoro, S. L., Ilomechine, A. G., & Gbarato, B. G. (2020). Analysis of the physico-chemical properties of commercial fruit juices sold in a local market in Port Harcourt, Nigeria. International Journal of Chemistry and Chemical Processes. 37-47.
- Bina, F., & Rahimi, R. (2017). Sweet marjoram: a review of ethnopharmacology, phytochemistry, and biological activities. Journal of evidence-based complementary & alternative medicine, 22(1), 175-185. DOI: 10.1177/2156587216650793
- Cenobio-Galindo, A. D. J., Ocampo-López, J., Reyes-Munguía, A., Carrillo-Inungaray, M. L., Cawood, M., Medina-Pérez, G., ... & Campos-Montiel, R. G. (2019). Influence of bioactive compounds incorporated in a nanoemulsion as coating on avocado fruits (*Persea americana*) during postharvest storage: Antioxidant activity, physicochemical changes and structural evaluation. Antioxidants, 8(10), 500. DOI: 10.3390/antiox8100500
- De Matos, S. P., Teixeira, H. F., De Lima, Á. A., Veiga-Junior, V. F., & Koester, L. S. (2019). Essential oils and isolated terpenes in nanosystems designed for topical administration: A review. Biomolecules, 9(4), 138.
- Du, D., Wang, J., Wang, B., Zhu, L., & Hong, X. (2019). Ripeness prediction of postharvest kiwifruit using a MOS e-nose combined with chemometrics. Sensors, 19(2), 419.
- Duong, T. H., Dinh, K. B., Luu, T., Chapman, J., Baji, A., & Truong, V. K. (2024). Nanoengineered sustainable antimicrobial packaging: Integrating essential oils into polymer matrices to combat food waste. International Journal of Food Science and Technology, 59(9), 5887-5901.
- Feszterová, M., Kowalska, M., & Mišíaková, M. (2023). Stability of vitamin C content in plant and vegetable juices under different storing conditions. Applied Sciences, 13(19), 10640.
- Hussein, S. A., Ghany, N. A. A., Nasser, M. A., & Bondok, A. (2025). Evaluating the Efficacy of Essential Oils and Chitosan in Reducing Post-Harvest Decay of Elmamora Winter Guava. International Journal of Research and Innovation in Applied Science, 10(4), 298-309.
- Jelali, N., Dhifi, W., Chahed, T., & Marzouk, B. (2011). Salinity effects on growth, essential oil yield and composition and phenolic compounds content of marjoram (*Origanum majorana* L.) leaves. Journal of Food Biochemistry, 35(5), 1443-1450. DOI: 10.1111/J.1745-4514.2010.00465.X
- Kaskatepe, B., Aslan Erdem, S., Ozturk, S., Safi Oz, Z., Subasi, E., Koyuncu, M., ... & Kosalec, I. (2022). Antifungal and anti-virulent activity of *Origanum majorana* L. essential oil on *Candida albicans* and in vivo toxicity in the *Galleria mellonella* larval model. Molecules, 27(3), 663.
- Kumar, D., Pandey, J., Kumar, P., & Raj, V. (2017). Psyllium mucilage and its use in pharmaceutical field: an overview. Curr Synthetic Sys Biol, 5(134), 2332-0737.
- Lastochkina, O., Aliniaieifard, S., SeifiKalhor, M., Bosacchi, M., Maslennikova, D., & Lubyanova, A. (2022). Novel approaches for sustainable horticultural crop production: advances and prospects. Horticulturae, 8(10), 910.
- Liguori, G., Greco, G., Gargano, F., Gaglio, R., Settanni, L., & Inglese, P. (2023). Effect of mucilage-based edible coating enriched with oregano essential oil on postharvest quality and sensorial attributes of fresh-cut loquat. Coatings, 13(8), 1387. DOI: 10.3390/coatings13081387
- Lucini Mas, A., F.I. Brigante, E. Salvucci, N.B. Pigni, M.L. Martinez, P. Ribotta, D .A. Wunderlin, and M.V. Baroni. 2020. Defatted chia flour as functional ingredient in sweet cookies. How do processing,

- simulated gastrointestinal digestion and colonic fermentation affect its antioxidant properties? Food Chem
- Mas, A. L., Brigante, F. I., Salvucci, E., Pigni, N. B., Martinez, M. L., Ribotta, P., ... & Baroni, M. V. (2020). Defatted chia flour as functional ingredient in sweet cookies. How do Processing, simulated gastrointestinal digestion and colonic fermentation affect its antioxidant properties?. Food Chemistry, 316, 126279.
- Miranda, M., Sun, X., Ference, C., Plotto, A., Bai, J., Wood, D., ... & Baldwin, E. (2021). Nano-and micro-carnauba wax emulsions versus shellac protective coatings on postharvest citrus quality. Journal of the American Society for Horticultural Science, 146(1), 40-49. DOI: 10.21273/jashs04972-20
- Natalini, A., Martinez-Diaz, V., Ferrante, A., & Pardossi, A. (2021). Effect of slicing and storage temperatures on biochemical aspects of membrane integrity in two different genotypes of tomato. Journal of the Science of Food and Agriculture, 101(14), 6134-6142.
- Noshad, M., Rahmati-Joneidabad, M., & Badvi, Z. (2019). Effects of natural mucilage as an edible coating on quality improvement of freshly-cut apples. Nutrition and food in health and disease, 6(2), 21-27.
- Oliveira Filho, J. G. D., Silva, G. D. C., Oldoni, F. C. A., Miranda, M., Florencio, C., Oliveira, R. M. D. D., ... & Ferreira, M. D. (2022). Edible coating based on carnauba wax nanoemulsion and *Cymbopogon martinii* essential oil on papaya postharvest preservation. Coatings, 12(11), 1700. DOI: 10.3390/coatings12111700
- Patel, D., Jha, A., & Shah, J. (2025). Technological Aspects of Nanoemulsions for Post-harvest Preservation of Fruits and Vegetables. Combinatorial Chemistry & High Throughput Screening, 28(4), 551-560.
- Paudel, P. N., Satyal, P., Satyal, R., Setzer, W. N., & Gyawali, R. (2022). Chemical composition, enantiomeric distribution, antimicrobial and antioxidant activities of *Origanum majorana* L. essential oil from Nepal. Molecules, 27(18), 6136.
- Pirozzi, A., Del Grosso, V., Ferrari, G., & Donsi, F. (2020). Edible coatings containing oregano essential oil nanoemulsion for improving postharvest quality and shelf life of tomatoes. Foods, 9(11), 1605.
- Purwanto, U. R. E., Syukur, M., Pebriani, T. H., & Nursofiatun, A. (2024). Nanoemulgel Formulation of Marjoram (*Origanum majorana* L.) Essential Oil with Potential as Anti-Inflammatory and Anti-Hyperuricemia. JPSCR: Journal of Pharmaceutical Science and Clinical Research, 9(2), 283-301.
- Radi, M., Akhavan-Darabi, S., Akhavan, H. R., & Amir, S. (2018). The use of orange peel essential oil microemulsion and nanoemulsion in pectin-based coating to extend the shelf life of fresh-cut orange. Journal of Food Processing and Preservation, 42(2), e13441. DOI: 10.1111/JFPP.13441.
- Razzaq, K., Khan, A. S., Malik, A. U., Shahid, M., & Ullah, S. (2014). Role of putrescine in regulating fruit softening and antioxidative enzyme systems in 'Samar Bahisht Chaunsa' mango. Postharvest Biology and Technology, 96, 23-32.
- Shehu, M. A., & Garba, U. M. (2025). Development of Nano Emulsion as an Edible Coating on Fresh Fruit and Vegetable for Postharvest Quality Evaluation. Journal of Health, Wellness and Safety Research.
- Suntornsuk, L., Gritsanapun, W., Nilkamhank, S., & Paochom, A. (2002). Quantitation of vitamin C content in herbal juice using direct titration. Journal of pharmaceutical and biomedical analysis, 28(5), 849-855.
- Tian, S., & Xu, H. (2023). Mechanical-based and optical-based methods for nondestructive evaluation of fruit firmness. Food Reviews International, 39(7), 4009-4039.
- Tolasa, M., Gedamu, F., & Woldetsadik, K. (2021). Impacts of harvesting stages and pre-storage treatments on shelf life and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Cogent food & agriculture, 7(1), 1863620.
- Umeohia, U. E., & Olapade, A. A. (2024). Physiological processes affecting postharvest quality of fresh fruits and vegetables. Asian Food Sci. J, 23(4), 115915.
- Vakili-Ghartavol, M., Arouiee, H., Golmohammadzadeh, S., Naseri, M., & Bandian, L. (2024). Influence of encapsulated peppermint essential oil on postharvest quality of *Solanum lycopersicum* cv. Santiago F1. International Journal of Vegetable Science, 30(3), 311-333.
- Won, J. S., Lee, S. J., Park, H. H., Song, K. B., & Min, S. C. (2018). Edible coating using a chitosan-based colloid incorporating grapefruit seed extract for cherry tomato safety and preservation. Journal of food science, 83(1), 138-146.
- Yang, T., Qin, W., Zhang, Q., Luo, J., Lin, D., & Chen, H. (2023). Essential-oil capsule preparation and its application in food preservation: A review. Food Reviews International, 39(7), 4124-4158.
- Improving the quality and shelf life of cherry tomato fruit 'Azar' using nanoemulsion containing Plantago psyllium mucilage and marjoram essential oil**

Abstract

Cherry tomato (*Solanum lycopersicum* cultivar Azar) is one of the most popular tomato varieties, highly valued for its small size, sweet taste, and versatile use in salads, dishes, and food garnishes. This fruit is not only visually appealing but also nutritionally rich, containing essential compounds such as vitamin C, which contribute to its high nutritional value. However, cherry tomatoes have a short postharvest life due to their susceptibility to microbial spoilage. Therefore, developing effective methods to preserve quality and extend the shelf life of this product is of great importance. In this context, the use of edible coatings, natural antimicrobial compounds, and nanoemulsion technology can be considered as promising approaches. This study aimed to investigate the effects of *Plantago psyllium* mucilage, marjoram essential oil, and their nanoemulsion combination on the physicochemical, microbial, and sensory characteristics of 'Azar' cherry tomatoes during 28 days of storage at 4°C. The results showed that the nanoemulsion containing *Plantago psyllium* mucilage and marjoram essential oil, with a particle size of 219.3 nm, zeta potential of -40.5 mV, and polydispersity index (PDI) of 0.184, formed the most stable system. This treatment significantly minimized weight loss (78.3%), retained the highest juice content (76%), and exhibited the lowest juice density (77.6%) compared to the control. It also effectively maintained vitamin C content (4.13 mg/g), titratable acidity (0.61 g/mL), and firmness. Additionally, the lowest electrolyte leakage and microbial load were observed in this treatment. The major components of marjoram essential oil were γ -terpinene (24.2%), o-cymene (20.1%), and carvacrol (16.9%), which played a key role in its antimicrobial and antioxidant activities. Sensory evaluation confirmed that the nanoemulsion preserved visual quality and flavor while preventing the damage caused by free essential oil. In conclusion, the use of **Plantago psyllium** mucilage nanoemulsion containing marjoram essential oil is proposed as an innovative and effective method to enhance the shelf life and maintain the quality of cherry tomatoes. This approach demonstrates significant potential for postharvest preservation while leveraging natural and sustainable technologies

Keywords: Electrolyte leakage, Nanoencapsulation, Perishability, Post-harvest quality, Shelf life

Extended Abstract

Introduction:

Cherry tomato is one of the most popular tomato varieties, widely appreciated for its small size, sweet flavor, and versatile use in salads, dishes, and as a food garnish. However, cherry tomatoes are highly perishable due to their high respiration rate and susceptibility to microbial and physical spoilage after harvest, leading to rapid quality deterioration. Therefore, developing effective methods to preserve quality and extend the storage life of this product is of great importance. In this regard, the use of edible coatings, natural antimicrobial compounds, and nanoemulsion technology can be considered as promising approaches. Recent advancements in nanotechnology have opened new possibilities for enhancing the efficacy of natural preservatives, particularly through improved stability and controlled release mechanisms.

Materials and Methods:

This study aimed to investigate the effects of *Plantago psyllium* mucilage, marjoram essential oil, and their combined nanoemulsion on the physicochemical, microbial, and sensory characteristics of cherry tomatoes during 28 days of storage at 4°C. Fruits were harvested at the physiological maturity stage. Following visual inspection and removal of defective specimens, uniformly sized and colored healthy fruits were selected based on strict criteria including absence of physical damage and uniform ripening stage. The fruits were washed with distilled water and surface-sanitized by immersion in sodium hypochlorite solution (2%) for one minute to eliminate surface microorganisms. For fungal inoculation, the tomatoes were immersed for one minute in a fungal spore suspension (10^5 conidia/mL) of the most common postharvest pathogens, then left at room temperature for 1-2 hours to allow fungal establishment. Subsequently, the fruits were treated by immersion in respective treatment solutions for 90 seconds with gentle agitation to ensure complete coverage. Finally, the treated fruits were placed in sterile, well-ventilated plastic containers and stored under refrigerated conditions (4 °C, 90% relative humidity) for 28 days. Their physicochemical properties were periodically evaluated at predetermined intervals (0, 7, 14, 21, and 28 days) using standardized analytical methods.

Results:

The results demonstrated that the simple effects of treatments, storage time, and their interaction had significant effects (at 1% and 5% probability levels) on most qualitative indices,

including weight loss, juice density, firmness, titratable acidity, vitamin C content, electrolyte leakage, microbial load, and sensory evaluation. The *Plantago psyllium* mucilage nanoemulsion containing marjoram essential oil, with a particle size of 219.3 nm, zeta potential of -40.5 mV, and polydispersity index (PDI) of 0.184, formed the most stable system. This treatment significantly minimized weight loss (78.3%), retained the highest juice content (76%), and exhibited the lowest juice density (77.6%) compared to the control, indicating superior moisture retention properties. It also effectively maintained fruit firmness (85% higher than control), vitamin C content (4.13 mg/g), and titratable acidity (0.61 g/mL), suggesting slowed metabolic activity. Additionally, the lowest electrolyte leakage (67.2%) and microbial load (1.83 log CFU/g) were observed in this treatment, demonstrating membrane integrity preservation and antimicrobial efficacy. The major components of marjoram essential oil were γ -terpinene (24.2%), o-cymene (20.1%), and carvacrol (16.9%), which played a key role in its antimicrobial and antioxidant activities as confirmed by GC-MS analysis and in vitro assays. Sensory evaluation by a trained panel confirmed that the nanoemulsion preserved visual quality and flavor while preventing the damage caused by free essential oil, with significantly higher acceptability scores ($p < 0.05$) for appearance, texture, and overall quality throughout the storage period.

Conclusion:

This study showed that using a nanoemulsion containing *Plantago psyllium* mucilage and marjoram essential oil significantly improved the quality and shelf-life of 'Azar' cherry tomatoes stored at 4°C. Nanoemulsion systems effectively protect active compounds and enhance targeted delivery, offering a sustainable alternative to traditional postharvest preservation methods. This approach helps reduce waste and maintain nutritional quality without synthetic additives. Future research should explore its application to other fruits, evaluate economic and production feasibility, and assess safety and regulatory issues. Overall, the findings highlight the potential of nanoemulsion technology to improve food preservation and support more sustainable agricultural practices.

Keywords: Electrolyte leakage, Nanoencapsulation, Perishability, Post-harvest quality, Shelf life