

Impact of Bacterial Cellulose Nanocrystals-Gelatin/Cinnamon Essential Oil Emulsion Coatings on the Mechanical Properties of Red Gold Nectarine Fruit during Shelf Life

Javad Tarighi*, Mohammad Tahmasebi, Mahsa Sadat Razavi

*Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

(Received: 03/01/2024; Accepted: 09/02/2024)

Abstract

Since the nectarine fruit is highly perishable due to its high moisture content and high respiration rate and difficult to store, in this research the effect of edible nano coating based on bacterial cellulose nanocrystals-fish gelatin/cinnamon essential oil (BCNCs/FGelA/CEO) containing different concentrations of essential oil (1200, 1800, and 2400 $\mu\text{L/L}$) were investigated on the mechanical properties of nectarine. The mechanical properties of nectarine fruit, including rupture force, rupture energy, deformation at the rupture point, and apparent elasticity modulus were evaluated during the cold storage period at 4 ± 1 °C for 60 days. The results of this research showed that, in generally, the coatings were able to delay the process of changes in the mechanical properties of Nectarine, and also, increasing the concentration of essential oil had a significant effect on improving the protective ability of the coating. At the end of 60 days of storage, the lowest amount of rupture force and energy, and the highest amount of deformation at rupture point, and apparent elasticity modulus were observed in control samples (14.67N, 50mJ, 6.82mm, and 0.18MP, respectively); In contrast, the highest amount of rupture force and energy, and lowest amount of deformation at rupture point, and apparent elasticity modulus correspond to samples coated with a coating containing 2400 $\mu\text{L/L}$ essential oil (40.33N, 120.98mJ, 5.56mm, and 0.62MP, respectively). These results demonstrated that this coating has commercial potential due to its highly effective ability to reduce tissue changes in Nectarine and increase its shelf life, as well as its ease of manufacture and efficacy as a biocompatible product for improving post-harvest storage of Nectarine.

Keywords: Cinnamon Essential Oil, Coating, Mechanical Properties, Fish Gelatin, Bacterial Cellulose, Nectarine, Nanocrystal

اثر پوشش نانو کریستال سلولز باکتریایی - ژلاتین ماهی حاوی اسانس دارچین بر خواص

مکانیکی میوه شلیل رقم ردگلد طی دوره نگهداری

جواد طریقی^{۱*}، محمد طهماسبی^۲، مهساسادات رضوی^۳

۱- استادیار، ۲- دانش‌آموخته دکتری، ۳- پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق

اردبیلی، اردبیل، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰)

چکیده

از آنجا که میوه شلیل به علت داشتن آب زیاد و سرعت تنفس بالا بسیار فسادپذیر است و نگهداری این میوه در انبارها مشکل است، در این تحقیق اثر نانو پوشش خوراکی بر پایه نانو کریستال سلولز باکتریایی - ژلاتین ماهی / اسانس دارچین (BCNCs-FGcIA/CEO) حاوی غلظت‌های مختلف اسانس (۱۲۰۰، ۱۸۰۰، و ۲۴۰۰ $\mu\text{L/L}$) بر خواص مکانیکی شلیل مورد بررسی قرار گرفت. خواص مکانیکی میوه شلیل شامل نیرو و انرژی گسیختگی، تغییر شکل در نقطه گسیختگی و همچنین مدول الاستیسیته ظاهری در طول دوره نگهداری سرد در دمای $4 \pm 1^\circ\text{C}$ ، به مدت ۶۰ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که به‌طور کلی پوشش‌ها قادر بودند فرآیند تغییرات خصوصیات مکانیکی شلیل را به تأخیر انداخته و همچنین افزایش غلظت اسانس تأثیر معنی‌داری بر قابلیت محافظتی پوشش داشت. در پایان ۶۰ روز نگهداری، کم‌ترین مقدار نیرو و انرژی گسیختگی و بیش‌ترین تغییر شکل در نقطه گسیختگی و مدول الاستیسیته ظاهری در نمونه‌های شاهد (به ترتیب برابر با $14/67\text{N}$ ، 50mJ ، $6/82\text{mm}$ و $0/18\text{MPa}$) مشاهده شد؛ در مقابل، بیش‌ترین مقدار نیرو و انرژی گسیختگی و کم‌ترین تغییر شکل در نقطه گسیختگی و مدول الاستیسیته ظاهری مربوط به نمونه‌های پوشش داده شده با پوشش حاوی ۲۴۰۰ میکرو لیتر بر لیتر اسانس (به ترتیب برابر با $40/33\text{N}$ ، $120/98\text{mJ}$ ، $5/56\text{mm}$ و $0/62\text{MPa}$) بود. نتایج حاصل نشان داد که این پوشش به علت کارایی بسیار مناسب در کاهش تغییرات بافت شلیل و افزایش ماندگاری آن و همچنین به دلیل سهولت سنتز و کارایی آن پتانسیل تجاری شدن توسط صنعت را دارد و می‌توان به‌عنوان یک محصول زیست سازگار به‌منظور افزایش قابلیت نگهداری پس از برداشت شلیل از آن استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: اسانس دارچین، پوشش، خواص مکانیکی، ژلاتین ماهی، سلولز باکتریایی، شلیل، نانو کریستال

۱- مقدمه

وزارت جهاد کشاورزی میزان تولید این محصولات در ایران ۵۹۱،۴۱۲ تن و سطح زیر کشت آن‌ها ۹۲،۸۵۲ هکتار می‌باشد [۳]. شلیل به علت داشتن آب زیاد و سرعت تنفس بالا بسیار فاسد شدنی است و در طول دوره پس از برداشت به‌سرعت میزان تولید اتیلن و در نتیجه میزان تنفس در بافت میوه افزایش یافته، رنگ و دیگر خصوصیات بیوشیمیایی و فیزیکی آن در طول دوره پس از برداشت تغییر کرده و به‌سرعت رو به زوال پیش می‌رود [۴]. علاوه بر آن، این محصول به علت بافت نرم آن مستعد آسیب‌های مکانیکی ناشی از ضربه و ارتعاش در طول زنجیره پس از برداشت است. هر گونه آسیب مکانیکی به بافت میوه بلافاصله منجر به اکسیداسیون ترکیبات فنلی توسط کاتکول اکسیداز می‌شود که نیاز به افزایش مصرف اکسیژن دارد. این اثر برای مدت طولانی در تنفس سلولی بافت مجاور ناحیه آسیب دیده باقی می‌ماند و متابولیسم کلی میوه را اصلاح نموده که به نوبه خود باعث تیره شدن آنزیمی، تولید اتوکاتالیستی اتیلن،

امروزه ضایعات پس از برداشت محصولات کشاورزی (به‌خصوص میوه‌ها و سبزی‌ها) در کشور ایران یکی از معضلات مهمی است که ضمن نابودی بخش زیادی از محصول تولیدی، از ارزش صادرات و بازاریابی آن نیز می‌کاهد و سالیانه بخش زیادی از محصول تولیدی (حدود ۴۰ درصد) در اثر فساد پس از برداشت از بین می‌رود [۱]. در بین مهم‌ترین محصولات باغی تولیدی در ایران می‌توان به هلو و شلیل اشاره کرد.

شلیل (*Prunus persica* L.) میوه‌ای فرازگرا^۱ با الگوی رسیدن فیزیولوژیکی مشابه هلو است [۲]. بر طبق آمار منتشره از سوی

ژلاتین یکی از پلیمرهای زیست سازگار و خوراکی است که در مطالعات متعددی به عنوان پوشش خوراکی محصولات مورد بررسی قرار گرفته است و یک پروتئین زیست تخریب پذیر حیوانی محلول در آب بوده و از ظرفیت تشکیل فیلم و توانایی تورم بسیار بالایی برخوردار است [۱۷ و ۱۸]. علاوه بر این، فیلم‌ها و پوشش‌های مبتنی بر ژلاتین به طور کلی دارای خواص نوری خوب و ممانعت از اکسیژن بسیار عالی هستند [۱۸ و ۱۹]. با این حال، استفاده از فیلم‌ها و پوشش‌های مبتنی بر ژلاتین خالص به دلیل ماهیت آبدوست آن، دارای خواص ممانعت از عبور رطوبت ضعیفی هستند [۲۰]. با این حال با افزودن مواد آب‌گریز نظیر اسانس‌های گیاهی [۱۹] و همچنین الیاف سلولزی [۲۱] می‌توان این مشکل را برطرف نمود.

از طرف دیگر از آنجایی که پلیمرهای خوراکی اغلب در کنترل عوامل فساد میکروبی ناتوان بوده و در برخی موارد خود موجب رشد بیشتر قارچ‌ها و باکتری‌ها می‌شوند، نیاز حیاتی دیگر برای پوشش‌های خوراکی وجود یک ماده ضد میکروبی در آن‌ها است. فیلم‌های خوراکی پوشش داده شده با ترکیبات ضد میکروبی باید محافظت مداوم در برابر عوامل میکروبی را در طول نگهداری از طریق پروفایل آزاد سازی طولانی مدت عامل ضد میکروبی ایجاد کنند [۲۲]. اسانس‌ها و عصاره‌های گیاهی از این نظر ایده آل به نظر می‌رسند [۲۳]. تاکنون تحقیقات متعددی در رابطه با به کارگیری اسانس‌ها و عصاره‌های گیاهی به عنوان عوامل کنترل آلودگی محصولات کشاورزی و غذایی انجام یافته است.

در مطالعات قبلی، پوشش‌های امولسیون مبتنی بر اسانس دار چین (CEO) تعبیه شده در نانو الیاف سلولز باکتریایی (BCNCs) و تثبیت شده توسط ژلاتین ماهی (GelA) توسعه یافتند و ویژگی‌های تشکیل فیلم آن‌ها عمیقاً بررسی شد [۱۹، ۲۴ و ۲۵]. جالب توجه است که پوشش‌های حاوی نانو کریستال سلولز (CNC^۱) برای میوه در طول فرآیند پس از برداشت نسبتاً جدید هستند. تحقیقات متعددی در مورد کاربرد بالقوه پوشش‌های مبتنی بر CNC روی میوه‌ها انجام شده که در این بین می‌توان به پوشش گلابی بارتلت با پیکرینگ امولسیون و CNC ترکیب شده با کیتوزان [۲۶]، توت فرنگی با پکتین سیب، CNC و اسانس علف لیمو [۲۷] و کامپوزیت کیتوزان-نانوسلولز [۲۸] و میوه آسرولا با آلژینات تقویت شده پوره آسرولا [۲۹] اشاره کرد. به طور کلی، بر اساس نتایج حاصل از مطالعات فوق، CNC‌ها می‌توانند به طور سودمندی برای تولید پوشش‌های خوراکی برای طولانی تر کردن ماندگاری پس از برداشت میوه استفاده شوند. با این حال متأسفانه، مکانیسم‌های اصلی

تسریع از دست دادن رطوبت و آسیب پذیری بافت در برابر عفونت‌های قارچی می‌شود [۵]. از مهم‌ترین عوامل قارچی بیماری‌زا پس از برداشت شلیل *Monilinia laxa*، *Botrytis cinerea* و *Aspergillus spp.* [۶] و *Penicillium spp.* [۷] است. این وضعیت، جابه‌جایی و انتقال این محصول را به مراکز فروش را دچار مشکل کرده است. به طوری که از زمان برداشت تا مصرف این میوه‌ها مقدار قابل توجهی از محصول تلف شده و یا به دلیل افت شدید کیفیت، به بهای نازلی فروخته می‌شود. به همین علت، شرایط خاصی برای حفظ کیفیت بهینه آن در حین نگهداری در انبار لازم است [۸].

صنعت شلیل به شدت به فناوری‌های پس از برداشت به عنوان ابزاری برای به حداکثر رساندن پتانسیل اقتصادی آن متکی است. این فناوری‌ها برای کاهش میزان رسیدن و/یا ایجاد مقاومت نسبت به تنش‌های مکانیکی عمل نموده و ممکن است شامل بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده، نگهداری در دمای پایین، بسته‌بندی فعال و هوشمند و تیمار با عوامل شیمیایی مانند نیتریک اکسید، دی‌اکسید کلر، سالیسیلیک اسید و ۱-متیل سیکلوپروپان باشد [۹ و ۱۰]. با این حال اگرچه این فناوری‌ها در افزایش ماندگاری محصولات مؤثر بوده‌اند، اما هنوز برخی مضرات ناشی از استفاده از آن‌ها وجود دارد [۱۱]. دمای پایین سردخانه به تنهایی قادر به کنترل بیماری‌های قارچی نیست و منجر به بروز علائم سرمازدگی می‌شود [۱۰]؛ همچنین غلظت بالای دی‌اکسید کربن در بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده، موجب کاهش ترکیبات معطر، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و محتوای آنتوسیانین کل در میوه می‌شود [۱۲]. بسته‌بندی متداول معمولاً شامل مقادیر زیادی مواد یک‌بار مصرف و تجزیه ناپذیر مانند کیسه‌ها و روکش‌های پلاستیکی است [۱۳] که استفاده از این عوامل شیمیایی، نامطلوب تلقی می‌شود و لذا مصرف کنندگان به دنبال غذاهای ایمن تر و سالم تر با افزودنی‌ها و عوامل مصنوعی کم‌تر هستند [۱۴]. علاوه بر این، چروکیدگی در بسیاری از محصولات با وجود استفاده از بسته‌بندی مانند کیسه‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) همچنان یک چالش پس از برداشتی است [۱۵]. از این رو استفاده از پوشش‌های زیست تخریب پذیر و خوراکی ممکن است یک راهکار بسیار خوب به منظور رهایی از این مشکلات باشد.

پوشش‌های خوراکی به عنوان لایه نازکی از مواد خوراکی تشکیل شده در سطح ماده غذایی و با قرار داده شده بین اجزای آن‌ها، تعریف شده است. این پوشش‌ها قادرند با کاهش سرعت خروج رطوبت و ترکیبات فرار و نرخ تنفس موجب به تأخیر انداختن تغییرات خواص کیفی محصول ناشی از فعالیت‌های فیزیولوژیک شوند [۱۶].

^۱Cellulose Nanocrystals

به صورت قطره قطره به محلول اضافه شد تا در نهایت امولسیون با غلظت‌های ۱۲۰۰، ۱۸۰۰، و ۲۴۰۰ $\mu\text{L/L}$ اسانس، ۳ درصد ژلاتین، و ۰/۰۶ درصد BCNCs حاصل شود [۲۴].

۲-۳- پوشش دهی نمونه‌ها

بدین منظور میوه‌هایی از نظر شکل و رنگ یکنواخت و بدون هیچ‌گونه نشانه‌ای از آسیب‌های مکانیکی و یا پوسیدگی قارچی انتخاب و قبل از انجام آزمایشات با آب مقطر شستشو و سپس میوه‌های شسته شده با محلول هیپوکلرید سدیم ۰/۰۵ درصد به مدت یک دقیقه ضد عفونی و خشک شدند. پس از آن، شلیل‌ها در محلول‌های پوشش با غلظت‌های مختلف اسانس (۰، ۱۲۰۰، ۱۸۰۰، و ۲۴۰۰ $\mu\text{L/L}$) به مدت ۱۵ ثانیه و در دمای محیط غوطه‌ور شدند. در نهایت نمونه‌ها به ۴ دسته ۱۲ تایی شامل شاهد فاقد اسانس (C0)، غلظت ۱۲۰۰ (C1200)، غلظت ۱۸۰۰ (C1800) و غلظت ۲۴۰۰ (C2400) گروه‌بندی شدند. نمونه‌ها در زیر هود شیمیایی و دمای محیط به مدت ۱۲ ساعت برای خشک شدن پوشش قرار گرفتند. همچنین، از شلیل‌های فاقد پوشش برای نمونه‌های روز صفر استفاده شد. در طول دوره نگهداری (دمای $1 \pm 4^\circ\text{C}$ ، رطوبت ۸۰-۸۵ درصد، به مدت ۶۰ روز)، شلیل‌ها درون سبدهای پلاستیکی و بر روی شانه‌های مخصوص شلیل گذاشته و نهایتاً درون کارتن‌های کاغذی نگهداری شدند. در بازه زمانی‌های ۲۰ روز، اندازه‌گیری خواص مکانیکی آن‌ها انجام گرفت.

۲-۴- آزمون مکانیکی

جهت تعیین خواص مکانیکی میوه شلیل، آزمون بارگذاری فشاری تک محوری شبه استاتیک و منحنی نیرو - تغییر شکل مستخرج از این آزمون مورد استفاده قرار گرفت. این آزمون‌ها به وسیله دستگاه آزمون کشش- فشار سنتام مدل STM 20، در آزمایشگاه خواص بیوفیزیک گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه محقق اردبیلی صورت گرفت. این دستگاه مجهز به لودسل BONGUSHIN مدل ۱۰۰-DBBP با ظرفیت ۱۰۰kN و یک جفت فک ثابت (فک پایین) و متحرک (فک بالا) و به صورت مسطح بود. برای انجام آزمون، ۴ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵mm در ارتفاع ۱۵mm، از ناحیه استوایی هر میوه به دست آمد (شکل ۱-الف). اندازه نمونه مشخص شده به این علت انتخاب شد که در آزمون فشاری ارتفاع نمونه مورد آزمایش باید برابر یا کمتر از قطر آن باشد؛ در غیر این صورت، آزمون به دلیل کماتش، قابلیت تکرار کمتری پیدا می‌کند [۳۵]. پس از تهیه نمونه‌های استوانه‌ای، هر یک از نمونه‌ها تا مرحله شکست مورد آزمایش قرار گرفت و نمودار نیرو- تغییر شکل (شکل ۱-ب) با سرعت 3.0 mm.min^{-1} [۵] تحت بارگذاری فشاری برای هر نمونه به دست آمد.

با استفاده از منحنی نیرو- تغییر شکل بدست آمده برخی خواص مکانیکی نمونه‌ها شامل نیروی گسیختگی، تغییر شکل در

CNCها به عنوان ترکیبات کلیدی در پوشش‌های غذایی، به‌ویژه برای انواع مختلف میوه، هنوز نامشخص است و از این رو، نیاز به درک بهتر دارد [۲۶]. از سوی دیگر، در پژوهش‌های بسیاری خواص مکانیکی محصولات مختلف مانند ارقام مختلف سیب [۳۰]، پسته وحشی [۳۱]، هلو [۵] و تمشک [۳۲] مورد ارزیابی قرار گرفته است؛ با این حال تاکنون تاثیر پوشش‌های خوراکی بر این خواص کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است؛ لذا از آنجایی که در پژوهش قبلی اثر بخشی پوشش‌های BCNCs-GelA/CEO بر افزایش عمر پس از برداشت سیب رقم رددلیشز به خوبی به اثبات رسید [۳۳] در این پژوهش اثر بخشی این پوشش‌ها بر برخی خواص مکانیکی شلیل طی یک دوره انبارداری سرد در دمای 4°C به مدت ۶۰ روز به عنوان یه نمونه دیگر از محصولات فرازگرا بررسی شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- تهیه پوشش

تهیه امولسیون‌های BCNC/GelA-CEO یک روش سه مرحله ای بود. مرحله اول شامل به دست آوردن BCNCها از سلولز باکتریایی با اندازه بزرگ با هیدرولیز اسیدی با استفاده از اسید سولفوریک بود [۳۴]. 0.914 g BC خشک به $6/226 \text{ g}$ گرم آب مقطر و 100 g گرم اسید سولفوریک ۵۰ درصد (w/w) اضافه شد. ذرات جامد به طور مساوی با استفاده از هموژنایزر DI 25 با پروب (Ika-Werke GmbH & Co, Stanfen, German) S25 N-18 G در 9500 دور در دقیقه به مدت ۳ دقیقه پراکنده شدند. واکنش هیدرولیز با هم زدن در دمای 55°C به مدت ۲ ساعت در 800 دور در دقیقه انجام شد. پس از آن، سوسپانسیون به مدت ۵۰ دقیقه در 8000 دور در دقیقه گریز از مرکز (LISA, Château-Gontier, France) شد تا حذف اسید سولفوریک اضافی تسهیل شود. پس از سانتریفیوژ، مایع رویی با آب مقطر جایگزین شد. پس از ۵ سیکل شستشو، اسید اضافی با استفاده از لوله‌های دیالیز که در داخل یک لیوان حاوی آب مقطر قرار داده شده بود، حذف شد. آب هر ۴ ساعت تا زمانی که pH محلول برابر ۵ باشد تعویض شد. در این مرحله، محلول آبی BCNC در یک بشر قرار داده شد و به مدت ۵ دقیقه با استفاده از دستگاه اولتراسونیکاتور مدل UP200St (Hielscher, Teltow, Germany) 200W , 26 kHz با یک سونوترود تیتانیوم S26d7D (مساحت سطح 42 m^2 تقریباً در 20 وات (پالس: 25% و دامنه 30%) برای رسیدن به پراکندگی کامل نانوکریستال اولتراسونیک شدند. نمونه‌ها در محلول BCNC $0/4$ درصد وزنی (بر اساس مواد خشک) تهیه و تا انجام باقی مراحل در دمای 4°C نگهداری شدند. سپس ابتدا سوسپانسیون BCNCs با غلظت $0/4$ درصد (w/w) تهیه شد. سپس، مقادیر مختلف اسانس دارچین (۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و $2400 \mu\text{L}$) به آن افزوده شد. سپس ژلاتین ماهی

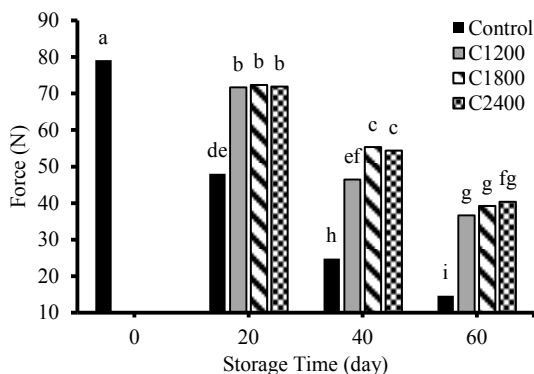
۵-۲- تجزیه و تحلیل آماری

خواص مکانیکی شلیل تحت بارگذاری فشاری تک محوری شبه استاتیک در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با دو عامل شامل چهار سطح دوره نگهداری (۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ روز) و چهار سطح پوشش (C0، C1200، C1800 و C2400) با سه تکرار و هر تکرار شامل چهار نمونه استوانه‌ای استخراج شده از ناحیه استوایی یک میوه بررسی شد. تجزیه واریانس نتایج با آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی صورت گرفت و سپس مقایسه میانگین اثرات اصلی و متقابل با آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن و با استفاده از نرم افزار SAS9.2 انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۱-۳- نیروی گسیختگی

براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس نیروی گسیختگی، اثرات اصلی نوع پوشش و زمان نگهداری و همچنین اثر متقابل این عوامل اثر معنی‌داری بر نیروی گسیختگی شلیل در سطح احتمال ۱ درصد داشتند (جدول ۱). نیروی گسیختگی با افزایش زمان نگهداری کاهش یافت. به نظر می‌رسد رادیکال‌های تشکیل شده توسط تنفس هوازی (مانند سوپر اکسید و اکسید نیتریک) دیواره سلولی را ضعیف کرده و پکتین دیواره را برای پکتیناز قابل دسترس می‌کند و موجب کاهش نیروی گسیختگی طی دوره نگهداری می‌شود [۳۷]. پوشش‌ها بدلیل کاهش شدت تنفس، تغییر اتمسفر اطراف محصول و داشتن خاصیت میکروبی از فساد میوه جلوگیری نموده و بدین طریق به حفظ سفتی بافت میوه کمک نمودند. از سوی دیگر، افزایش غلظت اسانس، همان‌طور که انتظار می‌رفت، به‌دلیل کاهش نرخ تنفس، توانست سفتی بافت میوه را بیشتر از نمونه‌های شاهد حفظ کند. (شکل ۲). این نتایج هم‌راستا با گزارشات سایر محققین در رابطه با تأثیر دوره نگهداری بر خواص مکانیکی هلو [۵] و تمشک [۳۲] و همچنین تأثیر فیلم‌ها و پوشش‌های مختلف بر خواص مکانیکی خرمالو طی دوره نگهداری [۳۸] است.



شکل (۲): اثر نوع پوشش و زمان نگهداری بر نیروی گسیختگی شلیل

نقطه گسیختگی، انرژی گسیختگی و مدول الاستیسیته ظاهری تعیین شدند. سطح زیر نمودار نیرو-تغییر شکل از نقطه شروع بارگذاری تا نقطه گسیختگی میوه، مقدار انرژی گسیختگی (Eb) را تعیین می‌کند. یک روش برای محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-تغییر شکل تا لحظه‌ی گسیختگی تقسیم این بازه به دوزنقه‌های کوچک و محاسبه‌ی مساحت دوزنقه‌ای ایجاد شده است که در نهایت با جمع کردن کلیه مقادیر مساحت‌ها، انرژی گسیختگی به دست می‌آید (انتگرال‌گیری کل سطح زیر منحنی به روش دوزنقه). مدول الاستیسیته ظاهری نیز از رابطه (۱) به دست آمد [۳۶]:

$$E = \frac{FL_0}{A_0\Delta L} \quad (1)$$

که در این رابطه:

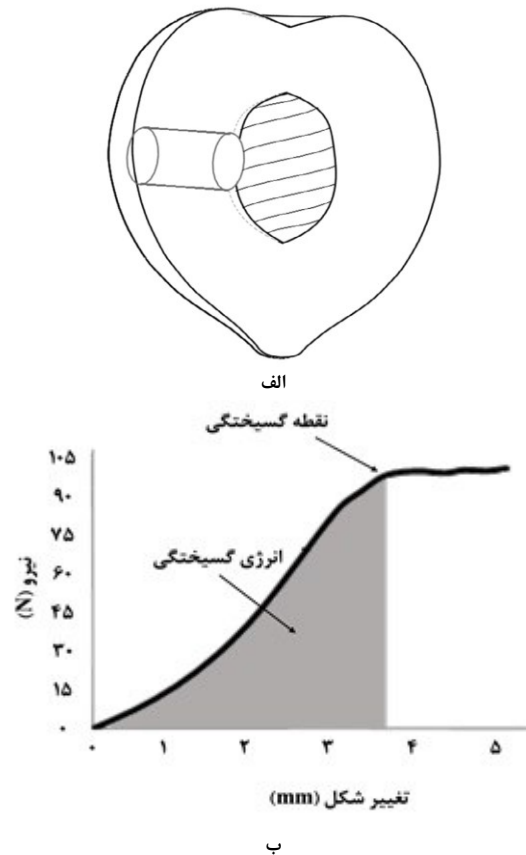
E مدول الاستیسیته ظاهری (MPa)

F نیروی حد الاستیک (N)

L₀ طول اولیه نمونه (mm)

A₀ سطح مقطع اولیه نمونه (mm)

ΔL تغییر شکل نمونه در حد الاستیک (mm) است.



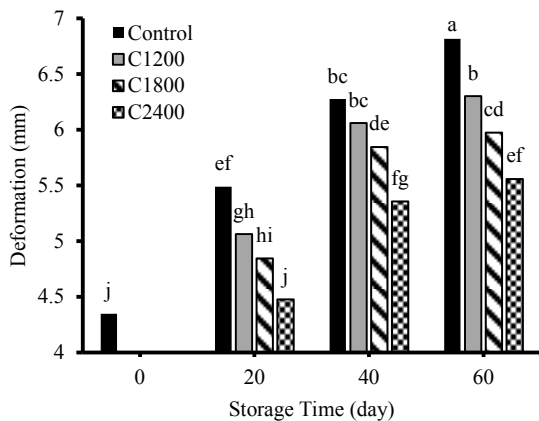
شکل (۱): (الف) طرح‌واره نمونه مورد استفاده جهت استخراج خصوصیات مکانیکی شلیل فشاری (ب) نمودار نیرو-تغییر شکل تحت بارگذاری

جدول (۱): نتایج تجزیه واریانس خواص مکانیکی شلیل

میانگین مربعات					
منابع تغییر	درجه آزادی	نیروی گسیختگی	تغییر شکل در نقطه گسیختگی	انرژی گسیختگی	مدول الاستیسیته ظاهری
نوع پوشش (P)	۳	۱۰۸۴/۳۰**	۰/۴۸۲**	۶۷۰۷/۲**	۹۵۵/۵۹**
زمان نگهداری (T)	۳	۵۱۷۴/۸۷**	۷/۵۸۸**	۱۴۰۳۶/۲**	۱۹۹۹/۷۰**
P×T	۹	۱۲۹/۸۵**	۰/۰۹۲**	۸۷۲/۳**	۱۲۴/۲۸**
خطا	۳۲	۴/۴۸	۰/۰۵۸	۳۵/۹**	۵/۱۲**
کل	۴۷				

** اثر معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد

۳-۲- تغییر شکل در نقطه گسیختگی



شکل (۳): اثر نوع پوشش و زمان نگهداری بر تغییر شکل در نقطه گسیختگی شلیل

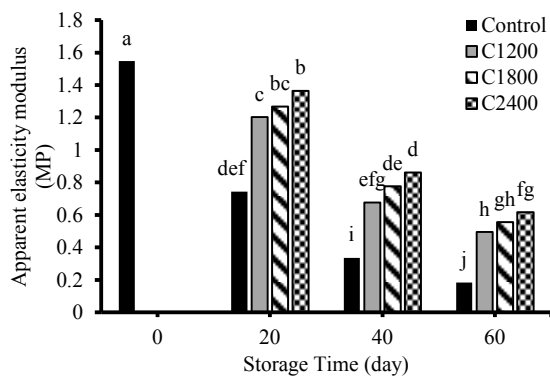
۳-۳- انرژی گسیختگی

نتایج تجزیه واریانس تغییرات انرژی گسیختگی شلیل در جدول (۱) نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل نوع پوشش و زمان نگهداری و همچنین اثر متقابل این عوامل اثر معنی داری بر انرژی گسیختگی شلیل در سطح احتمال ۱ درصد داشتند. میزان انرژی گسیختگی به صورت معنی داری برای هر دو دسته تیمار شاهد و پوشش داده شده در طول ۶۰ روز نگهداری مشاهده شد. همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده، بعد از ۶۰ روز میزان انرژی گسیختگی برای نمونه‌های شاهد، کم‌تر از نمونه‌های پوشش داده شده بود. با این حال بین نمونه‌های پوشش داده شده تنها در روز ۶۰م نگهداری، اختلاف معنی داری بین تیمار C1200 با دو تیمار دیگر وجود داشت و در سایر زمان‌ها این اختلاف معنی دار نبود. گزارش شده است که انرژی گسیختگی در طی رسیدن و نگهداری میوه به دلیل تخریب دیواره سلول‌های پارانشیمی کاهش می‌یابد. علاوه‌براین، انرژی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای تغییر شکل در نقطه گسیختگی شلیل در جدول (۱) نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل اثرات اصلی نوع پوشش و زمان نگهداری و همچنین اثر متقابل این عوامل اثر معنی داری بر نیروی گسیختگی شلیل در سطح احتمال یک درصد داشتند. بر اساس نتایج مقایسه شده است، با افزایش زمان نگهداری میزان تغییر شکل در نقطه گسیختگی افزایش یافت، با این حال این روند افزایشی در تمام طول دوره نگهداری در نمونه‌ها شاهد شدیدتر بود، از طرف دیگر افزایش غلظت اسانس در پوشش موجب کندتر شدن این روند افزایشی شد. از آنجایی که نگهداری محصول با کاهش وزن از طریق کاهش محتوای رطوبتی محصول همراه است [۳۹]، بنابراین افزایش میزان تغییر شکل در گسیختگی با گذشت زمان نگهداری را می‌توان به لزوم نیروی گسیختگی بیشتر برای ایجاد تغییر شکل در میوه به علت وجود فضای متخلخل بیش‌تر [۴۰] و همچنین آماسیدگی^۱ بالاتر در ابتدای دوره نگهداری [۴۱] نسبت داد. همچنین به نظر می‌رسد تأثیر پوشش‌ها بر فشار اسمزی و تعادل رطوبت در بافت محصول ناشی از کاهش انتقال بخار آب از داخل میوه و از طریق سطح به‌دلیل تشکیل غشای نیمه تراوا [۴۲] علت کندتر شدن این روند افزایشی با افزایش غلظت اسانس در نمونه‌های پوشش داده شده باشد. نتایج مشابه در رابطه با تأثیر بسته‌بندی‌ها و پوشش‌های مختلف بر خواص مکانیکی خرمالو طی دوره نگهداری [۳۸] توسط سایر محققین گزارش شده است.

^۱ Turgor pressure

نمونه‌های پوشش داده شده بود، همچنین افزایش غلظت اسانس در پوشش موجب کندتر شدن این روند کاهش در طی دوره نگهداری محصول شد. خواص مکانیکی شلیل را می‌توان با برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و ساختاری مانند فشار آماسیدگی سلولی مرتبط دانست [۴۸]؛ همچنین گزارش شده است که مدول الاستیسیته ظاهری ارتباط نزدیکی با محتوای رطوبتی جسم مورد مطالعه دارد [۴۹]؛ از سوی دیگر، کاهش مدول الاستیسیته ظاهری ممکن است به دلیل تخریب و تبدیل نشاسته به قندهای محلول (SSC) باشد [۵]. بنابراین از آنجایی که افزایش SSC تحت تأثیر فرآیندهای کاتابولیک مانند تنفس و تبدیل پلی-ساکاریدهای با زنجیره بلندتر نظیر نشاسته و همی سلولز به قندهای ساده در نتیجه پیری محصول است [۵۰]؛ بنابراین به نظر می‌رسد پوشش‌های مورد مطالعه با سرکوب تنفس و کاهش نرخ تبادل CO_2 و O_2 محصول و محیط و ایجاد یک غشا نیمه‌تراوا بر سطح محصول موجب کاهش سرعت فرآیندهای متابولسمی مرتبط با پیری محصول [۴۶] در نتیجه کندتر شدن روند کاهش مدول الاستیسیته ظاهری شده‌اند. از سوی دیگر ارتباط مستقیم میزان کاهش رطوبت و غلظت اسانس در پوشش [۵۱] عامل تفاوت در میزان مدول الاستیسیته ظاهری در نمونه‌های پوشش داده شده با پوشش‌های مختلف باشد. نتایج مشابه در مورد تأثیر پوشش‌های خوراکی بر پایه پولولان [۵۲] و بسته بندی بر پایه نانوکامپوزیت و پوشش کیتوزان بر ویژگی‌های مکانیکی توت فرنگی [۵۳] در طول نگهداری گزارش شده است.

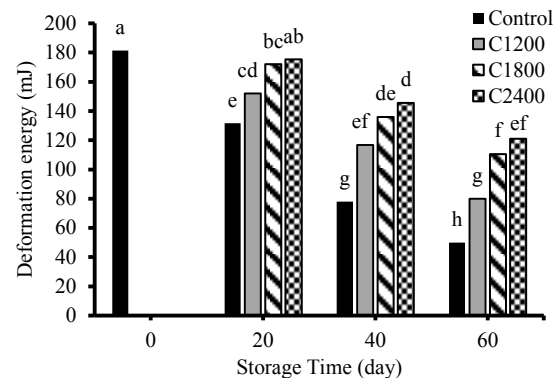


شکل (۵): اثر نوع پوشش و زمان نگهداری بر مدول الاستیسیته ظاهری شلیل

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که پوشش‌های امولسیون BCNCs-GelA/CEO در افزایش ماندگاری شلیل در طی نگهداری سرد تأثیر مهمی دارند. تجزیه و تحلیل‌های مکانیکی نشان داد که به‌طور کلی پوشش‌ها قادر هستند فرآیند تغییرات خصوصیات مکانیکی شلیل را به تأخیر انداخته و تأثیر افزایش غلظت اسانس تأثیر بر بهبود قابلیت پوشش را به شکل معنی

گسیختگی تحت تأثیر استحکام دیواره سلولی، تماس سلول با سلول و آماسیدگی سلولی است [۴۱]. با رسیدگی پس از برداشت، آنزیم‌های تجزیه کننده دیواره سلولی مانند بتاگالاکتوزیداز، پلی‌گالاکتوروناز و پکتین متیل استراز چسبندگی سلول به سلول و استحکام مکانیکی دیواره سلولی و در نتیجه میزان انرژی لازم برای گسیختگی را کاهش می‌دهند [۴۳]. این آنزیم‌ها برای عملکرد نیاز به اکسیژن دارند [۴۴]. ژلاتین و سایر پلیمرهای زیستی به‌عنوان یک مانع نیمه‌تراوا و انتخابی برای گازها عمل نموده و با کاهش میزان تنفس و در نتیجه فعالیت آنزیم‌های تجزیه کننده دیواره سلولی موجب کاهش تخریب فیزیولوژیک می‌شوند [۸]. همچنین فعالیت میکروارگانیزم‌های بیماری‌زا نظیر *Botrytis cinerea* و *Rhizopus stolonifer* با تجزیه و تخریب دیواره سلولی یکی دیگر از علل کاهش میزان صلابت و در نتیجه کاهش انرژی گسیختگی در شلیل است [۴۵]. بنابراین وجود اسانس در پوشش، میزان رشد عوامل بیماری‌زا را مهار نموده و در نتیجه انرژی گسیختگی با روند کندتری کاهش یافت. این نتایج با یافته‌های قبلی در خصوص بررسی اثر بسته بندی توت‌فرنگی با فیلم کامپوزیتی بر پایه پلی وینیل الکل، نشاسته، فرمالدئید و آلایل ایزوتیوسیانات [۴۶] و همچنین ارزیابی تأثیر دوره نگهداری بر خواص مکانیکی گلابی و سیب [۴۷] مطابقت دارد.



شکل (۴): اثر نوع پوشش و زمان نگهداری بر انرژی گسیختگی شلیل

۳-۴- مدول الاستیسیته ظاهری

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس مدول الاستیسیته ظاهری شلیل که در جدول (۱) نشان داده شده است؛ نوع پوشش و زمان نگهداری و همچنین اثر متقابل این عوامل اثر معنی‌داری بر انرژی گسیختگی شلیل در سطح احتمال ۱ درصد داشتند. همچنین بر اساس نتایج مقایسه میانگین مشاهده شد که با افزایش زمان نگهداری میزان مدول الاستیسیته ظاهری نمونه‌ها کاهش یافت، با این حال این روند کاهش در تمام طول دوره نگهداری در نمونه‌های شاهد به شکل معنی‌داری بیشتر از

- air or air+20 kPa CO₂,” *Postharvest Biol Technol*, vol. 27, no. 2, pp. 171–183, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/s0925-5214\(02\)00059-5](https://doi.org/10.1016/s0925-5214(02)00059-5).
- [13] E. Tavassoli-Kafrani, H. Shekarchizadeh, and M. Masoudpour-Behabadi, “Development of edible films and coatings from alginates and carrageenans,” *Carbohydr Polym*, vol. 137, pp. 360–374, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.074>.
- [14] H. Arnon-Rips and E. Poverenov, “Improving food products’ quality and storability by using Layer by Layer edible coatings,” *Trends Food Sci Technol*, vol. 75, pp. 81–92, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.003>.
- [15] I. Kritzing, K. I. Theron, G.F.A. Lötze, and E. Lötze, “Peel water vapour permeance of Japanese plums as indicator of susceptibility to postharvest shriveling,” *Sci Hortic*, vol. 242, pp. 188–194, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.07.033>.
- [16] N. Gontard, R. Thibault, B. Cuq, and S. Guilbert, “Influence of Relative Humidity and Film Composition on Oxygen and Carbon Dioxide Permeabilities of Edible Films,” *J Agric Food Chem*, vol. 44, no. 4, pp. 1064–1069, 1996, doi: <https://doi.org/10.1021/jf9504327>.
- [17] Z. A. M. Adilah, B. Jamilah, and Z. A. Nur Hanani, “Functional and antioxidant properties of protein-based films incorporated with mango kernel extract for active packaging,” *Food Hydrocoll*, vol. 74, pp. 207–218, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.08.017>.
- [18] K. Nilsuwan, S. Benjakul, and T. Prodpran, “Properties, Microstructure and Heat Seal Ability of Bilayer Films Based on Fish Gelatin and Emulsified Gelatin Films,” *Food Biophys*, vol. 12, no. 2, pp. 234–243, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s11483-017-9479-2>.
- [19] 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, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11483-021-09696-6>.
- [20] C. Xia, W. Wang, L. Wang, H. Liu, and J. Xiao, “Multilayer zein/gelatin films with tunable water barrier property and prolonged antioxidant activity,” *Food Packag Shelf life*, vol. 19, pp. 76–85, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodpsl.2018.12.004>.
- [21] 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, 35-51, 2023, (In Persian).
- [22] D. Mishra, P. Khare, D. K. Singh, S. Luqman, P. V. A. Kumar, A. Yadav, T. Das, B. K. Saikia, “Retention of antibacterial and antioxidant properties of lemongrass oil loaded on cellulose nanofibre-poly ethylene glycol composite,” *Ind Crops Prod*, vol. 114, pp. 68–80, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.077>.
- [23] P. Tripathi, N. K. Dubey, and A. K. Shukla, “Use of some essential oils as post-harvest botanical fungicides in the management of grey mould of grapes caused by *Botrytis cinerea*,” *World J Microbiol Biotechnol*, vol. 24, no. 1, pp. 39–46, 2007, doi: <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9435-2>.
- [24] M. S. Razavi, A. Golmohammadi, A. ematollahzadeh, F. Fiori, C. Rovera and S. Farris, “Preparation of cinnamon essential oil emulsion by bacterial cellulose nanocrystals and fish gelatin,” *Food Hydrocoll*, vol. 109, pp. 106111, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106111>.
- [25] A. Golmohammadi, M. 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, pp. 1360–1360, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13081360>.
- [26] 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>.
- داری مشاهده کرد. بنابراین به نظر می‌رسد این پوشش از یک سو به علت کارایی بسیار مناسب در کاهش تغییرات بافت شلیل و در نتیجه افزایش ماندگاری آن و از سوی دیگر به دلیل سهولت ساخت و کارایی، این نوع پوشش پتانسیل تجاری شدن به عنوان یک محصول زیست سازگار با محیط زیست به منظور افزایش قابلیت نگهداری پس از برداشت شلیل را دارد.

۵- مراجع

- [1] Y. Feyzollahi, A. Golmohammadi, A. Nematollahzadeh, and M. Tahmasebi, “Evaluation the effect of biodegradable active packaging based on Zein containing Zataria multiflora essential oil on postharvest shelf life of strawberry,” *Innov Food Technol*, vol. 9, no, pp. 2113-127, 2022, doi: <https://doi.org/10.22104/jift.2021.5248.2071> (In Persian).
- [2] M. Serrano, D. Martínez-Romero, S. Castillo, F. Guillén, and D. Valero, “Effect of preharvest sprays containing calcium, magnesium and titanium on the quality of peaches and nectarines at harvest and during postharvest storage,” *J Sci Food Agric*, vol. 84, no. 11, pp. 1270–1276, 2004. Doi: <https://doi.org/abs/10.1002/jsfa.1753>.
- [3] K. Ahmadi, H. Ebadzadeh, F. Hatami, R. Hosseinpour, and H. Abdshahi, “Agricultural statistics for 2018, volume three: garden products,” Ministry of Jihad Agriculture, Tehran, Iran, pp. 35-36, 2019 (In Persian).
- [4] S. Lurie and C. H. Crisosto, “Chilling injury in peach and nectarine,” *Postharvest Biol Technol*, vol. 37, no. 3, pp. 195–208, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.04.012>.
- [5] A. Pérez-López, S. H. Chávez-Franco, C. Villaseñor-Perea, T. Espinosa-Solares, L. H. Hernández-Gómez, and C. Lobato-Calleros, “Respiration rate and mechanical properties of peach fruit during storage at three maturity stages,” *J Food Eng*, vol. 142, pp. 111–117, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.007>.
- [6] J. W. Eckert and J. M. Ogawa, “The Chemical Control of Postharvest Diseases: Deciduous Fruits, Berries, Vegetables and Root/Tuber Crops,” *Annu Rev Phytopathol*, vol. 26, no. 1, pp. 433–469, 1988, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.py.26.090188.002245>.
- [7] M. Tahmasebi, A. Golmohammadi, A. Nematollahzadeh, M. Davari, and E. Chamani, “Control of nectarine fruits postharvest fungal rots caused by *Botrytis Cinerea* and *Rhizopus Stolonifer* via some essential oils,” *J Food Sci Technol*, vol. 57, no. 5, pp. 1647–1655, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04197-4>.
- [8] S. C. Riva, U. O. Opara, and O. A. Fawole, “Recent developments on postharvest application of edible coatings on stone fruit: A review,” *Sci Hortic*, vol. 262, p. 109074, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109074>.
- [9] W. S. Choi, S. Singh, and Y. S. Lee, “Characterization of edible film containing essential oils in hydroxypropyl methylcellulose and its effect on quality attributes of ‘Formosa’ plum (*Prunus salicina* L.),” *LWT*, vol. 70, pp. 213–222, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.02.036>.
- [10] P. Kumar, S. Sethi, R. R. Sharma, M. Srivastav, and E. Varghese, “Effect of chitosan coating on postharvest life and quality of plum during storage at low temperature,” *Sci Hortic*, vol. 226, pp. 104–109, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.037>.
- [11] R. Thakur, P. Pristijono, J.B. Golding, C.E. Stathopoulos, C.J. Scarlett, M. Bowyer, S.P. Singh, and Q.V. Vuong, “Development and application of rice starch based edible coating to improve the postharvest storage potential and quality of plum fruit (*Prunus salicina*),” *Sci Hortic*, vol. 237, pp. 59–66, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.005>.
- [12] C. Pelayo, S. E. Ebeler, and A. A. Kader, “Postharvest life and flavor quality of three strawberry cultivars kept at 5°C in

- [41] M. L. Oey, E. Vanstreels, J. De Baerdemaeker, E. Tijskens, H. Ramon, M.L.A.T.M. Hertog, B. Nicolaï, "Effect of turgor on micromechanical and structural properties of apple tissue: A quantitative analysis," *Postharvest Biol Technol*, vol. 44, no. 3, pp. 240–247, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.12.015>.
- [42] Z. Wang, L. Chen, H. Yang, and A. Wang, "Effect of exogenous glycine betaine on qualities of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage," *Eur Food Res Technol*, vol. 240, no. 1, pp. 41–48, 2014, doi: <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2305-x>.
- [43] N. Maftoonzad, H. S. Ramaswamy, and M. Marcotte, "Shelf-life extension of peaches through sodium alginate and methyl cellulose edible coatings," *Int J Food Sci Technol*, vol. 43, no. 6, pp. 951–957, 2008, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01444.x>.
- [44] M. Chisari, A. C. Silveira, R. N. Barbagallo, G. Spagna, and F. Artés, "Ripening stage influenced the expression of polyphenol oxidase, peroxidase, pectin methylesterase and polygalacturonase in two melon cultivars," *Int J Food Sci Technol*, vol. 44, no. 5, pp. 940–946, 2009, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01735.x>.
- [45] F. Lin, Z. Huang, Y. Chen, L. Zhou, M. Chen, J. Sun, Z. Lu, Y. Lu, "Effect of combined Bacillomycin D and chitosan on growth of *Rhizopus stolonifer* and *Botrytis cinerea* and cherry tomato preservation," *J Sci Food Agric*, vol. 101, no. 1, pp. 229–239, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10635>.
- [46] Y. Zhang, H. Mu, H. Gao, H. Chen, W. Wu, Y. Han, X. Fang, C. Tong, "Preparation of modified polyvinyl formal vibration damping material and its application in strawberry," *J Food Biochem*, vol. 45, no. 4, 2021, doi: <https://doi.org/10.1111/jfbc.13647>.
- [47] Y. B. Yurtlu, and Erdoğan, D. "Effect of storage time on some mechanical properties and bruise susceptibility of pears and apples," *Turkish J Agric Forest*, vol. 29, no. 6, pp. 469–482, 2005.
- [48] M. Bentini, C. Caprara, and R. Martelli, "Physico-mechanical properties of potato tubers during cold storage," *Biosyst Eng*, vol. 104, no. 1, pp. 25–32, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.03.007>.
- [49] U. Praeger, W. B. Herppich, C. König, Bernd Herold, and M. Geyer, "Changes of water status, elastic properties and blackspot incidence during storage of potato tubers," *J of Appl Bot Food qual*, vol. 83, no. 1, pp. 1–8, 2012.
- [50] N. Mahfoudhi and S. Hamdi, "Use of Almond Gum and Gum Arabic as Novel Edible Coating to Delay Postharvest Ripening and to Maintain Sweet Cherry (*Prunus avium*) Quality during Storage," *J Food Process Preserv*, vol. 39, no. 6, pp. 1499–1508, 2014, doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12369>.
- [51] M. Razavi, A. Golmohammadi, A. Nematollahzadeh, A. Ghanbari, M. Davari, D. Carullo and S. Farris, "Impact of Bacterial Cellulose Nanocrystals-Gelatin/Cinnamon Essential Oil Emulsion Coatings on the Quality Attributes of 'Red Delicious' Apples," *Coatings*, vol. 12, no. 6, pp. 741, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12060741>.
- [52] T. Diab, C. G. Biliaderis, D. Gerasopoulos, and E. Sfakiotakis, "Physicochemical properties and application of pullulan edible films and coatings in fruit preservation," *J Sci Food Agric*, vol. 81, no. 10, pp. 988–1000, 2001, doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.883>.
- [53] H. Barikloo and E. Ahmadi, "Effect of nanocomposite-based packaging and chitosan coating on the physical, chemical, and mechanical traits of strawberry during storage," *J Food Meas Charact*, vol. 12, no. 3, pp. 1795–1817, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9795-3>.
- [27] I. S. V. da Silva, N. S. Prado, P. G. de Melo, D. C. Arantes, M. Z. Andrade, H. Otaguro, D. Pasquini, "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>.
- [28] F. Dong, S. Li, Z. Li, 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, pp. 709–717, 2015.
- [29] H. M. C. Azeredo, K. W. E. 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>.
- [30] K. Kheiralipour, A. Tabatabaefar, H. Mobli, S. Rafiee, M. Sharifi, A. Jafari, and A. Rajabipour, "Some physical and hydrodynamic properties of two varieties of apple (*Malus domestica* Borkh L.)," *Int Agric*, vol. 22, pp. 225–229, 2008.
- [31] K. Heidarbeig, H. Ahmadi, K. Kheiralipo, and A. Tabatabaee, "Some Physical and Mechanical Properties of Khinjuk," *Pak J Nutr*, vol. 8, no. 1, pp. 74–77, 2008, doi: <https://doi.org/10.3923/pjn.2009.74.77>.
- [32] L. Giongo, M. Ajelli, P. Poncetta, M. Ramos-García, P. Sambo, and B. Farneti, "Raspberry texture mechanical profiling during fruit ripening and storage," *Postharvest Biol Technol*, vol. 149, pp. 177–186, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.11.021>.
- [33] M. Razavi, A. Golmohammadi, A. Nematollahzadeh, A. Ghanbari, M. Davari, D. Carullo and S. Farris, "Impact of Bacterial Cellulose Nanocrystals-Gelatin/Cinnamon Essential Oil Emulsion Coatings on the Quality Attributes of 'Red Delicious' Apples," *Coatings*, vol. 12, no. 6, pp. 741, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12060741>.
- [34] C. Rovera, M. Ghaani, N. Santo, S. Trabattoni, R.T. Olsson, D. Romano, S. Farris, "Enzymatic hydrolysis in the green production of bacterial cellulose nanocrystals," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 6, pp. 7725–7734, 2018, doi: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00600>.
- [35] M. C. Shaw, and E. Young, "Rubber elasticity and fracture," *J Eng Mater Technol*, Vol. 110, no. 3, pp. 258–265, 1988, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3226046>.
- [36] R. Khodabakhshian and M. Hassani, "The study and comparison of elastic modulus of pineapple fruit in macroscopic and microscopic modes," *Microsc Res Tech*, vol. 84, no. 6, pp. 1348–1357, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/jemt.23790>.
- [37] K. Chitravathi, O. P. Chauhan, and P. S. Raju, "Influence of modified atmosphere packaging on shelf-life of green chillies (*Capsicum annuum* L.)," *Food Packag Shelf Life*, vol. 4, pp. 1–9, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2015.02.001>.
- [38] S. Jafarzadeh, M. Azadbakht, F. Varasteh, M. and Vahedi Torshizi, M. "The effect of different types of coating and packaging on the physical properties of persimmon fruit under load," *Iran Food Sci Technol Res J*, vol. 19, no. 3, pp. 1–14, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings9020138>.
- [39] S. Jayarajan and R. R. Sharma, "Postharvest life and quality of 'Snow Queen' nectarine (*Prunus persica* var. *nucipersica*) as influenced by edible coatings during cold storage," *Acta Physiol Plant*, vol. 42, no. 7, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03112-1>.
- [40] I. G. Mandala, E. F. Anagnostaras, and C. K. Oikonomou, "Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics," *J Food Eng*, vol. 69, no. 3, pp. 307–316, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.021>.