

تعیین مدل ویسکو الاستیک میوه نارنج در خلال انبارمانی به کمک پردازش تصویر

فاطمه کاظمی کرجی^۱، سامان آبدانان مهدی زاده^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.

۲- استادیار دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.

(تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۲)

چکیده

خصوصیات مکانیکی میوه از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده استانداردهای مناسب برای طراحی، تبدیل، پردازش و سیستم‌های بسته‌بندی به شمار می‌روند. یکی از روش‌های بیان تغییرات ساختار داخلی در میوه‌ها در خلال انبارمانی، انجام آزمون‌های آسایش تنش در کرنش‌های مختلف و از پیش تعیین شده است. لذا هدف از این پژوهش بررسی رفتار تراکمی نارنج در بارگذاری مکانیکی نیمه استاتیک با انجام آزمایشات تنش آسایشی نمونه‌ها در سطوح مختلف کرنش و مدلسازی روش ماکسول و پلاژ و مقایسه آن با روش پردازش تصویر در نظر گرفته شد. بعلاوه در این پژوهش تغییرات سطح مقطع هنگام بارگذاری با کمک پردازش تصویر اندازه‌گیری شد. مدول الاستیسیته در روش پردازش تصویر، مدول ماکسول و پلاژ در روزهای یکم تا نهم، به ترتیب، از ۳/۹۱ تا ۴/۵، ۳/۶ تا ۴/۵۳ و ۲/۷ تا ۳/۴۵ افزایش یافت که علارغم روند افزایشی اختلاف معنی‌داری میان آن‌ها مشاهده نگردید. با توجه به عدم اختلاف معنی‌داری خروجی این دو مدل (ماکسول و پلاژ) از آنجایی که در مدل پلاژ نسبت به مدل ماکسول تعداد عناصر کمتری در مدل-سازی نیاز دارد (تنها دو ثابت) محاسبه مدول الاستیسیته آسان‌تر صورت پذیرفت.

کلید واژگان: نارنج؛ مدل ویسکو الاستیک؛ بینایی ماشین؛ انبارمانی

*مسئول مکاتبات: saman.abdanan@gmail.com

۱- مقدمه

نارنج با نام علمی *Citrus aurantium* متعلق به جنوب شرقی آسیا بوده و با توجه به وجود ترکیبات زیست فعال (مانند ترکیبات فنلی، ویتامین ث و کارتنوئیدها) دارای اثرات سلامتی بخش می‌باشد [۱]. بعلاوه از آب نارنج برای بهبود عطر و طعم فرآورده‌های غذایی و همچنین عطرسازی و شامپوسازی استفاده می‌شود.

پوست ضخیم میوه نارنج مقدار زیادی از حجم کل میوه را تشکیل می‌دهد. ساختار پوست شامل لایه خارجی ضخیم فالودو^۲، لایه میانی پوست یعنی آلبدو^۳ بین گوشت و لایه خارجی و در نهایت کیسه‌های آب تشکیل دهنده پالپ میوه است. فالودو شامل غدد چربی بوده و دارای بافتی با فضای بین سلولی کم می‌باشد. در مقابل آلبدو سلول‌هایی با فضای بین سلولی بزرگ و بافتی شبیه به فوم دارد [۲]. برخلاف پوست بسیاری از مرکبات دیگر آلبدو و فالودو میوه نارنج از نظر ضخامت با هم برابر نیستند و مقدار بافت آلبدو از بافت فالودو بیشتر است [۳].

هنگام سقوط میوه از درخت، انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تبدیل شده که این مساله سبب بروز آسیب شدید به میوه می‌گردد. این در حالی است که سیدل و همکاران [۴] یکی از نقش‌های پوست ضخیم را به محافظت از ضربه معرفی نموده و ظرفیت میراکنندگی انرژی جنبشی تا ۰/۹۰ را با انجام آزمایش‌های سقوط آزاد ثابت کردند. همچنین منسوری و همکاران [۵] اظهار داشتند که پوست مرکبات به ویژه قسمت آلبدو به عنوان لایه جذب شوک عمل می‌کند. بعلاوه بر اساس نتایج پژوهش‌های متعدد خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پوست میوه از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده استانداردهای مناسب در طراحی و سامانه‌های بسته‌بندی می‌باشند [۶]. بر این اساس مطالعه آزمون‌های فشرده‌سازی استاندارد و تجزیه تحلیل روابط نیرو-تغییر شکل بسیار مورد توجه محققین مختلف قرار گرفت؛ این در حالی است که لزوماً این آزمون نشان دهنده شکست بافت محصول نبوده زیرا گسترش شکستگی‌های داخلی در بافت همیشه منجر به کاهش منحنی تنش-کرنش نمی‌شود. لذا یک روش برای نشان دادن تغییرات

ساختار داخلی، انجام آزمون‌های آسایش تنش در کرنش‌های مختلف و از پیش تعیین شده است [۷].

آسایش، ناشی از ویسکوالاستیسیته بافت جزویتهای ذاتی بسیاری از مواد بیولوژیکی است [۸]. یکی از خواص جامدات ویسکوالاستیک، وابستگی زمانی تنش-کرنش آنها است. در پژوهش‌های متعددی ویسکوز بودن بافت‌های بیولوژیکی با استفاده از انطباق مدل‌های ریاضی پیچیده به منحنی آسایش مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی دیلز و همکاران [۹] یک مدل تماسی با رفتار ویسکوالاستوپلاستیک (VEP) برای سیب توسعه دادند. این مدل بر اساس مدل تورنتون الاستوپلاستیک^۵ بود. بر اساس نتایج مشخص گردید که در محدوده وسیع سرعت ضربه (۰/۳ تا ۱/۵ متر بر ثانیه)، مدل VEP با مقدار $R^2=0/90$ توصیف بهتری از نمودار نیرو-تغییر شکل نسبت به مدل ویسکوالاستیک کوابرا و کونو^۶ با مقدار $R^2=0/71$ داشت. پولات و همکاران [۱۰] از آزمون‌های ضربه و فشار به منظور تعیین ویژگی‌های مکانیکی و حساسیت کبودی استفاده نمودند. در این پژوهش، نیروهای مختلفی در جهت قطر و ارتفاع به نمونه‌ها وارد و تغییرات قطر و ارتفاع آنها طی بارگذاری، بلافاصله بعد از بارگذاری و یک ساعت بعد از بارگذاری اندازه‌گیری شدند. مطابق با نمودار نیرو-جابجایی، ویژگی‌های مکانیکی در نقطه تحمل بیولوژیکی اندازه‌گیری و مقدار انرژی همچنین ضریب پواسن با توجه به تغییر شکل در قطر و طول به کمک روابط ریاضی محاسبه گردیدند. در پژوهشی صدرنیا و همکاران [۱۱] با شبیه‌سازی کامپیوتری میزان لهیدگی موضعی میوه سیب را تعیین کردند. نتایج بررسی‌های انجام‌شده روی مدل‌های شبیه‌سازی نشان داد بین نتایج مدل الاستیک و آزمایش اختلاف معنی‌دار وجود دارد، در حالیکه بین نتایج مدل الاستوپلاستیک و آزمایش اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد مشاهده نشد. حداکثر بارگذاری مجاز برای رقم رد دلشیز به کمک مدل شبیه‌سازی شده با خواص مادی الاستوپلاستیک ۳۲ نیوتن بدست‌آمد. در پژوهشی دیگر از پردازش تصویر به منظور تعیین ویژگی‌های ویسکوزیته خرما استفاده شد [۱۲]. در این پژوهش ویژگی‌های

1. Phenolic
2. Carotenoid
3. Felvedo
4. Albedo

5. elastoplastic Thornton
6. kuwabara and kono(kk)

۵٪ ارتفاع نمونه به حداکثر کرنش فشاری ۳۵٪ افزایش یافت. از آنجا که نمونه‌های بیولوژیکی از لحاظ فیزیولوژیکی فعال و حساس به خشک شدن هستند، فاز آسایش نسبت به زمان آسایش می‌بایست کوتاه در نظر گرفته شود [۱۴]، لذا بعد از هر افزایش، کرنش به مدت ۶۰ ثانیه حفظ و کاهش نیرو در طول زمان با نرخ ۳۰ هرتز ذخیره گردید [۱۵]. در طول آزمایش بر خلاف پژوهش‌های پیشین سطح مقطع نمونه‌ها با کمک پردازش تصویر تعیین شد. بدین منظور دستگاه آزمون مواد به بخشی شامل یک وبکم (لاجیتک، مدل c930e HD، تایوان) در راستای محور Z و سامانه نورپردازی مجهز گردید. دوربین موجود به منظور اندازه‌گیری برخط مساحت در خلال اعمال بار مکانیکی استفاده شد. صفحه بالایی و پایینی جعبه که محل قرارگیری وبکم بود از جنس پلکسی شیشه شفاف ساخته شد تا سطح تماس دقیق هر میوه به راحتی بدست آید (شکل ۱).

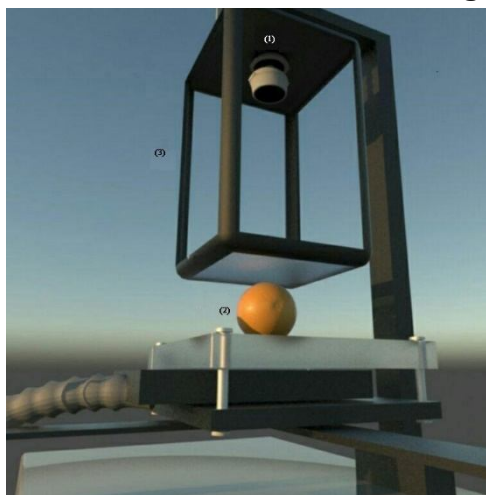


Fig 1 Schematic of used device; (1) camera; (2) sample; (3) rectangular structure

۲-۳- پردازش تصویر، تعیین مساحت تماس و مدول یانگ

به منظور استخراج سطح تماس ابتدا تصاویر از فضای RGB (شکل ۲a) به فضای HSV (شکل ۲b) منتقل شدند. سپس با اعمال آستانه‌گذاری سه‌بعدی (رابطه ۱) بر روی تصاویر، جداسازی سطح تماس صورت پذیرفت (شکل ۲c). نهایتاً با شمارش پیکسل‌های سفید در تصاویر باینری مساحت ناحیه تماس تعیین شد.

$$I_A = \begin{cases} 0.333 < H < 0.999 \\ 0.005 < S < 0.351 \\ 0.921 < V < 0.923 \end{cases} \quad (1)$$

ویسکوالاستیک نمونه‌ها در ۶ محتوای رطوبت و ۴ سطح دما مورد بررسی قرار گرفتند. تمام نمونه‌ها با فشردگی‌سازی یکپارچه برای تنش آسایش در طول ۳۰۰ ثانیه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل ماکسول عمومی و نوسینوویتک^۷ نسبت به مدل پلاژ، ویژگی‌های الاستیک خرما را بهتر توصیف می‌کند. به علاوه مشخص گردید که رطوبت محصول نسبت به دما، تاثیر بیشتری بر ویژگی‌های ویسکوالاستیک دارد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، هدف از این پژوهش بررسی رفتار تراکمی نارنج در بارگذاری مکانیکی شبه استاتیک با انجام آزمایشات تنش آسایشی نمونه‌ها در سطوح مختلف کرنش از پیش تعیین شده در نظر گرفته شد. بعلاوه در این پژوهش تغییرات سطح مقطع هنگام بارگذاری با کمک پردازش تصویر اندازه‌گیری و نهایتاً برآورد دقیق‌تری از تنش موجود در میوه بدست آمد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نمونه

تعداد ۱۰۰ عدد نارنج از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان تهیه و پس از شست‌وشو و ضد عفونی به یخچال منتقل و یک روز در میان (طی ۹ روز انبارمانی) مورد آزمایش قرار گرفتند. برای محاسبه تغییرات با توجه به شکل، اندازه و ساختار سلولی میوه نارنج، به پیشنهاد استاندارد آس آبی ای^۸ [۱۳] هر یک از پارامترهای مورد آزمایش، ۲۰ بار تکرار شدند.

۲-۲- آزمون آسایش

۲-۲-۱- آزمون‌های مکانیکی

رفتار ویسکوالاستیک نمونه‌ها در خلال انبارمانی در کرنش‌های مختلف، با انجام آزمون آسایش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. فشردگی‌سازی نمونه‌ها به کمک دستگاه آزمون مواد (سرروالکتريکال سنتام، مدل STM-20، کشور ایران) با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام پذیرفت. کرنش فشاری \mathcal{E} از

7. Nussinovitch
8. ASABE

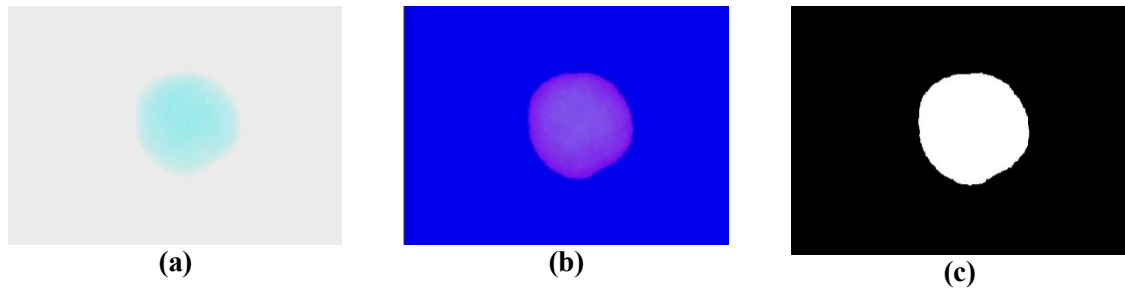


Fig 2 steps of contact area segmentation; (a) image in the RGB space; (b) image in the HSV space; (c) binary image

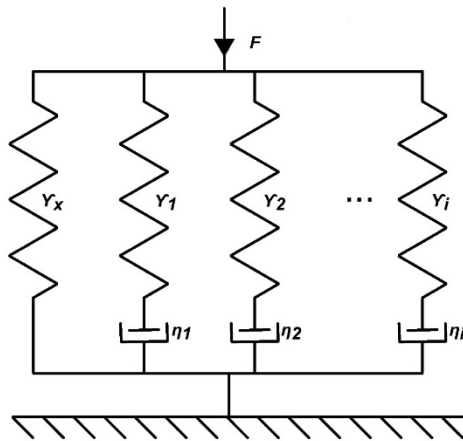


Fig 3 General Maxwell Model Design, which includes the parallel array of a spring element and i Maxwell element

این ثوابت به هر جز از مدل ماکسول نسبت داده شدند و مدول جانبی E_A با توجه به رابطه (۴) محاسبه گردید [۱۷]:

$$E_A = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F_x}{A \cdot \varepsilon} \quad (4)$$

در این رابطه از مساحت بدست آمده از تصاویر برای محاسبه مدول الاستیسیته استفاده شد.

۲-۵- مدل پلاژ

داده‌هایی که از آزمایشات در آزمون‌های مکانیکی به دست آمده، بر اساس روش پیشنهاد شده پلاژ نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند [۱۸]. در این رویکرد منحنی آسایش (نیرو-زمان)، نرمال و سپس خطی شد که پارامترهای نرمال شده توسط رابطه (۵) محاسبه شدند [۱۹]:

$$Y(t) = \frac{F(0) - F(t)}{F(0)} \quad (5)$$

بعد از تعیین مساحت سطح تماس، به منظور محاسبه مدول یانگ، مقادیر نیرو و جابه‌جایی وارد بر نمونه‌ها در هفت مرحله کرنش از روی نمودارهای نیرو-جابه‌جایی حاصل از دستگاه تست مواد استخراج شدند. با توجه به تعیین مساحت نمونه در هر لحظه به کمک پردازش تصویر، تنش حاصل از اعمال بار نیز در هر لحظه محاسبه و با استفاده از شیب نمودار تنش-کرنش، مدول الاستیسیته برای هر مرحله کرنش بدست آمد.

۲-۴- مدل ماکسول

محاسبه آسایش از منحنی نیرو-زمان، با استفاده از رابطه (۲) انجام شد [۱۶]:

$$F(t) = F_x + F_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + F_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + \dots + F_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

که در این رابطه F نشان‌دهنده نیروی اعمال شده و t زمان است. قسمت‌های مختلف رابطه (۱) نشان‌دهنده عناصر متمایز مدل ماکسول عمومی است که در شکل (۲) ارائه شده است. این مدل یک آرایش موازی فنر تکی و i عنصر ماکسول است که هر ردیف شامل یک فنر و یک میراکننده می‌باشد. در این مدل که هر بخش شامل یک فنر و یک میراکننده است که هر

کدام به ترتیب با یک ثابت فنر γ_i و یک ثابت میراکننده η_i بیان می‌شوند. بعلاوه τ زمان ثابت آسایش، η ضریب ماندگاری و γ ثابت فنر می‌باشند. رابطه (۳) ارتباط میان این پارامترها را نشان می‌دهد.

$$\tau = \frac{\eta}{\gamma} \quad (3)$$

۳- نتایج و بحث

شکل (۴) نمودار تغییرات نیرو و کرنش، برای یک نمونه نارنج (روز یکم انبارمانی، نمونه شاهد) بعد از افزایش کرنش فشاری از ۵ درصد تا ۳۵ درصد ارتفاع را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مقدار کرنش در مدت ثابت بودن جابه‌جایی، روند ثابتی داشته و نیرو در این زمان روند نزولی را طی می‌کند. این مساله نشان از مستهلک شدن نیرو توسط بافت‌های میوه در خلال جابه‌جایی ثابت است.

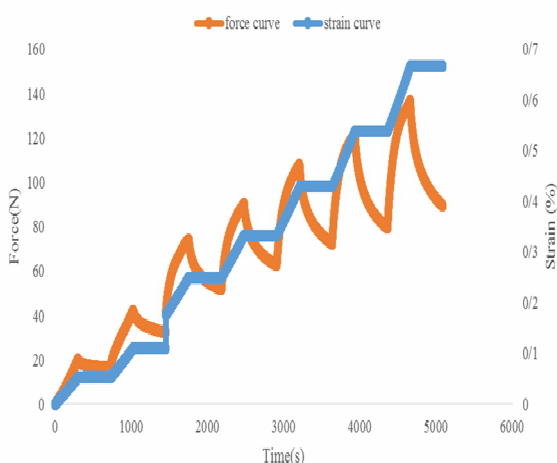


Fig 4 Relaxation diagram and strain corresponding to seven increasing strain steps

به منظور تعیین تنش و مدل ویسکوالاستیک میوه نارنج در خلال انبارمانی نیاز به محاسبه دقیق تغییرات مساحت در خلال بارگذاری می‌باشد. بدین منظور منطقه تماس بین صفحه فشاردهنده و نمونه را توسط دوربین موجود در راستای محور Z پس از آستانه گذاری، با شمارش پیکسل‌های سفید تعیین شد. مساحت تعیین شده در پردازش تصویر بر حسب پیکسل بود که با استفاده از یک شیء با مساحت مشخص به واحد SI کالیبره گردید.

شکل (۵) روند تغییرات مساحت سطح تماس طی زمان بارگذاری برای نمونه شاهد (روز یکم) را نشان می‌دهد. مساحت سطح تماس نمونه‌ها از لحظه شروع بارگذاری روند افزایشی داشت و پس از رسیدن به هر مرحله ثابت نمودار نیرو-جابه‌جایی، اندکی کاهش یافت که نشان از آسایش تنش در نمونه‌ها است.

در این رابطه $Y(t)$ پارامتر نزول، $F(0)$ مقدار اولیه پارامتر نزول F ، همچنین $F(t)$ مقدار پارامترهای نزول در زمان t است. رابطه بین t و $Y(t)$ را می‌توان در فرم ریاضی ساده‌تر با رابطه (۶) بیان کرد:

$$Y(t) = \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (6)$$

شکل خطی رابطه (۶) به صورت رابطه (۷) قابل باز نویسی است:

$$\frac{t}{Y(t)} = k_1 + k_2 t \quad (7)$$

ثابت‌های k_1 و k_2 به ترتیب ب عنوان عرض از مبدا و شیب خط رگرسیون خطی هستند. برخلاف مدل ماکسول در این مدل تنها نیاز به دو ثابت برای توصیف منحنی است؛ بنابراین موجب تسهیل مقایسه رفتار آسایش نمونه‌های مختلف ویسکوالاستیک می‌شود. ثابت‌های k_1 و k_2 با رگرسیون منحنی‌های آسایش نرمال شده و خطی شده، محاسبه می‌شوند. معکوس k_2 نشان دهنده سطح آستانه احتمالی پارامتر آسایش نرمال شده در زمانی که $t \rightarrow \infty$ و معکوس k_1 نرخ اولیه آن را نشان می‌دهد. تقریب مدول جانبی E_A با کمک مدل پلاژ بر اساس رابطه (۸) محاسبه شد [۲۰]:

$$E_A = \frac{F(0)}{A \cdot \varepsilon} \cdot \left(1 - \frac{1}{k_2}\right) \quad (8)$$

که A مساحت سطح تماس نمونه که از تصاویر محاسبه شده و ε کرنش ثابت است.

۲-۶- تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش از ۱۰۰ عدد نارنج برای جمع‌آوری داده‌ها طی ۵ روز فیلم‌برداری صورت گرفت. برای همه نمونه‌ها مساحت منطقه تماس از تصاویر استخراج شد و مقدار نیرو و جابه‌جایی از دستگاه تست ماده بدست آمد. تجزیه و تحلیل روی این داده‌ها در قالب طرح فاکتوریل و آنالیز آماری با استفاده از نرم افزار SAS انجام شد.

نتایج تجزیه واریانس عناصر ماکسول و پلاژ در جدول (۱) آمده است. بر اساس نتایج، اثر زمان انبارمانی تنها بر عناصر F_x ($p < 0.01$) و τ_1 ($P < 0.05$) معنی دار گردید. در حالی که اثر مراحل کرنش بر عناصر بیشتری ($F_x, F_1, F_3, \tau_1, \tau_3$) و از مدل ماکسول معنی دار گردید اما از طرف دیگر اثر زمان انبارمانی در مراحل کرنش برای این عناصر معنی دار نگردید. به طور مشابه اثر زمان انبارمانی و همچنین زمان انبارمانی بر مراحل کرنش بر عناصر پلاژ نیز معنی دار نشد. اما مراحل کرنش به صورت معنی داری سبب تغییر در عناصر این مدل (K_1 و K_2) گردید. این مساله نشان تاثیر بیشتر مراحل کرنش نسبت به زمان انبارمانی بر مدل ماکسول و پلاژ است.

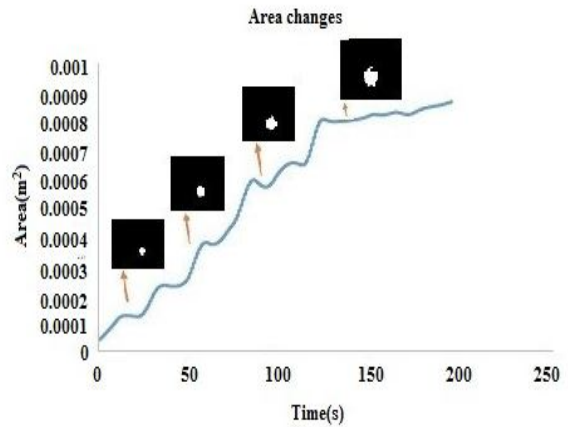


Fig 5 Area changes diagram in time during loading

Table 1 Results of analysis of variance of Maxwell and Peleg elements

| Mean Squares | | | | | | | | | | Df | S.O.V |
|------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|----|-------------------|-------|
| K_2 | K_1 | τ_3 | τ_2 | τ_1 | F_3 | F_2 | F_1 | F_x | | | |
| 0.000064 ^{ns} | 0.00004 ^{ns} | 606.99 ^{ns} | 6.41 ^{ns} | 950.18* | 1163.72 ^{ns} | ^{ns} | 475.57 ^{ns} | 390.27** | 4 | Storage time | |
| 0.012** | 0.03077** | 6144.44** | 19.22* | 6367.55** | 8212.69** | 37661.6 | 2080.73** | 107.64** | 6 | Strain steps | |
| ^{ns} | 0.004 ^{ns} | 543.006* | 5.62 ^{ns} | 542.36 ^{ns} | 1805.26 ^{ns} | 44170.2 ^{ns} | 193.84 ^{ns} | 78.91 ^{ns} | 24 | Time*strain steps | |
| 0.000093 | 0.0039 | 318.43 | 6.86 | 342.65 | 1664.4 | 41932.4 | 292.65 | 74.25 | 68 | Error | |

*, ** and ^{ns} significant at the level of 1 and 5 percent and non-significant, respectively.

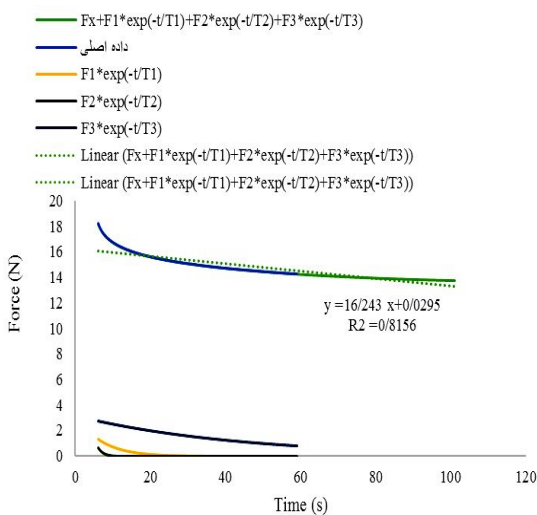


Fig 6 Relaxation diagram with the Maxwell model, a spring and three Maxwell elements and curves of different parts of Eq. (2)

شکل (۶) نمودار آسایش تنش توسط حالت‌های مختلف مدل ماکسول (شامل یک فنر و سه عنصر ماکسول، داده‌های اصلی، عنصر اول ماکسول، عنصر دوم ماکسول، عنصر سوم ماکسول) را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل (۶) مشخص است نمودار ماکسول با سه عنصر با $R^2 = 0.81$ به داده‌های اصلی بسیار نزدیک بود. روند ثبت شده در این پژوهش با نمودار آسایش سایر مواد ویسکو الاستیک مانند نودل [۱۹]، ژل آگار، گوشت، پنیر پخته، پنیر مازارلا و نان سفید پان [۲۱]، پوست گوجه فرنگی [۲۲] خمیر کاج خالص سازی شده [۲۳]، سیب [۲۴] و گلابی [۲۵] در یک راستا می‌باشد.

نیز بیشترین مقدار آن بدست آمد. بین مقدار میانگین F_3 از مرحله اول تا چهارم اختلاف معنی داری مشاهده نشد و در مرحله آخر به بیشترین مقدار رسید که با مراحل چهارم، پنجم و ششم دارای اختلاف معنی داری نبود. مقدار τ_1 مانند عناصر قبلی در مرحله اول کمترین مقدار خود را داشت و در مرحله آخر به مقدار بیشینه خود رسید. میانگین عنصر τ_2 در مرحله پنجم بیشترین مقدار را داشت و با مراحل ششم و هفتم اختلاف معنی داری نداشت. برای عنصر τ_3 بیشترین مقدار در مرحله دوم بود که میان مقادیر این مرحله با مراحل چهارم و پنجم همچنین ششم و هفتم اختلاف معنی داری مشاهده شد ($p > 0.05$). این رفتار ویسکو الاستیک مشابهی به علت استحکام و انسجام متناسب ساختار بافت محصولات مختلف کشاورزی مانند خرما [۲۶]، و پاستا [۲۷] مشاهده گردید.

مقادیر عناصر مدل ماکسول برای هفت مرحله از کرنش در جدول (۲) آمده است. مطابق جدول، میانگین مقادیر عناصر F_3 ، F_1 ، F_x ، τ_1 و τ_2 مدل ماکسول در مراحل بارگذاری دارای اختلاف معنی داری بودند و تنها مقادیر F_2 در طول مراحل بارگذاری اختلاف معنی داری با یکدیگر نداشتند. مقدار عنصر F_x در مراحل مختلف کرنش دارای روند افزایشی معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد داشت. این پارامتر در مدل ماکسول نیروی باقی مانده است و پس از مدت زمان آسایش مورد نظر بدست می آید. بر این اساس مرحله آخر بارگذاری حداکثر نیروی باقی مانده (۷۴/۱۹۹) را داشت که بعد از آن آسایش در نمونه اتفاق نمی افتد در حالی که حداقل مقدار آن (۱۳/۶۶۹) و مربوط به مرحله اول بارگذاری بود. میانگین عنصر F_1 دارای روند افزایش بود به گونه ای که کمترین مقدار را عنصر در مرحله اول مشاهده شد این مقدار با با مرحله دوم و سوم اختلاف معنی داری نداشت ($p > 0.05$) و در مرحله آخر

Table 2 Maxwell element values for seven increments of sample strain

| τ_3 | τ_2 | τ_1 | F_3 | F_2 | F_1 | F_x | Strain steps |
|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------|
| 40.82 ^b | 2.03 ^{bc} | 9.68 ^d | 5.02 ^b | 62.62 ^a | 12.904 ^{cd} | 13.669 ^g | 1 |
| 63.07 ^a | 1.53 ^c | 7.22 ^d | 6.95 ^b | 54.34 ^a | 5.504 ^d | 21.197 ^f | 2 |
| 38.65 ^b | 2.39 ^{bc} | 18.11 ^d | 9.56 ^b | 61.54 ^a | 18.282 ^c | 32.843 ^e | 3 |
| 24.01 ^c | 3.55 ^{abc} | 35.99 ^c | 31.8 ^{ab} | 50.76 ^a | 19.4 ^c | 49.631 ^d | 4 |
| 21.22 ^c | 4.62 ^a | 41.42 ^{bc} | 48.34 ^a | 54.34 ^a | 24.626 ^{bc} | 57.474 ^e | 5 |
| 5.72 ^d | 3.73 ^{ab} | 52.35 ^{ab} | 51.2 ^a | 193.9 ^a | 32.745 ^{ab} | 66.72 ^b | 6 |
| 8.09 ^d | 3.91 ^{ab} | 58.97 ^a | 60.41 ^a | 73.63 ^a | 39.828 ^a | 74.199 ^a | 7 |

Mean in each column followed by similar letter (s) are not significant at 5% probability level using Duncan.

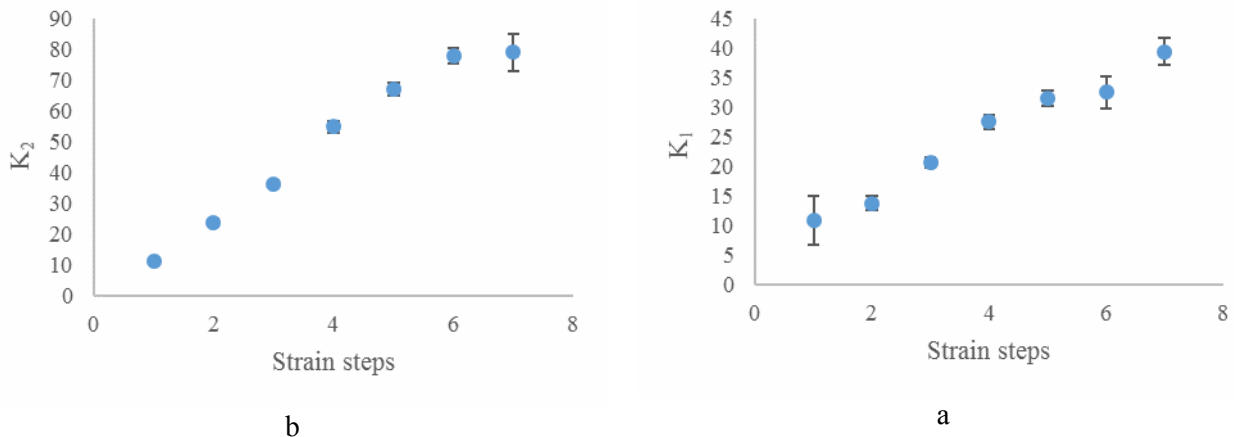
نهم دارای اختلاف معنی داری نبود. عنصر τ_1 در روزهای اول، پنجم و نهم بیشترین مقدار را داشت که با روز سوم اختلاف معنی داری نداشت ولی با روز هفتم در سطح پنج درصد دارای اختلاف معنی داری بود. در پژوهشی حسن و همکاران [۲۶] کرنش را به صورت یک مرحله ای اعمال کردند و مقدار عنصر F_x را برای رقم ساکاری^{۱۱} خرما ۲۱۸ کیلو پاسکال گزارش کردند که به دلیل اعمال یک مرتبه ای کرنش، مقدار این عنصر را بیشتر از مقادیر پژوهش حاضر بدست آوردند.

جدول (۳) تغییرات مقادیر عناصر ماکسول در خلال انبارمانی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود تنها عناصر F_x و τ_1 دارای اختلاف معنی داری بودند و بین مقادیر دیگر در طول انبارمانی اختلاف معنی داری مشاهده نشد ($p > 0.05$). میانگین عنصر F_x در روز پنجم بیشترین مقدار را داشت و با روزهای دیگر انبارمانی (بجز روز سوم) دارای اختلاف معنی داری در سطح ۵ درصد بود. همچنین میانگین F_x در روز اول کمترین مقدار را داشت (۴۰/۱۹) که با روزهای هفتم و

Table 3 Maxwell elements values during storage

| τ_3 | τ_2 | τ_1 | F ₃ | F ₂ | F ₁ | F _x (pa) | Day |
|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----|
| 27.99 ^{ab} | 3.02 ^a | 38.419 ^a | 29.41 ^a | 62.92 ^a | 17.899 ^b | 40.019 ^c | 1 |
| 31.17 ^{ab} | 2.34 ^a | 29.99 ^{ab} | 23.27 ^a | 68.46 ^a | 22.474 ^{ab} | 48.839 ^{ab} | 3 |
| 24.53 ^b | 3.81 ^a | 35.78 ^a | 31.72 ^a | 55.54 ^a | 29.699 ^a | 50.944 ^a | 5 |
| 36.77 ^a | 2.93 ^a | 21.25 ^b | 25.52 ^a | 52.91 ^a | 18.64 ^b | 43.995 ^{bc} | 7 |
| 23.54 ^b | 3.44 ^a | 34.44 ^a | 42.41 ^a | 153.68 ^a | 20.206 ^{ab} | 42.726 ^{bc} | 9 |

Mean in each column followed by similar letter (s) are not significant at 5% probability level using Duncan.

**Fig 7** Plot of k_1 (a) and k_2 (b) variations in the strain stages in Peleg model

مقادیر k_1 و k_2 را برای پنیر چدار ۲۰۳ و ۱/۱۱ و برای گوشت سیب زمینی ۴/۴ و ۱/۵۶ بدست آوردند. مقادیر بدست آمده برای k_1 و k_2 در این پژوهش با مقادیر گزارش شده توسط تیلن و همکاران [۱۵] برای پوست پوملو دارای روند یکسانی می‌باشد. تیلن و همکاران [۱۵] نیز روند صعودی برای مقادیر k_1 و k_2 گزارش نمودند به طوری که مقادیر k_1 از ۱۵/۰۶ تا ۴۴/۱۸ و مقادیر k_2 از ۲/۶۸ تا ۶/۰۵ افزایش یافتند.

میانگین مقادیر k_1 و k_2 در مراحل کرنش در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به مراحل مختلف کرنش، روند تغییرات k_1 و k_2 مشابه بود و بیشترین مقدار در مرحله هفتم و کمترین مقدار در مرحله اول مشاهده گردید. در پژوهشی حسن و همکاران [۲۶] مقدار k_1 و k_2 را برای خرما رقم بارهی به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۱۶، رقم خاداری ۰/۴۸ و ۰/۱۶، رقم خلاس ۰/۶۳ و ۰/۱۶ بدست آوردند. پلاژ و همکاران [۲۸]

Table 4 The results of analysis of variance of elasticity modulus in three methods: Peleg (E_1), Maxwell (E_2) and image processing (E_3)

| Mean Squares | | | | |
|--------------------|--------------------|---------------------|----|-------------------|
| E_3 | E_2 | E_1 | Df | S.O.V |
| 4.38 ^{**} | 3.7 ^{**} | 2.043 ^{**} | 4 | Storage day |
| 2.02 ^{**} | 1.61 ^{**} | 1.16 ^{**} | 6 | Strain steps |
| 4.04 ^{ns} | 3.31 ^{ns} | 2.18 ^{ns} | 24 | Time*strain steps |
| 3.41 | 3.8 | 1.05 | 68 | Error |

^{**}, ^{ns} and ^{ns} significant at the level of 1 and 5 percent and non-significant, respectively.

سطح یک درصد معنی‌دار بود. اما اثر متقابل زمان انبارمانی بر مراحل کرنش بر مقادیر الاستیسیته معنی‌دار نگردید.

نتایج تجزیه واریانس مدول الاستیسیته در سه روش (پلاژ، ماکسول و پردازش تصویر) در جدول (۴) نشان می‌دهد که اثر زمان انبارمانی و مراحل کرنش بر هر سه مدول الاستیسیته در

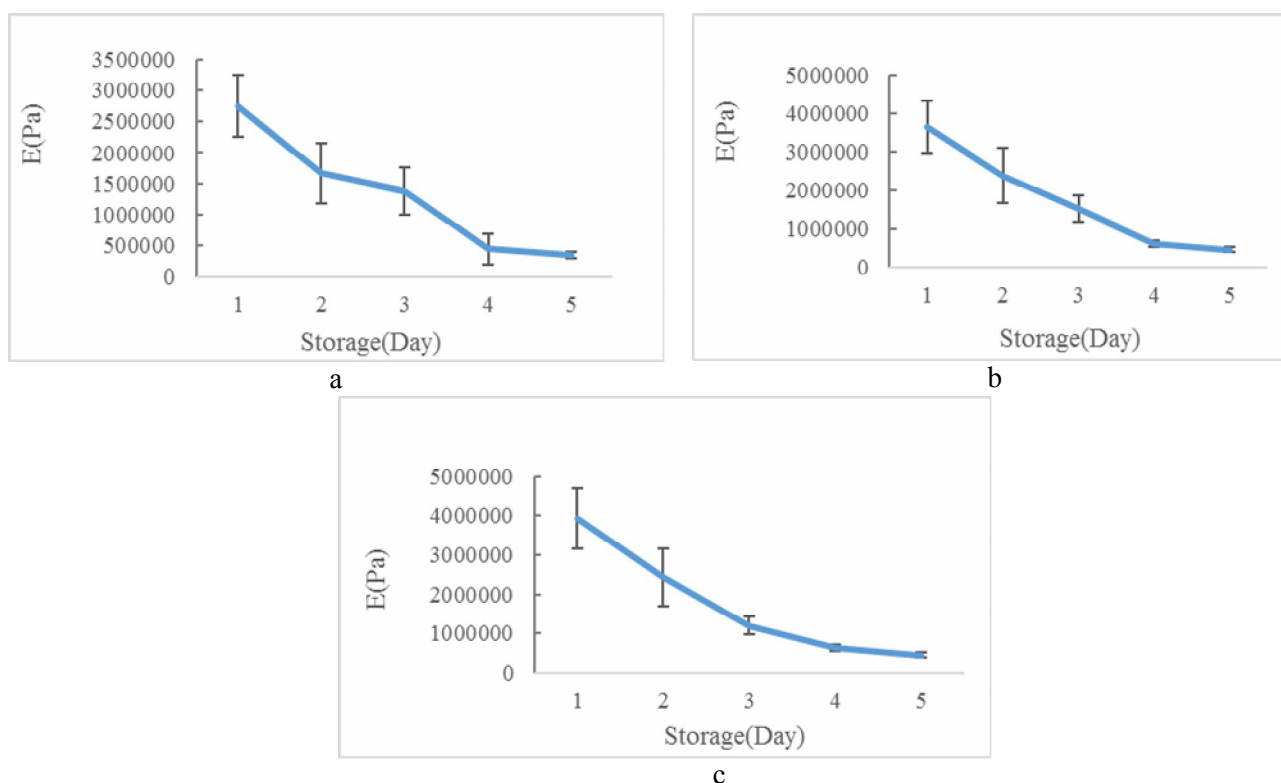
Table 5 The trend of modulus of elastic modulus in three methods: Peleg (E_1), Maxwell (E_2) and image processing (E_3) in the stages of increase of strain

| E_3 (Pa) | E_2 (Pa) | E_1 (Pa) | Strain steps |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 391359 ^a | 3212427 ^a | 2771976 ^a | 1 |
| 2923765 ^a | 3004309 ^a | 2028395 ^{ab} | 2 |
| 2261847 ^{ab} | 2521220 ^{ab} | 179245 ^b | 3 |
| 1179666 ^{bc} | 1351326 ^{bc} | 877483 ^c | 4 |
| 893244 ^{bc} | 1072064 ^{bc} | 673713 ^c | 5 |
| 692219 ^c | 936152 ^c | 579939 ^c | 6 |
| 634464 ^c | 782384 ^c | 497323 ^c | 7 |

Mean in each column followed by similar letter (s) are not significant at 5% probability level using Duncan.

مرحله چهارم و پنجم مشاهده نشد. مطابق جدول (۵) با افزایش میزان جابه‌جایی، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. مقدار مدول الاستیسیته در هفت مرحله افزایش کرنش، در روش پردازش تصویر از ۳/۴۹ مگاپاسکال به ۰/۶۳ مگاپاسکال کاهش یافت. نتایج حاصل با نتایج پژوهش ملک آبادی و همکاران (۱۳۹۲) که مدول الاستیسیته پیاز را در جابه‌جایی‌های مختلف محاسبه کردند و پژوهش [۲۹] که مدول الاستیسیته را بین ۱/۳۵ و ۸/۱۴ بدست آوردند در یک راستا می‌باشد.

جدول (۵) تاثیر میزان جابه‌جایی بر مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد. مطابق جدول مدول الاستیسیته در مدل پلاژ (E_1) در مرحله اول بیشترین مقدار و بعد از آن روند کاهشی داشت. بین روز دوم و سوم اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و از مرحله سوم تا هفتم به کمترین مقدار خود رسید. روند تغییرات مدول الاستیسیته برای مدل ماکسول (E_2) و مدل پیشنهاد شده (E_3) مشابه بود. علارغم کاهش مقادیر مدول یانگ اختلاف معنی‌داری بین مراحل اول و دوم با مرحله سوم و همچنین بین

**Fig 8** Changing trend of modulus of elastic modulus in three methods: (a) Peleg, (b) Maxwell, and (c) Image processing during storage

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش مدول الاستیسیته میوه نارنج به کمک سه روش پلاژ، ماکسول و پردازش تصویر در هفت مرحله جابه‌جایی در خلال انبارمانی نه روزه تعیین شد. از آنجایی که در روش ماکسول تعداد عناصر بیشتر هستند و مقایسه این عناصر دشوار است لذا استفاده از مدل پلاژ با داشتن تنها دو ثابت امکان محاسبه مدول الاستیسیته را آسان می‌کند. مقادیر مدول الاستیسیته میوه نارنج در روش پردازش تصویر، پلاژ و ماکسول به ترتیب از ۳/۹ به ۰/۶۴، ۲/۷ به ۰/۴۹ و ۳/۲ به ۰/۷۸ در هفت مرحله افزایش جابه‌جایی کاهش یافت. همچنین مدول الاستیسیته در خلال انبارمانی دارای روند کاهشی غیرمعنی‌داری بود. بعلاوه از آنجایی که در دو روش پلاژ و ماکسول مساحت سطح تماس بدست آمده از پردازش تصویر برای محاسبه مدول الاستیسیته استفاده شد میان مدول الاستیسیته محاسبه شده با روش و ش پلاژ، ماکسول و پردازش تصویر اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. در حالی که در پژوهش‌های گذشته، نمونه را برش و قسمتی با سطح مقطع مشخص جدا می‌کردند و در مدلسازی اعمال می‌شد. اما در روش پردازش تصویر بدون تخریب نمونه با اندازه‌گیری مساحت سطح تماس به راحتی مدول الاستیسیته محاسبه گردید.

۵- قدردانی

بدینوسیله نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان قدردانی می‌نمایند.

۶- منابع

- [1] Plaza, Lucía, Concepción Sánchez-Moreno, Begoña De Ancos, Pedro Elez-Martínez, Olga Martín-Belloso, and M. Pilar Cano, 2011, Carotenoid and flavanone content during refrigerated storage of orange juice processed by high-pressure, pulsed electric fields and low pasteurization," *LWT-Food Science and Technology*, 44(4): 834-839.
- [2] Alquezar, Berta, Carlos Mesejo, Fernando Alferez, Manuel Agustí, and Lorenzo Zacarias, 2010, Morphological and ultrastructural changes in peel of 'Navelate' oranges in relation to variations in relative humidity during postharvest storage

شکل (۸) تاثیر زمان انبارمانی بر مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد. برای مدل پلاژ، ماکسول و روش پردازش تصویر بصورت مشابه بیشترین مدول الاستیسیته در روز اول مشاهده و علاوه بر روند نزولی بین روز سوم و پنجم همچنین روز هفتم و نهم اختلاف معنی‌داری بدست نیامد. این کاهش جزئی در مدول الاستیسیته ممکن است به دلیل نرم شدن بافت پوست باشد. در پژوهشی سینگ و همکاران [۳۰] نیز خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پوست پرتقال را بررسی کردند و مشاهده کردند که مدول الاستیسیته در زمان انبارمانی روند کاهشی داشت. در پژوهشی دیگر جهانگیری و همکاران [۳۱] به بررسی اثر زمان و شرایط انبارمانی بر خصوصیات فیزیکی میوه خیار تحت بارگذاری فشاری پرداختند. مطابق نتایج از روز اول تا ششم مدول الاستیسیته به صورت معنی‌داری کاهش یافت ($p < 0/01$) ولی پس از آن از روز ششم تا نهم مدت زمان انبارمانی تاثیر معنی‌داری بر مدول الاستیسیته نداشت.

از طرف دیگر بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه دانکن مشخص گردید میان مدول الاستیسیته در سه روش با یکدیگر اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. همانطور که توسط نویسندگان دیگر [۳۲] نیز بیان شده هر دو مدل ماکسول و پلاژ می‌توانند برای تحلیل منحنی‌های آسایش مواد بیولوژیکی استفاده شوند اما مقایسه تعداد عناصر زیاد وقتی این عناصر مستقل از هم عمل می‌کنند امری دشوار است [۱۹]. لذا مزایای روش پلاژ سادگی ریاضی و امکان محاسبه ثابت‌های آن با استفاده از رگرسیون خطی است [۳۳]. با این حال استفاده از روش پردازش تصویر برای اندازه‌گیری مساحت منطقه تماس و دقت بیشتر این روش، داده‌های مربوط به مدول الاستیسیته برای هر نمونه به هم نزدیک هستند. در پژوهش‌های پیشین به منظور محاسبه مساحت سطح تماس در روش‌های ذکر شده، یک قطعه از نمونه با مساحت مشخص را برش می‌دهند که باعث تخریب نمونه می‌شود. اما با توجه به توانایی روش پردازش تصویر در محاسبه مساحت واقعی سطح تماس نیازی به تخریب نمونه نیست و مساحت نمونه‌ها در هر لحظه نیز بدست آمد که این مساله سبب بالا رفتن دقت این دو مدل گردید.

- computer vision for determining viscoelastic characteristics of date fruits, *Journal of Food Engineering*, 118(3): 326-332.
- [13] ASAE (American Society of Association Executives). (2008). ASAE Standard: ASAE S368.1. Compression tests of food materials of convex shape. ASAE. St. Joseph. MI 585-592. USA.
- [14] Liu, Detao, and Yue Chen, 2010, The Impact Behavior of Ecofriendly Cellulosic Fiber-Based Packaging Composites, *WOOD FIBER SCIENCE*, 42(4): 460-466.
- [15] Thielen, Marc, Thomas Speck, and Robin Seide, 2013, Viscoelasticity and compaction behaviour of the foam-like pomelo (*Citrus maxima*) peel, *Journal of Materials Science*, 48(9): 3469-3478.
- [16] Saeidirad, Mohammad Hossien, Abbas Rohani, and Saeed Zarifneshat, 2013, Predictions of viscoelastic behavior of pomegranate using artificial neural network and Maxwell model, *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 1-7.
- [17] Chakespari, Abbas Gorji, Rajabipour, Ali and Mobli, hossein, 2010, Anisotropic relaxation and creep properties of apple (cv. Shafi Abadi and Golab Kohanz), *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2, 200-205.
- [18] Peleg, Mor, 1980, Linearization of relaxation and creep curves of solid biological materials. *Journal of Rheology*, 24(4), 451-463.
- [19] Bellido, Gary G, and Hatcher, D. William, 2009, Asian noodles: revisiting Peleg's analysis for presenting stress relaxation data in soft solid foods, *Journal of Food Engineering*, 92(1), 29-36.
- [20] Li, Zhiguo, Fengli Miao, and James Andrews, 2017, Mechanical Models of Compression and Impact on Fresh Fruits, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(6), 1296-1312.
- [21] Del Nobile, Mesejo. A, Chillo, Sani, Mentana, Andre, and Baiano, Antom, 2007, Use of the generalized Maxwell model for describing the stress relaxation behavior of solid-like foods, *Journal of Food Engineering*, 78(3): 978-983.
- [22] Rajabipour, Ali, Zarielfard, Mohammad Reza, Dodd, Garron Tina and Norris, Enton. R, 2004, Tensile strength and relaxation of tomato skin by a loop technique. *International Agrophysics*, 18(2): 153-158.
- [23] Rodriguez-Sandoval, Eduardo, Alejandro and development of peel pitting, *Postharvest Biology and Technology*, 56(2): 163-170.
- [3] Fischer, Sebastian F., Marc Thielen, Ruth R. Loprang, Robin Seidel, Claudia Fleck, Thomas Speck, and Andreas Bührig Polaczek, 2010, Pummelos as concept generators for biomimetically inspired low weight structures with excellent damping properties, *Advanced Engineering Materials*, 12(12), B658-B663.
- [4] Seidel, Robin, Andreas Bührig-Polaczek, Claudia Fleck, and Thomas Speck, 2009, Impact resistance of hierarchically structured fruit walls and nut shells in view of biomimetic applications. In *Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference*. French Guyana, France: ECOFOG, Cayenne (pp. 406-11).
- [5] Mansouri, Yaser, Khazaei, Javad, Hassan-Beygi, Seyed Reza, Mohtasebi, seyed saeid, 2011, Post harvest characteristics of pomegranate (*Punica granatum L.*) fruit, *Cercetari agronomice in Moldova*, 44(2), 5-16.
- [6] Akar, Rüçhan, and Aydin, Cuneyt, 2005, Some physical properties of gumbo fruit varieties. *Journal of Food Engineering*, 66(3): 387-393.
- [7] Sozer, Nesli, and Ali Coskun Dalgic, 2007, Modelling of rheological characteristics of various spaghetti types, *European Food Research and Technology*, 225(2): 183-190.
- [8] Niklas, Karl J, 2007, Maximum plant height and the biophysical factors that limit it, *Tree Physiology*, 27(3): 433-440.
- [9] Diels, Elien, Tim Odenthal, Janos Keresztes, Simon Vanmaercke, Pieter Verboven, Bart Nicolai, Wouter Saeys, Herman Ramon, and Bart Smeets, 2016, Development of a visco-elastoplastic contact force model and its parameter determination for apples, *Postharvest Biology and Technology*, 120, 157-166.
- [10] Polat, Refik, Turkan Aktas, and Ali Ikinici, 2012, Selected mechanical properties and bruise susceptibility of nectarine fruit, *International Journal of Food Properties*, 15(6): 1369-1380.
- [11] Sadrnia, Hassan, Emadi, Bagher, Rajabipour, Ali, De beardmaeker, Joos, 2011, Computer Simulation of Bruise in Red Delicious Variety of Apple Fruit. *Iranian Biosystems Engineering*, 42 (1), 69-78.
- [12] Alirezai, Mohsen, Dariush Zare, and Seyed Mehdi Nassiri, 2013, Application of

- relaxation data presentation of solid foods. *Rheologica Acta*, 22(1): 108-113.
- [29] Cakir, Enime, Alayunt, Alp and Kemal, Ozden, 2002, A study on the determination of Poisson's ratio and modulus of elasticity of some onion varieties, *Asian Journal of Plant Sciences*, 1: 376-378.
- [30] Singh, Krishna K., and B. Sreenivasula Reddy, 2006, Post-harvest physico-mechanical properties of orange peel and fruit, *Journal of Food Engineering*, 73(2): 112-120.
- [31] Jahangiri, Mehdi, Seyed Reza Hassan-Beygi, Mohammad Aboonajmi, and Mahmoud Lotfi, 2016, Effects of storage duration and conditions on mechanical properties of Viola cucumber fruit under compression loading, *Agricultural Engineering International*, 18(2), pp.323-332.
- [32] Moghimi, Ali, Mohammad Hosaien Saiedirad, and Ebrahim Ganji Moghadam, 2011, Interpretation of viscoelastic behaviour of sweet cherries using rheological models, *International Journal of Food Science and Technology*, 46(4): 855-861.
- [33] Nussinovitch, Antoni, Ak, Manima. M, Normand, Mota. D, and Peleg, Mor, 1990, Characterization of gellan gels by uniaxial compression, stress relaxation and creep 1. *Journal of Texture Studies*, 21(1): 37-50.
- Fernández-Quintero, and Gerard Cuvelier, 2009, Stress relaxation of reconstituted cassava dough, *LWT Food Science and Technology*, 42(1), 202-206.
- [24] Paes, Sabrina Silva, Gustavo Beulke Stringari, and João Borges Laurindo, 2008, Effect of vacuum impregnation temperature on the mechanical properties and osmotic dehydration parameters of apples, *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 51(4): 599-606.
- [25] Wang, Jan, 2003, Anisotropic relaxation properties of pear, *Biosystems Engineering*, 85(1), 59-65.
- [26] Hassan, Bami. H, Alhamdan, Ali. M, and Elansari, Ali. M, 2005, Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity, *Journal of Food Engineering*, 66(4): 439-445.
- [27] Njintang, Namoy, Parker, Malon.L, Moates, Groi.K, Faulds, Civas.B, Smith, Akad.C, Waldron, Kinin.W, Mbofung, Ciba.Moka.F. and Scher, Jon, 2008, Microstructure and creep-recovery characteristics of achu (a taro based paste) made from freeze dried taro chips as affected by moisture content and variety, *Journal of Food Engineering*, 87(2), pp.172-180.
- [28] Peleg, Mor, and Normand, Mota. D, 1983, Comparison of two methods for stress

Determination of Viscoelastic model of sour orange during storage using image processing

Kazemi Karaji, F.¹, Abdanan Mehdizadeh, S.^{2*}

1. MSc student of Mechanics of Biosystems Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Khuzestan Agricultural Sciences and Natural Resources University.
2. Assistant professor of Mechanics of Biosystems Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Khuzestan Agricultural Sciences and Natural Resources University.

(Received: 2019/05/17 Accepted:2019/12/23)

The mechanical properties of fruit are one of the most important determinants of standards for designing, transforming, processing, and packaging systems. One of the methods for changes in demonstration in the internal structure of fruits during storage is to perform stress relaxation tests in different predetermined strains. Therefore, the purpose of this study was to investigate the orange compression behavior in quasi-static mechanical loadings by performing stress-relaxation tests of samples at predetermined levels of strain and modeling the Maxwell and Peleg method and comparing it with image processing method. In addition, in this study, cross-sectional area changes were measured during loading by image processing. The modulus of elasticity in the image processing method, the Maxwell model and the Peleg model on days 0 to 9 increased from 3.91 to 4.5, 3.6 to 4.53 and 2.7 to 3.45, respectively. which in spite of increasing trend there was no significant difference between them. Since, no significant difference in the output of these two models (Maxwell and Peleg) was observed Peleg with the less number of elements (only two constants) was preferred compared to Maxwell method.

Key Words: Sour orange, Viscoelasticity Model, Computer Vision, Storage

* Corresponding Author E-Mail Address: saman.abdanan@gmail.com