نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۶، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۵، ص ۱۶۲-۱۵۳

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 6, No. 1, Spring - Summer 2016, p. 153-162

بررسی برخی خواص رئولوژیکی توت فرنگی پوشش‌دهی شده با متیل سلولز

زهرا ندیم[۱] - ابراهیم احمدی[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۲۴

چکیده

از جمله روش‌های مرسوم جهت افزایش ماندگاری و حفظ کیفیت میوه‌ها، استفاده از پوشش‌های خوراکی می‌باشد. در این مطالعه اثر کاربرد پوشش خوراکی متیل‌سلولز و زمان نگه‌داری روی برخی از خواص مکانیکی شامل: تنش تسلیم، کرنش تسلیم، انرژی گسیختگی و همچنین رفتار ویسکوالاستیک میوه توت‌فرنگی در آزمون تنش‌آسایی بررسی و مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون‌های سوراخ‌کردن و تنش‌آسایی با استفاده از دستگاه سنجش بافت اجرا گردید. در این پژوهش، نمودار کاهش تنش نسبت به زمان ترسیم و مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول و زمان‌های تنش‌آسایی محاسبه گردید. طبق نتایج به‌دست آمده، کاربرد این پوشش تأثیر مثبت افزایشی بر کرنش تسلیم و انرژی گسیختگی بافت محصول در طی انبارمانی داشت. میانگین تنش تسلیم و انرژی گسیختگی برای نمونه پوشش‌دار و شاهد به‌ترتیب ۰/۱۱، ۵/۷۱ و ۰/۰۹، ۴/۱۲ مگاپاسکال به‌دست آمد. در طی زمان ماندگاری مقدار اجزاء الاستیک مدل ماکسول عمومی کاهش یافت. نتایج نشان می‌دهد که مدل ماکسول ارائه شده به‌طور رضایت‌بخشی ($RMSE<0.76$; $0.96<R^2$) متناسب با داده‌های تجربی است. استفاده‌ی این پوشش خوراکی از کاهش زمان تنش‌آسایی بافت توت‌فرنگی‌های تیمار شده جلوگیری کرده که موجب بهبود خواص رئولوژیکی بافت میوه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: آزمون تنش‌آسایی، پوشش خوراکی، تنش تسلیم، توت‌فرنگی، خواص ویسکوالاستیک

علائم اختصاری
Nomenclature

$\sigma(t)$	تنش (MPa)	E_i	مدول الاستیسیته‌ی المان i ام (MPa)
σ_i	تنش در عنصر ترکیبی ویسکوز- الاستیک (MPa)	E_e	مدول الاستیسیته‌ی تعادلی (MPa)
σ_e	تنش در عنصر الاستیک یا تنش تعادلی (MPa)	t	زمان (s)
$\sigma(t_i)$	تنش در زمان t_i (MPa)	T_{reli}	زمان تنش‌آسایی (s)
ε_0	کرنش اولیه		

مقدمه

اغلب محصولات کشاورزی از نظر مقاومت به بارهای استاتیکی و دینامیکی رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. تلاش و مطالعه در راستای کاهش تنش‌های ناشی از جابه‌جایی و افزایش زمان ماندگاری به‌منظور جلوگیری از ضایعات پس از برداشت محصولات، امری ضروری تلقی می شود (Hassanpour *et al.*, 2011). توت‌فرنگی یکی از محصولات با ارزش باغی است و منبع خوب آنتی‌اکسیدان‌ها و دارای مقادیر زیادی ویتامین C و آنتوسیانین می‌باشد. این میوه دارای گوشت نرم بوده و به دلیل لطافت و حساسیت بسیار در مقابل ضربه و فشار آسیب‌پذیر بوده و مستعد فساد سریع و لهیدگی می‌باشد. ازجمله روش‌های مفید جهت افزایش ماندگاری این محصول استفاده از پوشش خوراکی در پس از برداشت آن می‌باشد. پوشش‌های خوراکی با تشکیل یک سد بر روی سطح میوه با جلوگیری از کاهش رطوبت

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا همدان
۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا همدان
(*- نویسنده مسئول: Email: eahmadi@basu.ac.ir)

مانع از دست‌دادن آب و پوسیدگی بافت شده و همچنین خواص فیزیکی، مکانیکی و کیفی را ارتقاء بخشیده و عمر مفید محصول از دیدگاه مصرف‌کننده گسترش می‌یابد (Navarro-Tarazaga *et al.,* 2011). در میان مواد پلیمری مایع، سلولز یک پلیمر طبیعی است که دارای خواص شکل‌گیری عالی می‌باشد. سلولز شفاف بوده و از استحکام خوبی برخوردار است و در برابر روغن و انتقال چربی مقاوم می‌باشد و به فراوانی یافت می‌شود (Bravin *et al.,* 2004). متیل‌سلولز[1] یک پلی ساکارید است که به‌عنوان پوشش در محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. با اصلاح شیمیایی مناسب می‌توان سلولز را برای تولید فیلم‌های خوراکی برای محصولات کشاورزی به‌کار برد (Hagenmaier and Shaw, 1990).

کنترل و کاهش ضایعات محصولات کشاورزی مورد توجه بسیاری از محققین بوده است و منجر به ارائه راه‌حل‌ها و پیشنهادهای مختلفی شده است. چند تن از محققین تأثیر مقدار موم در پوشش خوراکی هیدروکسی پروپیل متیل‌سلولز را بر کیفیت پس از برداشت میوه آلو ازجمله سفتی بافت آن بررسی و با نمونه شاهد مورد مقایسه قرار دادند (Navarro-Tarazaga *et al.,* 2011). آنها بیان کردند که افزودن موم به این پوشش مدول یانگ را کاهش داده که موجب کاهش یافتن مقاومت مکانیکی آن شده است و نشان می‌دهد ترکیب این پوشش خوراکی با موم موجب ضعیف‌تر شدن آن گردیده است. پژوهشگران دیگری تأثیر پوشش خوراکی متیل سلولز را بر آواکادو در طی ذخیره‌سازی بررسی کردند. برطبق نتایج حاصله توسط آنان، این پوشش تأثیر مثبتی بر میزان سفتی میوه‌ها داشته و با تنظیم بخار آب، اکسیژن و انتقال دی‌اکسیدکربن در داخل یا خارج از محصول موجب ارتقای کیفیت و افزایش زمان ماندگاری آن گردیده است (Maftoonazad and Ramaswamy, 2005). در تحقیق دیگری خواص مکانیکی توت‌فرنگی ذخیره شده تحت تیمار کلرید کلسیم مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تعیین نیروی شکست و چقرمگی، آزمون سوراخ‌کردن (نفوذ) را بر روی نمونه‌ها انجام داده‌اند و نیروی شکست را از نمودار نیرو – تغییر شکل، تعیین و با محاسبه مساحت زیر نمودار تا نقطه پارگی یا شکست، چقرمگی محاسبه گردید (Galetto *et al.,* 2010). نتایج این تحقیق نشان داد که سفتی نمونه تیمار شده در حدود ۷۴ درصد کاهش یافته است. در واقع، سفتی بافت و استحکام نمونه‌ها تحت اثر تیمار کلرید کلسیم قرار نگرفته است. در پژوهش دیگری تأثیر پوشش خوراکی متیل سلولز روی برخی خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی توت فرنگی بررسی شده است. بر طبق نتایج به‌دست آمده توسط آنها، این پوشش تأثیر مثبتی بر درصد افت وزن و پوسیدگی و حفظ قند توت فرنگی در طی ذخیره‌سازی داشت و همچنین نمونه‌های پوشش‌دار از رنگ تیره‌تر و سفتی بیشتری برخوردار بودند (Nadim *et al*., 2015).

1- Methyl cellulose

محصولات کشاورزی از هر دو عنصر ویسکوز و الاستیک تشکیل شده‌اند، به این معنی که آنها نه خواص الاستیک ایده‌آل و نه ویسکوز ایده‌آل را از خود نشان می‌دهند. در این حالت ماده خصوصیاتی شبیه جامد و مایع را با هم دارد و در این محصولات تغییر شکل فقط تابعی از تنش وارده نمی‌باشد، بلکه به زمان هم بستگی دارد. این رفتار وابسته به زمان را اصطلاحاً ویسکوالاستیک می‌نامند (Mohsenin, 1986). دانستن ویژگی ویسکوالاستیک مواد غذایی برای طراحی تجهیزات برداشت محصول، حمل و نقل، مرتب‌سازی و تجهیزات بسته‌بندی امری ضروری است. این ویژگی از مواد با استفاده از آزمون‌های تنش‌آسایی، خزش و آزمون‌های دینامیکی بررسی می‌گردد. یکی از مهمترین مشخصه‌های مواد ویسکوالاستیک، تنش‌آسایی[2] می‌باشد، که در یک تغییر شکل اولیه‌ی سریع و معین، تنش با گذشت زمان، پیوسته کاهش یافته و به سمت صفر میل می‌کند. در آزمون تنش‌آسایی از مدل‌های ماکسول برای توصیف رفتار استراحت تنش محصولات استفاده می‌شود (Razavi and Akbari, 2007). یکی از مهمترین پارامترهای ویسکوالاستیک محصولات کشاورزی که از طریق این آزمون به‌دست می‌آید، زمان تنش‌آسایی[3] است و برابر است با مدت زمانی که تنش موجود در یک ماده با مدل ماکسول ساده به ۳۷٪ مقدار تنش اولیه خود می‌رسد (Mohsenin, 1986). آزمون تنش‌آسایی بر روی ژل آگار، گوشت، پنیر، پنیر موزارلا و نان سفید صورت گرفته است و از مدل ماکسول عمومی برای توصیف رفتار ویسکوالاستیک آنها استفاده نمودند و تابع توزیع زمان‌های تنش‌آسایی محاسبه گردید (Del Nobile *et al.,* 2007). در پژوهشی دیگر، با انجام آزمون تنش‌آسایی بر روی انگور سفید بیدانه ضرایب ماکسول عمومی تعیین و نتیجه گرفته شد که مقدار زمان استراحت بسته به سهم ویژگی ویسکوز یا الاستیک ماده متفاوت می‌باشد (Hassanpour *et al.,* 2011).

بررسی‌های انجام شده نشان داد که تاکنون از ترکیب متیل‌سلولز به‌عنوان پوشش برای میوه توت‌فرنگی استفاده نشده است. لذا هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر این پوشش روی برخی خواص مکانیکی ازجمله: تنش تسلیم، کرنش تسلیم و انرژی گسیختگی و مقایسه تنش و زمان تنش‌آسایی در المان‌های ویسکوالاستیک در آزمون تنش‌آسایی در طی ذخیره‌سازی تحت تیمار متیل‌سلولز در مقایسه با تیمار شاهد بوده است.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه

میوه‌ی توت‌فرنگی رقم پاروس[4] تهیه شده از باغ‌های شهر

2- Stress relaxation
3- Relaxation time
4- Parus

سنندج، برای همه آزمایش‌های این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. توت‌فرنگی‌ها از لحاظ اندازه، شکل و یکنواختی رنگ و بدون هیچ نشانه‌ای از آسیب مکانیکی و یا پوسیدگی قارچی، انتخاب شدند و پس از آن تمام مواد خارجی و میوه‌های آسیب‌دیده به‌صورت دستی جدا شدند. میوه‌های منتخب در ظروف پلاستیکی درب‌دار به‌صورت دو ردیف روی هم چیده شدند و به آزمایشگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا منتقل شد و پس از اعمال تیمار پوششی در یخچال دمای ۴°C به مدت ۱۱ روز نگهداری شدند.

تهیه پوشش

برای تهیه این پوشش خوراکی، مخلوط ۳٪ متیل‌سلولز در حلال اتانول و آب (به نسبت ۱به ۲) به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد با مخلوط‌کن دور بالا (۹۰۰rpm) هم زده شد. ۰/۵٪ اسید پالمتیک و ۰/۳۳ میلی‌لیتر گلیسرول به مخلوط اضافه کرده و عمل هم‌زدن را به مدت ۵ دقیقه دیگر با همان شرایط بالا ادامه داده شد (Nadim *et al*., 2015).

پوشش‌دار کردن میوه

توت‌فرنگی‌های منتخب در پوشش مزبور برای مدت ۵ دقیقه غوطه‌ور شد به‌طوری‌که میوه‌ها در تماس کامل با محلول قرار گرفتند. سپس میوه‌ها درون آبکش ریخته شدند تا آب آنها گرفته شود. نمونه‌ها توسط جریان باد طبیعی به مدت ۱ ساعت در ۲۵°C خشک شدند و در جعبه سوراخ‌دار به منظور جلوگیری از تغییرات جوی بسته‌بندی و در یخچال نگه‌داری شدند.

خواص مکانیکی

به‌منظور اندازه‌گیری خواص مکانیکی، آزمون سوراخ‌کردن[1] بر روی نمونه‌های توت‌فرنگی انجام گرفت. آزمون فوق به کمک دستگاه آزمون بافت مواد غذایی (Zwick/roell مدل bt1_fr0.5th.d14 ساخت کشور آلمان، مدل لودسل[2] آن xforce hp با ظرفیت ۵۰۰ N) انجام شد که در آن قطر میله نفوذ ۴/۵۱ میلی‌متر و سرعت نفوذ ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه بود. برای تعیین تنش و کرنش تسلیم در نمودار نیرو-تغییرشکل هر نمونه و براساس اولین تنش قبل از تنش حداکثر که باعث افزایش کرنش بدون اضافه شدن تنش می‌شود، صورت گرفت. نقطه‌ای که رفتار ماده از حالت الاستیک خارج شده و وارد حالت پلاستیک می‌شود و نشان‌دهنده‌ی پارگی اولیه‌ی سلول در ساختار سلولی ماده است. انرژی گسیختگی با محاسبه سطح زیر نمودار تنش-کرنش تا نقطه شکست (گسیختگی) محاسبه می‌شود (Razavi and Akbari, 2007; Galetto *et al.,* 2010). نمونه‌ای از نمودارهای آزمون سوراخ‌کردن نمونه توت‌فرنگی پوشش‌داده شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

آزمون تنش‌آسایی

در این تحقیق به‌منظور اندازه‌گیری و بررسی خواص ویسکوالاستیک، آزمون تنش‌آسایی بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای انجام این آزمون از دستگاه آزمون بافت مواد غذایی Zwick/roell با استفاده از یک پروب با قطر ۲۵ میلی‌متر تحت آزمون صفحات فشاری بهره گرفته شد. نمونه‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۱۲/۹۴ mm و طول ۱۹ mm تهیه شده و سپس در قسمت فک پایین دستگاه قرار گرفت. آزمایش در دمای اتاق با توجه به شرایط زیر انجام گرفته است:

نیروی بارگذاری اولیه: ۰/۱ نیوتن، سرعت آغاز آزمون: ۷۰ mm min^{-1}، سرعت بار گذاری: ۲ mm min^{-1}، مدت زمان تنش‌آسایی: ۱۰۰ ثانیه.

از مدل ماکسول عمومی برای نشان دادن تنش‌آسایی در محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. معمولاً مدل چند جزئی به‌طور مناسبی می‌تواند رفتار واقعی مواد کشاورزی را بیان نماید. با توجه به اینکه بعد از گذشت زمان طولانی مقداری از تنش ایجاد شده در محصولات کشاورزی باقی می‌ماند، برای رفع این عیب فنری با ضریب E_e به مدل ماکسول عمومی اضافه می‌کنند (Mohsenin, 1986). رابطه (۱) بیان ریاضی مدل عمومی ماکسول را نشان می‌دهد.

$$\sigma(t)=\sigma_1 e^{\frac{-t}{T_{rel1}}}+\sigma_2 e^{\frac{-t}{T_{rel2}}}+\ldots+\sigma_n e^{\frac{-t}{T_{reln}}}+\sigma_e \qquad (۱)$$

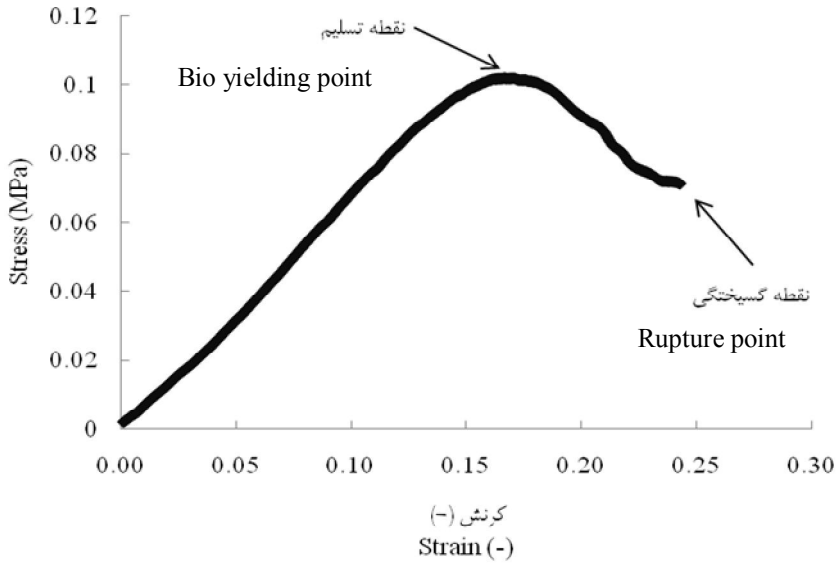
که در آن با در نظر گرفتن $\sigma_i=\varepsilon_0 E_i$ و $\sigma_e=\varepsilon_0 E_e$ می‌توان آن‌را به‌صورت رابطه (۲) نوشت:

$$\sigma(t)=\left[E_1 e^{\frac{-t}{T_{rel1}}}+E_2 e^{\frac{-t}{T_{rel2}}}+\ldots+E_n e^{\frac{-t}{T_{reln}}}+E_e\right]\varepsilon_0 \qquad (۲)$$

مدل ماکسول عمومی (رابطه ۱) پرکاربردترین مدلی است که برای تحلیل نتایج تجربی حاصل از آزمون تنش‌آسایی به‌کار می‌رود. از منحنی تنش‌آسایی به‌دست آمده، ضرایب مدل استخراج شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. رفتار مدل با روش باقیمانده‌های متوالی[3] بررسی شد. ثابت زمانی T_{rel} یا به‌عبارتی زمان تنش‌آسایی نمونه‌های مورد آزمایش با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید (Mohsenin, 1986).

1- Puncture test
2- Load cell
3- Successive residuals

$$T_{rel} = \frac{t_2 - t_1}{\ln \sigma(t_1) - \ln \sigma(t_2)} \quad (۳)$$



شکل ۱- منحنی تنش- کرنش در آزمون سوراخ‌کردن نمونه توت فرنگی پوشش داده شده

Fig.1. Stress- strain diagram of a typical coated strawberry sample in puncture test

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی ۲×۴، که شامل فاکتور اول، ۴ زمان نگه‌داری (روز دوم، روز پنجم، روز هشتم و روز یازدهم انبارمانی) و فاکتور دوم شامل ۲ تیمار توت‌فرنگی (با پوشش و بدون پوشش) و در سه تکرار به اجرا در آمد. داده‌ها پس از نرمال شدن با استفاده از نرم افزار IBM SPSS Statistice 20 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

نتایج و بحث

تغییرات تنش تسلیم

خلاصه نتایج تجزیه واریانس تأثیر مدت ذخیره‌سازی و پوشش متیل‌سلولز بر تنش تسلیم توت‌فرنگی بر حسب مگاپاسکال در جدول ۱ نشان داده شده است. اثر اصلی تیمار در سطح ۰/۰۱ و اثر متقابل دوره × تیمار در سطح ۰/۰۵ بر تنش تسلیم نمونه‌های مورد آزمایش معنی‌دار شده است. این بدان معناست که تغییرات تنش تسلیم در نمونه پوشش‌دار و بدون پوشش تحت تأثیر زمان ذخیره‌سازی قرار گرفته است. مقدار تنش تسلیم در طی ذخیره‌سازی برای همه‌ی نمونه‌ها در طی مدت زمان ذخیره‌سازی کاهش یافته است. مقدار این پارامتر برای نمونه شاهد از ۰/۱۰۲ تا ۰/۰۷۹ مگاپاسکال (۲۲/۵۴٪) کاهش و برای نمونه پوشش‌دار از ۰/۱۳ تا ۰/۰۹۵ مگاپاسکال (۲۶/۹۲٪) کاهش یافته است (شکل ۳-A). همچنین همواره تنش تسلیم توت‌فرنگی پوشش‌دار بیشتر از نمونه شاهد بوده است و بیانگر این مطلب است که این تیمار سفت‌تر است. علت نرم شدن میوه‌ها در طی مدت زمان نگه‌داری، پیر شدن بافت و حل شدن پلیمرهای پکتین در لایه‌های بافت می‌باشد که این مواد پکتینی موجب تماس و چسبیدن سلول‌ها به هم می‌شوند و در نتیجه کاهش استحکام محصول را به دنبال خواهد داشت (Kashaninejad *et al.*, 2005). با توجه به اینکه سلولز از اجزای ساختاری اصلی بافت محصولات می‌باشد و نسبت به انتقال آب و چربی مقاوم است، مانع نرم شدن و کاهش سفتی میوه توت‌فرنگی پوشش‌دار در طی انبارمانی شده است (Bravin *et al.*, 2004).

تغییرات کرنش تسلیم

نتایج تجزیه واریانس تأثیر مدت ذخیره‌سازی و پوشش متیل‌سلولز بر کرنش تسلیم توت‌فرنگی در جدول ۱ نشان داده شده است. از لحاظ آماری اثرات متقابل زمان نگه‌داری و تیمار بر کرنش تسلیم بافت توت‌فرنگی معنی‌دار نشده است. با توجه به شکل B-۳ مشاهده می‌شود که مقادیر کرنش تسلیم برای نمونه شاهد بیشتر از نمونه پوشش‌دار بوده است که نشانگر نرمی بیشتر، وجود آب بیشتر در بافت و عدم تردی آن می‌باشد.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس تأثیر زمان نگه‌داری و تیمار و اثرات متقابل آنها بر تنش تسلیم، کرنش تسلیم و انرژی گسیختگی
Table 1- ANOVA results ofstorage time and treatment and their interactions on the yield stress, yield strain and energy of rupture

متغیر Variable	درجه آزادی Degree of freedom	انرژی گسیختگی Energy of rupture	کرنش تسلیم Yield strain	تنش تسلیم Yield stress
دوره Storage time	3	0.132^{ns}	0.001^{ns}	0.0001^{ns}
تیمار Treatment	1	0.588**	0.001^{ns}	0.007**
دوره × تیمار Treatment × Storage time	3	0.129^{ns}	0.001^{ns}	0.001*
خطا Error	16	0.07	0.001	0.0001

**معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ و *معنی‌دار در سطح ۰/۰۵
**Significant, P<0.01; * Significant, P<0.05

تغییرات انرژی گسیختگی

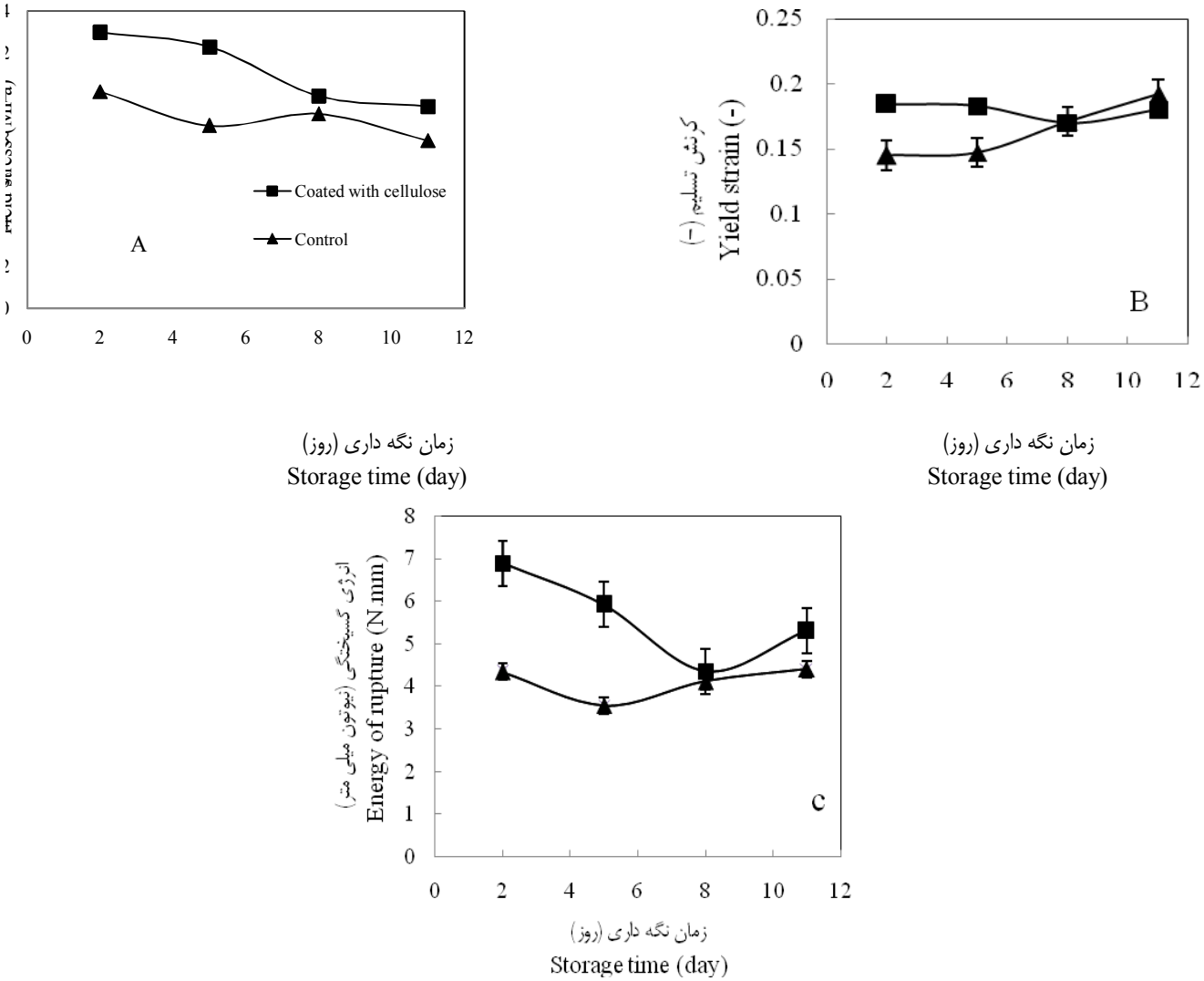
مطابق نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر مدت ذخیره‌سازی و پوشش متیل‌سلولز بر انرژی گسیختگی توت‌فرنگی در جدول ۱ نشان داده شده است. اثر اصلی تیمار بر میزان انرژی گسیختگی از لحاظ آماری در سطح یک درصد معنی‌دار شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، انرژی گسیختگی تا روز هشتم برای نمونه پوشش‌دار از ۶/۸۸ تا ۴/۵ و برای شاهد از ۴/۳۴ تا میزان ۴/۱۱ نیوتن میلی‌متر روند کاهشی داشت و سپس تا پایان ذخیره‌سازی به میزان ۱۸/۷۷٪ برای نمونه پوشش‌دار و ۶/۵۹٪ برای شاهد افزایش یافت (شکل۳-C). میانگین مقدار انرژی گسیختگی در نمونه پوشش‌دار ۵/۷۱ نیوتن میلی‌متر به‌دست آمد و برای شاهد ۴/۱۲ نیوتن میلی‌متر بود. از این تغییرات چنین به نظر می‌آید که در ابتدای مدت زمان نگه‌داری کار مورد نیاز برای ایجاد پارگی در بافت توت‌فرنگی برای نمونه‌های تیمار شده با متیل‌سلولز زیاد و در انتهای زمان نگه‌داری کمتر است. جعفریان و همکاران (۲۰۱۳) نیز روند مشابه در تغییرات انرژی شکست برای سیب تحت تاثیر پوشش کلرید کلسیم دو آبه در طی انبارمانی را گزارش نمودند. ایشان کاهش خواص مکانیکی در طی نگه‌داری را رسیده‌تر شدن سیب‌ها و تبدیل درصد بیشتری از نشاسته آن‌ها به قند بیان نمودند.

زمان‌های استراحت و اجزاء الاستیک (ضرایب جملات مدل ماکسول)

جدول ۲ مقادیر میانگین تنش و زمان تنش‌آسایی در المان‌های ویسکوالاستیک مدل سه جزئی ماکسول که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است را برای میوه توت‌فرنگی پوشش‌دار و بدون پوشش نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، در طی ذخیره‌سازی زمان تنش‌آسایی میوه شاهد در گستره ۳۳۶/۲۱ تا ۴۶۶/۹۱ متغیر بوده و مقدار میانگین آن ۴۰۶/۲۲ ثانیه محاسبه شد. مقدار زمان تنش‌آسایی بسته به سهم ویژگی ویسکوز یا الاستیک ماده متفاوت می‌باشد. به‌طوری‌که هرچه خاصیت الاستیک ماده بیشتر باشد زمان تنش‌آسایی بالاتری را هم دارا خواهد بود (Van Vliet, 1999). با توجه به جدول ۲ مقدار زمان تنش‌آسایی برای نمونه پوشش‌دار که در محدوده‌ی ۳۵۴/۶۱ تا ۴۹۹/۱۴ ثانیه می‌باشد با گذشت زمان نگه‌داری به‌طور نسبی افزایش یافته است در حالی‌که این فاکتور برای نمونه شاهد به نسبت کاهش یافته است. شکل ۴ نیز نمونه‌ای از منحنی مدل (رسم شده براساس ضرایب مدل ماکسول) و منحنی حاصل از آزمون تجربی تنش‌آسایی را نشان می‌دهد. جهت مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و داده‌های تجربی، مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) برای تیمارها محاسبه گردید. با توجه به جدول ۳ میزان این شاخص‌های آماری برای همه‌ی تیمارها RMSE<0.76 و R^2>0.96 می‌باشد و بیانگر این مطلب است که مدل ارائه شده با توجه به ضریب R^2 بالا و RMSE پایین، رضایت‌بخش بوده و متناسب با داده‌های تجربی می‌باشد.

زمان تنش‌آسایی به رطوبت محصول نیز بستگی دارد به‌طوری‌که با افزایش میزان رطوبت و نرم شدن محصول، مقدار تنش‌آسایی نیز کاهش می‌یابد (Hassanpour *et al*., 2011). پوشش‌های خوراکی با تشکیل یک سد بر روی سطح میوه مانع کاهش رطوبت و از دست دادن آب می‌شوند و همچنین سلولز از استحکام خوبی برخوردار است و از تخریب آنزیمی دیواره سلولی در طی نگه‌داری جلوگیری می‌کند (Bravin *et al.,* 2004). با توجه به نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، عدم کاهش زمان تنش‌آسایی برای نمونه پوشش‌دار در طی ذخیره‌سازی، حفظ ویژگی الاستیک میوه را تأیید می‌کند و مؤید این مطلب است که پوشش متیل‌سلولز موجب حفظ ویژگی کیفی و

انبارمانی توت‌فرنگی بوده است. این استنتاج با نتایج دیگر محققین نیز مطابقت دارد (Maftoonazad and Ramaswamy, 2005).



شکل ۳- اثر زمان نگه دای و تیمار متیل‌سلولز بر تنش تسلیم (A)، کرنش تسلیم (B) و انرژی گسیختگی (C)

Fig.3. Effect of storage time and methylcellulose treatment on the yield stress (A), yield strain (B) and energy of rupture (C)

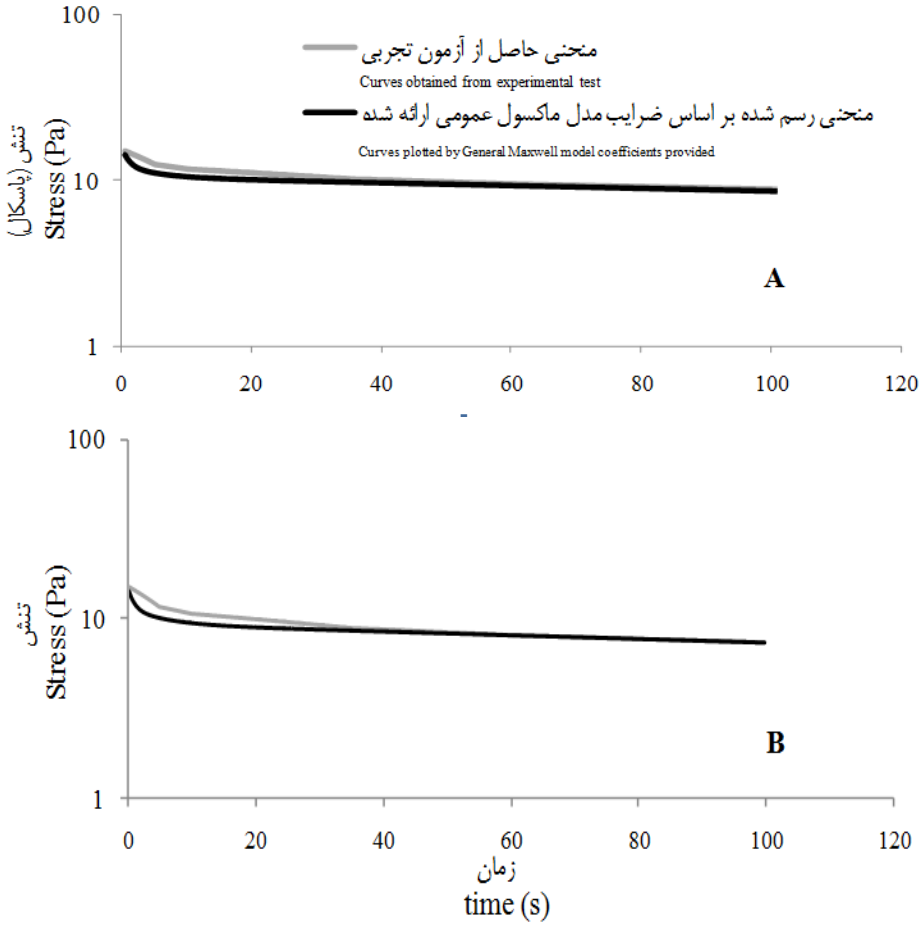
شکل ۵ نمودار تنش‌آسایی میوه توت‌فرنگی پوشش‌دار و بی‌پوشش را در ابتدا و انتهای ذخیره‌سازی نشان می‌دهد. مطابق این شکل می‌توان گفت که با گذشت دوره نگه‌داری ویژگی الاستیک نمونه پوشش‌دار افزایش یافته که انحنای زیاد ابتدای منحنی تنش‌آسایی در آخرین روز ذخیره‌سازی نسبت به روز اول، دلالت بر افزایش تأثیر المان سوم در مدل ماکسول دارد. با توجه به جدول ۲ مقدار تنش تعادلی σ_e که محدوده تغییرات آن بین ۵/۸۶ تا ۴/۷۸ پاسکال می‌باشد با گذشت زمان نگه‌داری به‌طور نسبی کاهش می‌یابد. تغییرات خواص ویسکوالاستیک یک ماده در حین نگه‌داری می‌تواند بر تنش یا زمان تنش‌آسایی اثرگذار باشد. در این زمینه برخی از محققین اظهار داشتند که کاهش مجموع مقادیر σ_1، σ_2 و σ_3 به‌عنوان اجزاء الاستیک در مدل ماکسول بیان‌کننده‌ی کاهش ویژگی الاستیسیته محصول می‌باشد (Kajuna *et al.*, 1998). نتایج به‌دست آمده از این مطالعه با اظهارات سایر محققین نیز هم‌خوانی دارد (Hassanpour *et al.*, 2011). در پژوهشی مدل دو جزئی ماکسول به‌عنوان معادله مشخصه ارقام مورد آزمایش سیب برای بررسی رفتار مکانیکی آن مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد اثر رقم و زمان برداشت بر تمامی پارامترهای به‌دست آمده از مدل ماکسول

به‌جز زمان‌های تنش‌آسایی، معنی‌دار بود (Ghasemibaghbadrani and Hemmat, 2012).

جدول ۲- میانگین مقادیر تنش و زمان تنش‌آسایی در المان های ویسکوالاستیک مدل سه جزئی ماکسول

Table 2- Average values of stress and relaxation time in the Maxwell three-component model viscoelastic elements

نمونه Sample	روز Day	تنش (پاسکال) Stress (Pa)				زمان تنش‌آسایی (ثانیه) Relaxation time (s)		
		σ_1	σ_2	σ_3	σ_e	T_{rel1}	T_{rel2}	T_{rel3}
با پوشش سلولزی Coated with cellulose	2	11.65±0.66	2.00±0.21	1.32±0.24	5.86±0.03	382.82±69.9	11.04±0.12	1.96±1.15
	5	11.44±0.47	2.32±0.24	1.49±0.25	5.70±0.04	354.61±52.14	9.96±0.55	1.18±0.31
	8	12.59±0.17	1.62±0.10	1.00±0.07	5.30±0.03	499.14±36.0	10.35±0.22	0.88±0.24
	11	12.20±0.44	1.84±0.24	1.17±0.22	4.87±0.03	411.17±52.56	11.63±1.15	1.22±0.12
شاهد Control	2	11.65±0.66	2.00±0.21	1.32±0.24	5.86±0.03	382.82±69.9	11.04±0.12	1.96±1.15
	5	11.82±0.47	1.91±0.49	1.16±0.30	5.66±0.04	438.95±89.58	9.49±0.79	0.96±0.28
	8	12.60±0.21	1.63±0.09	0.99±0.10	5.24±0.03	466.91±44.68	10.99±0.98	1.10±0.29
	11	11.51±0.52	2.50±0.23	1.44±0.15	4.78±0.08	336.21±55.30	10.79±0.94	0.96±0.15



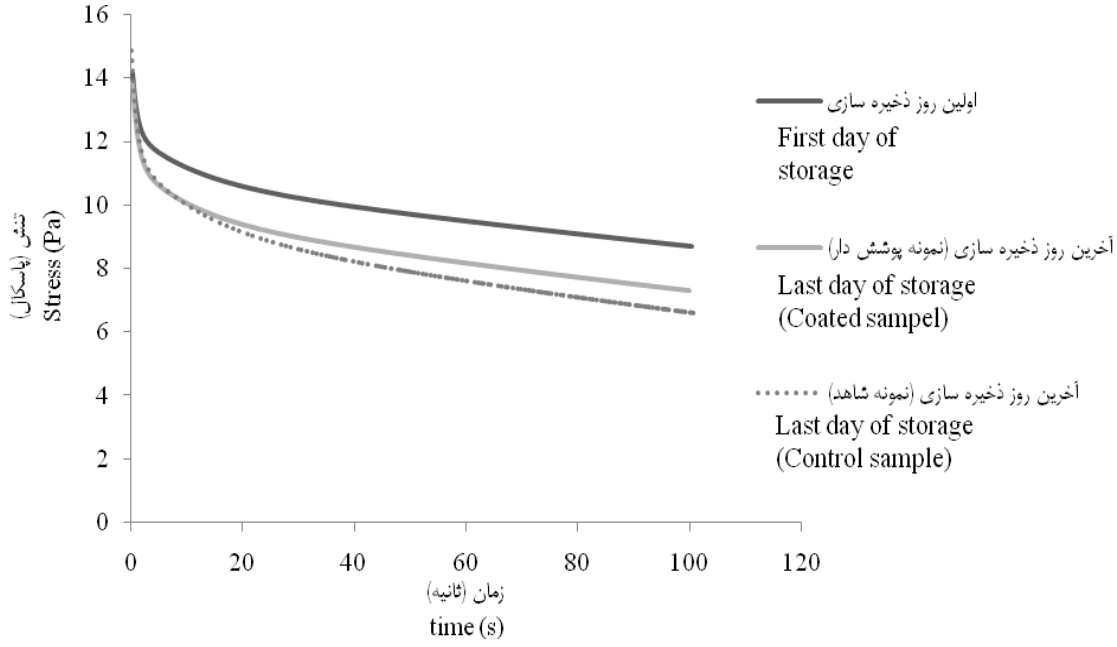
شکل ٤- نمونه‌ای از منحنی مدل (رسم شده براساس ضرایب مدل ماکسول) و منحنی حاصل از آزمون تجربی در نمونه‌ها: A- شاهد B- پوشش‌دار

Fig.4. Maxwell model and empirical curves for: Control (A) and Coated (B) samples

جدول ۳- شاخص‌های آماری ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل سه جزئی ماکسول ارائه شده

Table 3- The statistical indicators correlation coefficient and root mean square error for Maxwell three-component model

نمونه Sample	روز Day	شاخص‌های آماری Verification statistics	
		R^2	RMSE
با پوشش سلولزی Coated with cellulose	2	0.9781	0.7611
	5	0.9797	0.6011
	8	0.9600	0.4982
	11	0.9626	0.5671
شاهد Control	2	0.9781	0.7611
	5	0.981	0.4755
	8	0.9617	0.5222
	11	0.9588	0.6591



شکل ۵- نمونه‌ای از نمودار تنش‌آسایی میوه توت‌فرنگی در ابتدا و انتهای زمان ذخیره‌سازی

Fig.5. The sample of stress relaxation curve strawberry fruit at the beginning and end of storage time

نتیجه‌گیری

۱- استفاده از پوشش خوراکی متیل‌سلولز در حفظ کیفیت و ویژگی‌های کیفی بافت توت‌فرنگی دارای تأثیر مثبت می‌باشد.

۲- به توجه به اینکه نمونه‌های پوشش‌دار مقادیر تنش تسلیم بیشتری را به‌خود اختصاص داده بودند، می‌توان نتیجه گرفت که سفتی آن‌ها بیشتر است و بافت محصول مقاومت بیشتری در برابر بارهای وارده دارد و در مدت نگه‌داری ساختار بافتی آن‌ها بیشتر حفظ شده است.

۳- به دلیل اینکه نمونه پوشش‌دار دارای انرژی گسیختگی بیشتری است، بنابراین کار لازم برای ایجاد گسیختگی در بافت آن بیشتر است و بافت نمونه از استحکام و ماندگاری بالاتری برخوردار است.

۴- براساس نتایج، ضرایب منحنی تنش‌آسایی با افزایش زمان ماندگاری کاهش یافت.

۵- کاربرد پوشش خوراکی بر این محصول موجب عدم کاهش سریع زمان تنش‌آسایی و حفظ ویژگی الاستیک میوه در طی انبارمانی شده است.

References

1. Bravin, B., D. Peressini, and A. Sensidoni. 2004. Influence of emulsifier type and content on functional properties of polysaccharide lipid based edible films. Journal of Agricultural and Food Chemistry 52: 6448-6455.
2. Del Nobile, M. A., S. Chillo, A. Mentana, and A. Baiano. 2007. Use of the generalized Maxwell model for describing the stress relaxation behavior of solid-like foods. Journal of Food Engineering 78: 987-983.
3. Hagenmaier, R. D., and P. E. Shaw. 1990. Moisture permeability of edible films made with fatty acid and (hydroxypropyl) methylcellulose. Journal of Agriculture and Food Chemistry 38: 1799-1803.
4. Hassanpour, A., M. Esmaiili, A. Modarres Motlagh, and A. Rahmani Didar. 2011. Changes in viscoelastic properties of Thompson seedless grapes during ripening. Journal of Food Researches 2: 133-145. (In Farsi).
5. Galetto, C. D., R. A. Verdini, S. E. Zorrilla, and A. C. Rubiolo. 2010. Freezing of strawberries by immersion in $CaCl_2$ solutions. Food Chemistry 123: 243-248.
6. Ghasemi baghbadrani, B., and A. Hemmat. 2012. Effect of cultivar and harvest time on viscoelastic properties of apple. The 8th National Congress on Agriculture Machinery Engineering (Biosystem) & Mechanization. Mashhad, Iran. (In Farsi).
7. Jafarian, M., H. Sadrnia, and M. H. Aghkhani. 2013. Study the effect of $CaCl_2.2H_2O$ on mechanical properties of apple in storage time. Journal of Agricultural Machinery 2: 133-143. (In Farsi).
8. Kajuna, S., W. K. Bilanski, and G. S. Mittal. 1998. Effect of ripening on the parameters of three stress relaxation models for banana and plantain. Transactions of the ASAE 41: 55-61.
9. Kashaninejad, H., H. Pourazarang, A. Mortazavi, and Y. Maghsoudlou. 2005. Effect of pressure infiltration of calcium chloride on shelf life elongation of apple varieties. Agricultural Sciences and Natural Resources 3: 52-60. (In Farsi).
10. Khazaei, J., and D. D. Mann. 2005. Effects of moisture content and number of loadings on force relaxation behaviour of chickpea kernels. International Agrophysics 19: 305-313.
11. Maftoonazad, N., and H. S. Ramaswamy. 2005. Postharvest shelf-life extension of avocados using methyl cellulose-based coating. LWT Food Science and Technology 38: 617-624.
12. Maghoumi, M., Y. Mostofy, A. R. Talaiy, M. Dehestani, and A. Asghari. 2010. Effect of modified atmosphere packaging with high carbon dioxide on strawberry shelf-life features. Journal of Agricultural 11: 163-176.
13. Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials: structure, physical characteristics and mechanical properties. 2nd ed., Gordon Breach Science Publisher, New York.
14. Nadim, Z., E. Ahmadi, H. Sarikhani, and R. Amiri Chayjan. 2015. Effect of methylcellulose-based edible coating on strawberry fruit's quality maintenance during storage. Journal of Food Processing and Preservation 39: 80-90.
15. Navarro-Tarazaga, M. L., A. Massa, and M. B. Pérez-Gago. 2011. Effect of beeswax content on hydroxypropyl methylcellulose-based edible film properties and postharvest quality of coated plums (Cv. Angeleno). Food Science and Technology 44: 2328-2334.
16. Razavi, S. M. A., and R. Akbari. 2007. Biophysical properties of agricultural and food materials. Ferdosi University of Mashad Publisher, Iran. (In Farsi).
17. Tavakkoli Hashjin, T. 2004. Mechanics agricultural. First Printing. Zanjan University Publisher, Zanjan, Iran. (In Farsi).
18. Van Vliet, T. 1999. Rheological classification of foods and instrumental techniques for their study. In A.J. Rosenthal (Ed.), Food Texture Measurement and Perception (pp. 65-98). New York: Aspen.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 6, No. 1, Spring - Summer 2016, p. 153-162

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۶، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۵، ص ۱۶۲-۱۵۳

Rheological properties of strawberry fruit coating with methylcellulose

Z. Nadim[1]- E. Ahmadi[2*]

Received: 21-01-2014
Accepted: 15-07-2014

Introduction: The maintenance of the quality of fresh products is still a major challenge for the consumers. The most important quality attributes contributing to the marketability of fresh fruit include appearance, color, texture, flavor, nutritional value and microbial safety. Strawberry fruits should be firm but not crunchy. Decreased quality during postharvest handling is most often associated with water loss and decay. The postharvest life of strawberries can be extended by coating technique combined with refrigeration. Application of edible coatings is a conventional method to increase shelf life and maintain fruit quality. Edible coatings can provide an alternative to enlarge fresh fruits' postharvest life. In this study, the effects of application of methyl cellulose edible coatings and storage time on some mechanical properties, including: the yield stress, yield strain, energy of rupture and modulus of elasticity and also, the viscoelastic behavior of the strawberry fruit was investigated.

Materials and Methods: MC (Methocel, Dow Chemical Company, Midland, MI) coating was prepared by solubilizing MC powder (3.0 g per 100 mL) in a water–ethyl alcohol mixture (2:1) at 75ºC under the high speedmixer (900 rpm) for 15 min. Coatings were used directly on the fruit surface. The physical and mechanical characteristics of fruits were analyzed on 2, 5, 8 and 11 days of storage. The puncture test and relaxation test were done using a texture analyzer (Zwick/Roell Model BT1_FR0.5TH.D14, Zwick GmbH Co., Ulm, Germany; using Xforce HP model of loadcell with capacity of 500 N, by 2 mv/v characteristic). General Maxwell model is widely used to analyze experimental results of the stress tests applied for relaxation. The obtained model coefficients were determined and evaluated from relaxation stress curves. Residues were determined using the sequential model. Usually, multicomponent models can properly describe the actual behavior of agricultural products. Results of factorial experiment in a completely randomized design were analyzed. In this study, the stress versus time graph was plotted and three-component Maxwell model coefficients were obtained.

Results and Discussion: In this current study, application of MC significantly reduced the fresh strawberries decay. Fruit decay in strawberries increased with storage time, but the coating reduced rate of decay with the length of storage. According to the results, the application of these coatings has a positive impact on yield stress and energy of rupture product texture during the storage. Average yield stress and rupture energy for the coated samples and control were 0.11, 5.71 and 0.09, 4.12 MPa respectively. The effect of treatment and storage time on the yield strain and elastic modulus were not statistically significant. The results show that provided Maxwell model satisfactorily (RMSE<0.76 and R^2 >0.96) fits the experimental data. Also, with a retention time, the elastic component of the model is relatively reduced and the application of the coating prevents the decrease in relaxation time and improves the rheological properties of fruit. Relaxation time is different based on the characteristics of the viscoelastic or viscous substances, but this time is wider in elastic material. The relaxation time depends on the moisture content of the product, so the increase of humidity and soft, reduced relaxation time. Coatings are effective physical barrier to moisture loss and slower rates of weight loss in coated fruits because of the cover features for gas diffusion of stomata, the organelles that regulate the transpiration process and gas exchange between the fruit and the surroundings.

Conclusions: Edible films and coatings may reduce the moisture transfer, the rate of oxidation and respiration which are considered important to prolong the shelf-life of these products. This investigation showed that the MC coatings are effective for strawberries shelf life extension and retarded the senescence process in compared with control. The coat has been as a physical barrier for the gas exchange between the fruit and the environment. It was demonstrated that the coating reduced loss of firmness and delayed the softening of fruit and texture change. Fruit decay in strawberries increased with storage time, but the coating reduced rate of decay with the length of storage. Finally the results showed that coating, may increase overall acceptability, and increase the quality and shelf life of fruits.

Keywords: Edible coatings, Strawberry, Stress relaxation, Viscoelastic properties, Yield stress

1- MS.c Student, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan
2- Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan
(*- Corresponding Author Email: eahmadi@basu.ac.ir)