

## بررسی رفتار لزج - کشسان میوه خرمالو در طی نگهداری با استفاده از مدل‌های آسایش تنش

فرهاد سلمانی زاده جوپاری<sup>۱</sup> - علی اصغر زمردیان<sup>۲\*</sup> - حسین رحمانیان<sup>۳</sup> - حسن صفی یاری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۱۰

### چکیده

میوه‌های خرمالو از زمان برداشت تا مصرف در معرض شرایط محیطی مختلف قرار می‌گیرند. از آنجاییکه ویژگی‌های رئولوژی میوه‌ها برای هر عملیات فرآوری مهم می‌باشد، رفتار لزج-کشسان میوه‌های خرمالو در طی نگهداری در شرایط محیطی بوسیله تخمین پارامترهای آسایش آن از طریق داده‌های تجربی آسایش تنش بررسی شد. رفتار رئولوژی میوه‌های خرمالو تحت آزمون فشاری تک محوری برای رهایی تنش به مدت ۴۸۰ ثانیه ارزیابی شد. سه مدل معروف آسایش تنش به نام‌های مدل سه جزئی ماکسول عمومی، ناسینوویچ و پلگ بر داده‌های تجربی برازش شدند و برای ارزیابی مدل‌ها از شاخص‌های ضریب تبیین ( $R^2$ )، خطای استاندارد تخمین (SEE) و درصد خطای نسبی متوسط (ARE%) استفاده گردید. نتایج نشان داد که در طی نگهداری میوه خرمالو در شرایط محیطی مقدار تنش اولیه لازم برای ایجاد یک کرنش ثابت در میوه کامل به طور معنی‌داری به میزان ۸۰٪ کاهش یافت، ولی زمان آسایش تنش در گستره ۳۱۲/۱۰ تا ۳۵۳/۹۰ ثانیه افزایش یافت. طبق نتایج بدست آمده در طی نگهداری میوه، رفتار کشسان میوه خرمالو تشدید و سفتی آن کاهش یافت. هر سه مدل رفتار لزج-کشسان میوه‌های خرمالو را تایید کردند، با این وجود مدل‌های سه جزئی ماکسول عمومی (با  $R^2=0.999$ ،  $SEE=0.017$  و  $ARE=0.19\%$ ) و ناسینوویچ (با  $R^2=0.996$ ،  $SEE=0.057$  و  $ARE=0.36\%$ ) بهترین مدل‌ها در پیش بینی داده‌های تجربی بودند.

واژه‌های کلیدی: مدل سه جزئی ماکسول، مدل ناسینوویچ، مدل پلگ، آسایش تنش، شاخص‌های لزج-کشسان

### مقدمه

خرمالو (*Diospyres kaki*) میوه خوراکی متعلق به شرق آسیا بوده و به طور عمده در چین کشت می‌شود. این میوه در کشورهایمانند ایتالیا، برزیل، فلسطین، اسپانیا، آمریکا، استرالیا و نیوزیلند نیز کشت می‌شود. حدود ۴۰۰ گونه از این میوه در اندازه و رنگ‌های مختلف وجود دارد. این میوه سرشار از مواد مغذی مانند ویتامین C (۷۰ میلی گرم در ۱۰۰ گرم گوشت میوه)، کلسیم (۹ میلی گرم در ۱۰۰ گرم گوشت میوه) و آهن (۰/۲ گرم در ۱۰۰ گرم گوشت میوه) می‌باشد (Tous & Ferguson, 1996). همچنین این میوه از لحاظ ترکیبات فنولی و اثرات تاننی و آنتی اکسیدانی بسیار غنی می‌باشد (Gorinstein et al., 2000). بیشتر محصولات کشاورزی که مشخصات مایعات و جامدات را باهم دارا می‌باشند، به عنوان مواد

لزج-کشسان توصیف می‌شوند، به طوری که خواص آسایش تنش<sup>۵</sup> و مقاومت آنها وابسته به زمان می‌باشند. دانش رفتار لزج-کشسان مواد غذایی و محصولات کشاورزی در زمان بررسی عملیات‌های پس از برداشت همچون حمل و نقل، انتقال، فرآوری و نگهداری حائز اهمیت می‌باشد. همچنین داده‌های مربوط به خواص لزج-کشسان به عنوان یک ورودی برای مدل‌های ریاضی، که تنش‌های داخلی و ایجاد ترک را در طول عملیات‌های فرآوری و حمل و نقل مختلف توصیف و پیش بینی می‌کنند، مورد نیاز می‌باشند (Waananen & Okos, 1992). خواص مکانیکی پارامترهای مهمی را که بازتاب کیفیت مواد غذایی می‌باشند، توصیف می‌کند (Bourne, 2002). این پارامترها بافت<sup>۶</sup>، سفتی<sup>۷</sup> و قابلیت جویدن<sup>۸</sup> را شامل می‌شوند. مواد لزج-کشسان، پدیده آسایش تنش را که یکی از مهمترین فاکتورها در توصیف محصولات کشاورزی می‌باشد، در بر می‌گیرند. زمان آسایش تنش چگونگی سرعت از بین رفتن تنش بعد از دریافت یک تغییر شکل ناگهانی را

۱- دانشجوی دکتری گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

۲، ۳ و ۴- به ترتیب استاد و دانشجویان دکتری گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

\* - نویسنده مسئول: (Email: Zomorod@shirazu.ac.ir)

5 - Stress Relaxation

6 - Texture

7 - Firmness

8 - Chewability

در تمامی واریته‌ها به جز واریته ی سوکاری<sup>۷</sup> در مرحله خلال، کوتاهتر از مرحله ی رطب می‌باشد. Rajabipour و همکاران (۲۰۰۴) آزمون آسایش تنش پوست گوجه فرنگی را با استفاده از روش حلقه ای<sup>۸</sup> انجام دادند و با این روش ضرایب مدل ماکسول عمومی<sup>۹</sup> را تعیین نمودند. Khazaei و Mann (۲۰۰۴) اثر دما و سرعت بارگذاری را روی رفتار مکانیکی و آسایش تنش میوه ی خولان دریا<sup>۱۰</sup> (سنجد تلخ) انجام داده و نشان دادند که میزان تغییر شکل و سرعت بارگذاری یک اثر کاهشی و دما یک اثر افزایشی روی زمان آسایش تنش دارد. Khazaei و Mann (۲۰۰۵) در مطالعه ای اثر رطوبت و دفعات بارگذاری را روی رفتار آسایش تنش دانه ی نخود بررسی نموده و گزارش کردند که میزان رطوبت یک اثر کاهشی و دفعات بارگذاری یک اثر افزایشی روی مقادیر جزء کشسان و زمان آسایش جمله ی اول مدل ماکسول سه جزئی دارد. Del Nobile و همکاران (۲۰۰۷) توانایی مدل ماکسول عمومی برای توضیح رفتار آسایش تنش مواد غذایی شبه جامد را مورد بررسی قرار دادند. آنها از مواد غذایی حجمی و متخلخل استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی با دقت خوبی بر داده‌های آزمایشی منطبق می‌باشد. در صنعت میوه به دلیل شرایط بازارهای داخلی و خارجی و میزان عرضه و تقاضای محصول، بسیاری از میوه‌های فصلی در مرحله کال (نیمه رسیده) برداشت می‌شوند و تا زمان عرضه به بازار در یک شرایط محیطی ثابت نگهداری می‌شوند تا به صورت تازه و رسیده به دست مشتری برسد. اطلاعات کافی در مورد تغییرات لزج-کشسان میوه خرما در طی نگهداری در شرایط محیطی در منابع علمی در دسترس نیست. بنابراین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از: (۱) بدست آوردن داده‌هایی برای توصیف ویژگی‌های آسایش تنش میوه‌های خرما در طی نگهداری در شرایط محیطی (۲) بررسی اثر مدت زمان نگهداری بر رفتار لزج-کشسان میوه خرما و (۳) پیدا کردن بهترین مدل برای توصیف داده‌های آسایش تنش بدست آمده. اطلاعات این پژوهش می‌تواند در طراحی و مدل سازی فرایندهای برداشت، جابجایی و عملیات پس از برداشت میوه خرما به عنوان اطلاعات ورودی قابل استفاده باشد.

### ملاحظات تئوری

مدل ماکسول عمومی یکی از مدل‌های رئولوژی مناسب برای توضیح رفتار لزج-کشسان محصولات کشاورزی می‌باشد (1992) (Mohsenin, 1986; Steffe, 1992; Waananen & Okos, 2002). این مدل بوسیله معادله زیر بیان می‌شود:

نشان می‌دهد. میوه‌های رسیده خرما در تمامی مراحل پس از برداشت، هدفی برای آسیب‌های مکانیکی حاصل از شکست در اثر یک سری بارهای استاتیکی و دینامیکی می‌باشند. این چنین نیروهایی کاهش شدید کیفیت و افزایش احتمال خرابی محصول را در طی نگهداری باعث می‌شوند (Baragale et al., 1994). تعداد زیادی از شاخص‌های مکانیکی و رئولوژی<sup>۱</sup> علاوه بر شرایط فیزیکی از خواص لزج-کشسان نیز تاثیر می‌پذیرند که باید مورد بررسی قرار گیرند. در سالهای اخیر چندین پژوهش در زمینه آسایش تنش میوه‌ها و سبزیجات مانند کشمش (Lewicki & Spiess, 1995)، موز (Kajuna et al., 1998) و سیب زمینی (Fincan & Dejmek, 2003) انجام گرفته است. Lewicki و Wolf (۱۹۹۵) رابطه بین آسایش تنش کشمش‌های مختلف را در سطوح محتوای رطوبتی مختلف بررسی کردند. آنها دریافتند که کشمش‌ها می‌توانند به عنوان جسم شکننده در محتوای رطوبتی زیر ۲۵٪ طبقه بندی شوند، یعنی حدی که احتمال شکست در طول فشار محصول بالاست. Saravacos و Kostaropoulos (۱۹۹۵) برای محاسبه خواص لزج-کشسان یک رقم کشمش محلی به نام سالتانا<sup>۲</sup> که به طور طبیعی با نور خورشید خشک شده بود، از دستگاه آنالیز پروفیل بافت<sup>۳</sup> استفاده کردند. آنها دریافتند که میوه‌های کشمش به صورت توده ای یا انفرادی از یک رفتار لزج-کشسان تبعیت می‌کنند، به طوری که قسمت داخلی میوه جزء لزج و پوست بیرونی آن جزء کشسان را نشان می‌دهد. Kojima و همکاران (۱۹۹۱) از یک پراب<sup>۴</sup> بارگذاری برای اندازه گیری سفتی میوه‌های گوجه فرنگی به صورتی که مقادیر تنش به عنوان تابعی از زمان نمایش داده می‌شد، استفاده کردند. آنها دریافتند که رسیدگی میوه‌های گوجه فرنگی به یک کاهش تا زمان آسایش تنش کمینه مربوط می‌شود. Lima و Singh (۱۹۹۵) ثابت‌های رابطه بین رفتار لزج-کشسان پیپس‌های سیب زمینی و قابلیت شکست آنها را محاسبه کردند. داده‌ها نشان داد که متوسط مقدار مدول الاستیسیته ۸۱۳۰ پاسکال و ثابت زمانی ۶۲ ثانیه بود. Wu و Abbott (۲۰۰۲) مشاهده کردند که مشخصات لزج-کشسان گوجه فرنگی به طور واضح در طی مدت انبارداری تغییر کرده است. Hassan و همکاران (۲۰۰۴) در عربستان سعودی آزمون آسایش تنش هشت واریته ی خرما را در دو مرحله از مراحل رسیدگی خلال<sup>۵</sup> و رطب<sup>۶</sup> مطالعه نموده و گزارش دادند که زمان آسایش تنش

- 1 - Rheology
- 2 - Sultana
- 3 - Texture Profile Analyser
- 4 - Probe
- 5- Khalal
- 6- Rutab

7- Sukkarri

8 - loop technique

9 - Generalized Maxwell model

10- Sea Buckthorn Berries

مدل ماکسول عمومی را بوسیله ی تعریف اعداد ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب برای زمان‌های آسایش اولین، دومین و سومین جزء کشسان-لزج ساده کردند. این مدل برای سه جزء کشسان-لزج به صورت زیر فرمول بندی شده است (Nussinovitch & Peleg, 1990):

$$\sigma_t = \sigma_0 \left( A_1 + A_2 \exp\left(\frac{-t}{10}\right) + A_3 \exp\left(\frac{-t}{100}\right) + A_4 \exp\left(\frac{-t}{1000}\right) \right) \quad (3)$$

مدل دیگری که بر اساس تنش اولیه می‌باشد به صورت زیر است (Peleg & Pollak, 1982):

$$\sigma_t = \sigma_0 - \sigma_0 \left( \frac{abt}{1+bt} \right) \quad (4)$$

اگر  $a=1$  باشد، مدل رفتار کشسان را بیان می‌کند، در حالیکه اگر  $a=0$  باشد، تنش در یک زمان محدود به سمت صفر میل می‌کند (مانند جوهر مایع). پارامتر  $b$  نرخ تاخیر را بیان می‌کند. اگر  $b=0$  باشد، تنش هرگز به آسایش کامل نمی‌رسد و هرچه میزان  $b$  کم باشد، نرخ تاخیر آسایش تنش به آرامی کاهش می‌یابد.

## مواد و روش‌ها

### آماده سازی نمونه ها

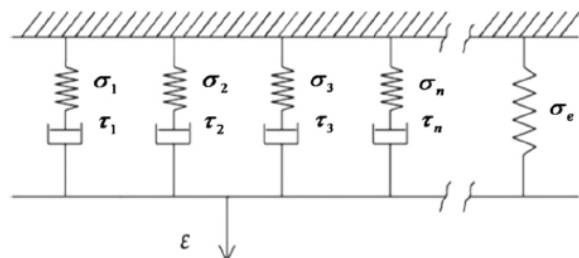
میوه‌های خرمالو رقم خرمندی در مرحله کال (نیمه رسیده و به رنگ نارنجی با رگه‌های سبز) به صورت دستی از یکی از باغات خرمالو در شهرستان شیراز واقع در استان فارس برداشت شدند. میوه‌های سالم و یکنواخت و عاری از هر گونه ضایعات از سایر میوه‌ها جدا شد و به بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شیراز منتقل گردیدند و در یک دستگاه ژرminatور<sup>۲</sup> (مدل X610، ساخت کشور ایران) به منظور کنترل نور، رطوبت و دما در طول شبانه روز، در دمای ۱۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۵ درصد به مدت ۲۲ روز نگهداری گردیدند. کلیه آزمایش‌ها در ۱۰ تکرار و در فاصله زمانی ۳ روز انجام شدند. میزان رطوبت اولیه میوه‌های خرمالو به وسیله آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس پس از رسیدن به وزن ثابت تعیین گردید (با خطای کمتر از ۰/۰۰۱ گرم)، که در نهایت میزان رطوبت اولیه میوه‌های خرمالو ۴۴/۲۶٪ (بر اساس وزن خشک) بدست آمد.

### آزمون آسایش تنش

از یک دستگاه آنالایزر پروفیل بافت (TPA) (مدل TA.XT2، ساخت کشور انگلستان) به همراه یک نرم افزار ضمیمه (ورژن ۴/۰۸) برای عمل فشردن میوه‌های کامل خرمالو و انتقال داده‌ها به نرم افزار اکسل استفاده شد. این دستگاه به یک لود سل ۳۰ کیلوگرم-نیرو مجهز شد. همچنین از یک پراب دیسکی به قطر ۷۵ میلی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر همراه دستگاه آنالایزر بافت استفاده شد.

$$\sigma_t = \sigma_e + \sum_{i=1}^n \sigma_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (1)$$

در اینجا  $\sigma_t$  تنش وابسته به زمان،  $\sigma_e$  تنش جزء کشسان،  $\sigma_i$  تنش در هر جزء کشسان-لزج ترکیب شده،  $t$  زمان کل آزمایش و  $\tau_i$  زمان آسایش اجزای کشسان-لزج ترکیب شده می‌باشند. اجزای این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- بیان فیزیکی مدل عمومی ماکسول

تعداد اجزای کشسان-لزج بر اساس بیشترین تطابق مدل روی داده‌های آسایش تنش اندازه گیری شده، انتخاب می‌شوند. پژوهشگران زیادی حالت سه جزئی مدل ماکسول عمومی را برای توصیف رفتار واقعی محصولات کشاورزی مناسب دانسته اند (Vozary & Meszaros, 2007; Khazaei & Campus 2010) Mann, 2004. هر جزء این مدل شامل یک فنر و یک میراگر<sup>۱</sup> به صورت سری بوده و این سه جزء به همراه یک فنر اضافی موازی، دستگاه مدل سه جزئی ماکسول عمومی را تشکیل می‌دهند. رابطه ی ریاضی این مدل را می‌توان با معادله ی ۲ نشان داد:

$$\sigma_t = \sigma_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) + \sigma_2 \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) + \sigma_3 \exp\left(\frac{-t}{\tau_3}\right) + \sigma_e \quad (2)$$

هر کدام از جملات مدل با اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. تابع زمانی تنش یا منحنی اصلی حاصل جمع سه جمله ی ۱، ۲ و ۳ و یک عدد ثابت مربوط به فنر اضافی می‌باشد. به دلیل اینکه جمله‌ی اول در مدل سه جزئی ماکسول عمومی (معادله ی ۲) بیشترین سهم را در توصیف رفتار مدل دارد، مقادیر جزء کشسان-لزج و زمان آسایش مربوط به آن جمله ( $\sigma_1$  و  $\tau_1$ ) در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفته است (Khazaei & Mann, 2004). Mohsenin (۱۹۸۶) جمله ای را که دارای بیشترین مقدار جزء کشسان-لزج و زمان آسایش بوده، جمله ی اول مدل معرفی کرده و مقدار زمان آسایش آن را به عنوان زمان آسایش تنش ماده تلقی نموده است. Campus و همکاران (۲۰۱۰) نیز جمله ای را که شامل بزرگترین جزء کشسان-لزج است جمله ی اول منظور کرده اند. Khazaei و Mann (۲۰۰۴) جمله ی دارای بزرگترین زمان آسایش را به عنوان جمله ی اول در نظر گرفته اند. Nussinovitch و همکاران (۱۹۸۹)

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

همه ضرایب و ثابت‌های سه معادله مذکور با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی در نرم افزار SPSS (ورژن ۱۵/۰) بدست آمد. مدل‌های تخمینی بوسیله ی یک مجموعه جدید از داده‌های جمع آوری شده و با استفاده از معیارهایی مانند درصد خطای نسبی متوسط (ARE%) و خطای استاندارد تخمین (SEE) ارزیابی شدند (Zare 2012).

$$ARE = \frac{100}{N} \times \sum \frac{|x-y|}{x} \quad (۵)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum(x-y)^2}{N}} \quad (۶)$$

در اینجا  $x$  داده‌های اندازه گیری شده،  $y$  داده‌های محاسبه شده در مدل‌ها و  $N$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

### نتایج و بحث

#### اثر مدت زمان نگهداری

نمودارهای نیرو-زمان بوسیله ی تقسیم مقادیر نیروهای فشاری به مقادیر مساحت تماس متناظر با آنها، به نمودارهای تنش-زمان تبدیل شدند. روند نمودارهای آسایش تنش شبیه رفتار مواد وابسته به زمان مانند موز (Kajuna *et al.*, 1998) و کشمش (Lewicki & Spiess, 1995) بود. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که مدت زمان نگهداری اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ بر روی میزان تنش اولیه (تنش لازم برای کرنش ثابت و معین نمونه در زمان صفر) که با مجموع اجزاء تنش برابر است، داشت (شکل ۳). همچنین با توجه به شکل ۳ با افزایش مدت زمان نگهداری میزان تنش اولیه به میزان ۸۰٪ کاهش یافت، بطوریکه کمترین و بیشترین مقادیر آن مربوط به روزهای اول و بیست و دوم نگهداری با مقادیر ۳۰/۱۷ و ۶/۰۶ مگاپاسکال بودند.

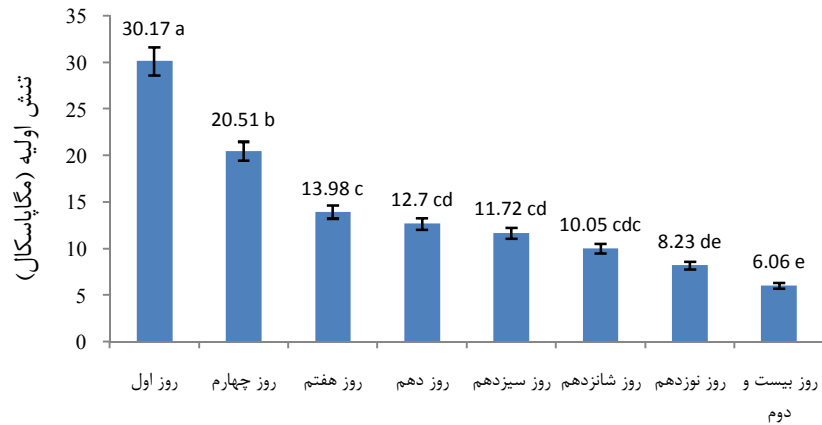
با افزایش مدت زمان نگهداری در یک شرایط محیطی ثابت، بافت میوه خرمالو نرم تر شده که قند بالای میوه خرمالو نیز این پدیده را تصدیق می‌کند که مولکول‌های تشکیل دهنده خرمالو به خاطر چسپندگی شان با افزایش مدت زمان نگهداری کمتر در هم گره خورده پس سفتی کمتری نیز دارند. در مورد مواد بیولوژیک اعتقاد بر این است که با افزایش مدت زمان نگهداری مولکول‌های کمتر در هم گره می‌خورند لذا تنش برشی کمتری برای به حرکت در آوردن مولکول در محلول لازم است (Campbell *et al.*, 2009). شکل ۴ نمودار آسایش تنش میوه کامل خرمالو را در اولین روز و آخرین روز نگهداری در شرایط محیطی نشان می‌دهد. مطابق این شکل سفتی میوه در آخرین روز نگهداری نسبت به اولین روز نگهداری به طور قابل توجهی کاهش یافته است و باعث شده برای کرنش ۳۰٪ در میوه تنش لازم از حدود ۳۰/۱۷ به ۶/۰۶ مگاپاسکال کاهش یابد.

سرعت عرضی حرکت پراب ۱ میلی متر بر ثانیه تنظیم شد و نمونه‌ها تا رسیدن کرنش به ۳۰٪ فشرده شدند. سپس پراب بارگذاری در این مقدار کرنش، به مدت ۴۸۰ ثانیه به منظور رهایی تنش نگه داشته شد. (Hassan *et al.*, 2004). یک محفظه شامل مدار کنترل دما به منظور ایجاد دمای ثابت با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس در طول آزمون‌های آسایش تنش، در اطراف پراب دستگاه آنالایزر بافت تعبیه شد (شکل ۲). همه آزمون‌ها با ۱۰ تکرار انجام شد.



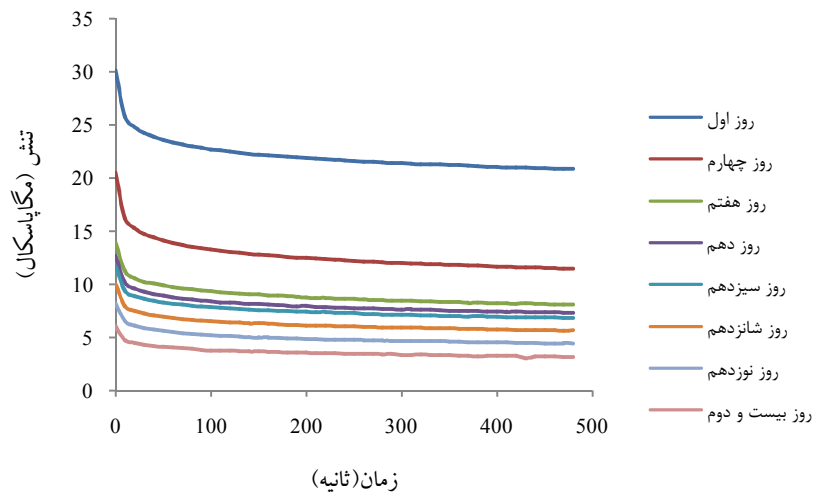
شکل ۲- محفظه کنترل دما اطراف پراب دستگاه TPA

مساحت سطح تماس بین پراب و هر یک از نمونه‌های میوه به صورت تقریبی محاسبه شد (Hassan *et al.*, 2004). سطح پراب دیسکی با یک کاغذ سفید پوشانده شد و سطح بالای نمونه‌ها با جوهر آغشته گردید. در طی آزمون آسایش تنش زمانی که پراب در حال پایین آمدن در راستای عرضی بود سطح تماس بر روی کاغذ سفید ایجاد می‌شد. سپس از کاغذهای شامل سطح رنگی تماس اسکن گرفته شد و به نرم افزار متلب (ورژن ۸/۰) به منظور محاسبه مساحت سطح تماس انتقال داده شد. در این نرم افزار ابتدا سطوح رنگی اسکن شده به تصاویر سطح خاکستری تبدیل شد و سطح تماس با استفاده از مقدار آستانه بهینه از زمینه تصویر جدا شد. در مرحله بعد تصاویر سطح خاکستری به شکل باینری (سیاه و سفید) تبدیل شدند. مساحت سطح تماس بوسیله شمارش پیکسل‌های سفید تصویر بدست آمد. یک تصویر سطح تماس که از قبل مساحت آن توسط کاغذ میلی متری محاسبه شده بود بمنظور بدست آوردن یک ضریب تبدیل مناسب از پیکسل به واحدهای استاندارد SI مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق، بیشترین زمان آسایش تنش مبنای تعیین جمله‌ی اول در مدل سه جزئی ماکسول عمومی بود و در نتیجه زمان آسایش مربوط به جمله‌ی اول به عنوان زمان آسایش نمونه‌های خرمالوی مورد آزمایش در نظر گرفته شد (Khazaei & Mann, 2004).



مدت زمان ننگه داری (روز)

شکل ۳- مقایسه میانگین اثر مدت زمان ننگه‌داری بر روی میزان تنش اولیه



شکل ۴- اثر مدت زمان ننگه‌داری در شرایط محیطی بر روند آسایش تنش

جمله اول مدل و زمان آسایش مربوط به آن جمله به عنوان زمان آسایش تنش ماده در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به جدول ۱ در طی دوره ننگه داری، میزان تنش جزء اول ( $\sigma_1$ ) از مقدار  $3/29$  تا  $1/51$  مگاپاسکال کاهش یافته و زمان آسایش میوه ی کامل ( $T_1$ ) در گستره ی  $312/10$  تا  $353/90$  ثانیه متغیر بوده و متوسط آن  $330/88$  ثانیه محاسبه شد که نشان می‌دهد بافت میوه ی کامل نرم تر و در عین حال ویژگی کشسان آن تشدید می‌شود. کاهش تنش در مواد لزج-کشسان به تدریج صورت گرفته و بسته به ساختار مولکولی ماده در یک زمان معین متوقف می‌شود. این کاهش تنش تا یک تنش تعادلی ( $\sigma_e$ ) که بزرگتر از صفر می‌باشد ادامه می‌یابد. مقدار

همچنین با توجه به شکل ۴ میزان انحناء منحنی (قوس منحنی) آسایش تنش با گذشت زمان ننگه‌داری کاهش یافته است که می‌توان گفت ویژگی کشسان میوه ی کامل خرمالو در طی ننگه‌داری نه تنها کاهش نیافته، بلکه با توجه به شکل افزایش محسوسی داشته است (Sakuria & Nevins, 1992).

#### مدل‌های آسایش تنش

جدول ۱ مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول عمومی را که با استفاده از رابطه ۲ و روش رگرسیون غیرخطی محاسبه شده، برای میوه کامل خرمالو نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، جمله ای که دارای بیشترین زمان آسایش است به عنوان

زمان آسایش تنش بسته به سهم ویژگی لزوج یا کشسان ماده متفاوت است به طوری که این زمان برای جامدات کشسان بسیار طولانی و برای مواد لزوج-کشسان از ۰/۱ تا ۱۰<sup>۸</sup> ثانیه فرق می‌کند (Van Vliet, 1999). با توجه به جدول ۱ مقدار تنش تعادلی که محدوده تغییرات آن بین ۲/۴۸ تا ۲۰/۱۴ مگاپاسکال می‌باشد با گذشت زمان نگهداری به طور نسبی کاهش یافته است.

تغییرات خواص لزوج-کشسان یک ماده در حین نگهداری می‌تواند بر زمان آسایش تنش و بر مقدار اجزاء کشسان-لزوج اثرگذار باشد. Kajuna و همکاران (۱۹۹۸) اظهار نموده‌اند که کاهش مجموع مقادیر  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  به عنوان اجزاء کشسان-لزوج در مدل ماکسول حاکی از کاهش ویژگی کشسان ماده تحت آزمایش است. زمان آسایش تنش نیز به طور غیر مستقیم خواص لزوج دیواره سلولی را نشان می‌دهد. هر چه این زمان بیشتر باشد ماده کشسان تر است (Sakuria & Nevins, 1992). بررسی تغییرات خواص لزوج-کشسان میوه خرما در طی نگهداری نشان داد که تغییر در ویژگی کشسان یا لزوج فقط تحت تاثیر تغییرات اجزاء تنش نیست بلکه به شدت تغییرات اجزاء تنش و زمان آسایش آنها نیز بستگی دارد. مقدار

کم زمان آسایش تنش در مقادیر رطوبت بالا عمدتاً ناشی از اثر نرم‌کنندگی آب است که مقدار زمان آسایش تنش را کاهش می‌دهد (Khazaei & Mann, 2005). با توجه به جدول ۲ مقادیر ثابت a مدل پلگ بین ۰/۳۰ تا ۰/۴۷ بدست آمد که بیشترین مقدار آن مربوط به روز آخر نگهداری می‌باشد. بر طبق مدل پلگ ثابت a، رابطه ای مستقیم با میزان کشسان بودن میوه دارد (Hassan et al., 2004) که این موضوع افزایش میزان کشسان میوه را در طی نگهداری تصدیق می‌کند. همچنین با توجه به این جدول، مقادیر ثابت b بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۵ بدست آمد. مدل ناسینوویچ نیز به خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی منطبق گردید. ثابت‌های این مدل در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

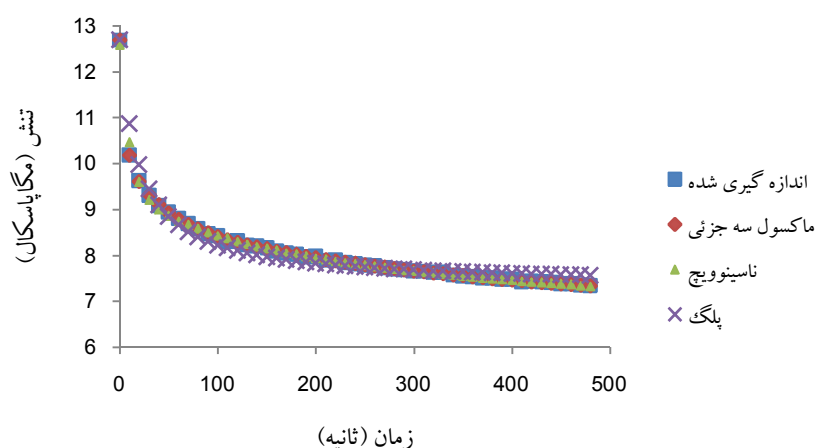
این نتایج با نتایج Hassan و همکاران (۲۰۰۴) مشابه بود. همانطوریکه در شکل ۵ مشخص است، مدل سه جزئی ماکسول عمومی و مدل ناسینوویچ به طور کامل بر داده‌های آزمایشگاهی منطبق شدند. همچنین طبق شاخص‌های آماری محاسبه شده، این مدل‌ها می‌توانند میزان تنش در حال آسایش را با کمترین خطا پیش‌بینی کنند.

جدول ۱- مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول عمومی در آزمون آسایش تنش میوه خرما

روز	$\sigma_e$ (Mpa)	$\sigma_1$ (Mpa)	$\tau_1$ (s)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_2$ (s)	$\sigma_3$ (Mpa)	$\tau_3$ (s)	R <sup>2</sup>	SEE	ARE%
۱	۲۰/۱۴	۳/۲۹	۳۱۷/۹۰	۲/۴۹	۳۸/۰۹	۴/۷۰	۴/۷۲	-۰/۹۹۹	-۰/۰۱۴	-۰/۰۵
۴	۱۰/۷۸	۳/۱۶	۳۳۰/۷۰	۲/۳۹	۳۸/۴۶	۴/۷۵	۴/۱۷	-۰/۹۹۹	-۰/۰۱۴	-۰/۰۹
۷	۷/۶۴	۲/۱۸	۳۱۲/۱۰	۱/۲۹	۴۴/۶۰	۲/۸۷	۵/۳۶	-۰/۹۹۹	-۰/۰۱۷	-۰/۱۵
۱۰	۶/۹۱	۱/۹۴	۳۱۹/۷۰	۱/۴۸	۳۶/۰۵	۲/۳۸	۴/۶۶	-۰/۹۹۹	-۰/۰۱۳	-۰/۱۳
۱۳	۶/۵۹	۱/۹۳	۳۲۲/۴۰	۱/۵۴	۴۰/۵۹	۱/۸۶	۴/۵۶	-۰/۹۹۹	-۰/۰۱۹	-۰/۲۱
۱۶	۵/۲۷	۱/۵۸	۳۴۹/۷۰	۱/۲۵	۷۳/۳۴	۱/۹۶	۴/۴۲	-۰/۹۹۹	-۰/۰۱۴	-۰/۱۸
۱۹	۳/۸۴	۱/۵۳	۳۵۳/۹۰	۱/۲۲	۴۴/۷۸	۱/۶۴	۴/۹۵	-۰/۹۹۹	-۰/۰۱۴	-۰/۲۲
۲۲	۲/۴۸	۱/۵۱	۳۵۰/۷۰	-۰/۸۶	۴۰/۳۶	۱/۲۱	۴/۵۳	-۰/۹۹۵	-۰/۰۲۲	-۰/۵۳

جدول ۲- مقادیر ضرایب مدل‌های ناسینوویچ و پلگ در آزمون آسایش تنش میوه خرما

روز	مدل ناسینوویچ					مدل پلگ				
	A <sub>4</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	SEE	ARE%	a	b	R <sup>2</sup>
۱	-۰/۱۲	-۰/۰۷	-۰/۱۸	-۰/۶۱	-۰/۹۹۶	-۰/۰۹۰	-۰/۱۶	-۰/۳۰	-۰/۰۵	-۰/۹۶۲
۴	-۰/۱۸	-۰/۱۰	-۰/۲۶	-۰/۴۴	-۰/۹۹۶	-۰/۰۸۹	-۰/۲۸	-۰/۴۳	-۰/۰۵	-۰/۹۶۲
۷	-۰/۱۹	-۰/۰۹	-۰/۲۴	-۰/۴۵	-۰/۹۹۶	-۰/۰۵۹	-۰/۳۰	-۰/۴۱	-۰/۰۴	-۰/۹۵۶
۱۰	-۰/۱۷	-۰/۱۰	-۰/۲۵	-۰/۴۷	-۰/۹۹۶	-۰/۰۵۰	-۰/۲۷	-۰/۴۲	-۰/۰۵	-۰/۹۶۳
۱۳	-۰/۲۰	-۰/۰۸	-۰/۲۴	-۰/۴۶	-۰/۹۹۶	-۰/۰۵۲	-۰/۳۷	-۰/۴۱	-۰/۰۵	-۰/۹۵۵
۱۶	-۰/۱۸	-۰/۱۰	-۰/۲۶	-۰/۴۵	-۰/۹۹۶	-۰/۰۴۶	-۰/۳۶	-۰/۴۳	-۰/۰۵	-۰/۹۶۲
۱۹	-۰/۱۹	-۰/۱۲	-۰/۲۵	-۰/۴۲	-۰/۹۹۷	-۰/۰۳۵	-۰/۴۰	-۰/۴۵	-۰/۰۴	-۰/۹۶۶
۲۲	-۰/۲۶	-۰/۱۰	-۰/۲۷	-۰/۳۶	-۰/۹۹۲	-۰/۰۴۲	-۰/۷۴	-۰/۴۷	-۰/۰۴	-۰/۹۴۹



شکل ۵- بیان گرافیکی مدل‌های لزج-کشسان (در روز چهارم نگهداری در شرایط محیطی)

### نتیجه‌گیری

معنی‌داری به میزان ۸۰٪ کاهش یافت اما میزان الاستیسیته ی آن افزایش یافت. همچنین بر طبق شاخص‌های آماری محاسبه شده، از میان سه مدل استفاده شده، مدل سه جزئی ماکسول عمومی و مدل ناسینوویچ می‌توانند به طور مناسبی تنش‌های وابسته به زمان در میوه را با کمترین خطا پیش بینی کنند.

نتایج این تحقیق نشان داد که میوه ی خرمالو یک جامد لزج-کشسان محسوب می‌شود که خصوصیات لزج و کشسان آن در اثر تغییرات فیزیکوشیمیایی میوه در طی نگهداری در شرایط محیطی تاثیر می‌پذیرد، به طوریکه سفتی میوه در طی نگهداری به طور

### منابع

- Baragale, P. C., Irudayaraj, J. M. & Marquis, B., 1994, Some mechanical properties and stress relaxation characteristics of lentils. *Canadian Agricultural Engineering*, 36(4), 247-254.
- Bourne, M., 2002, *Food texture and viscosity*. Academic Press, London, 45-230.
- Campbell, L., Gu, L., Dewar, S. & Euston, S., 2009, Effects of heat treatment and glucono-d-lactone-induced acidification on characteristics of soy protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 23, 344-351.
- Campus, M., Addis, M. F., Cappuccinelli, R., Porcu, M. C., Pretti, L., Tedde, V., Secchi, N., Stara, G. & Roggio, T., 2010, Stress relaxation behaviour and structural changes of muscle tissues from Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata* L.) following high pressure treatment. *Journal of Food Engineering*, 96, 192-198.
- Del Nobile, M. A., Chillo, S., Mentana, A. & Baiano, A., 2007, Use of the generalized Maxwell model for describing the stress relaxation behavior of solid-like foods. *Journal of Food Engineering*, 78, 978-983.
- Fincan, M. & Dejmek, P., 2003, Effect of osmotic pretreatment and pulsed electric field on the viscoelastic properties of potato tissue. *Journal of Food Engineering*, 59, 169-175.
- Gorinstein, S., Kulasek, G. W., Bartnikowska, E., Leontowicz, M., Zemser, M., Morawiec, M. & Trakhtenberg, S., 2000, The effect of diets, supplemented with either whole persimmon or phenol-free persimmon, on rats fed cholesterol. *Food Chemistry*, 70, 303-308.
- Hassan, B. H., Alhamdan, A. M. & Elansari, A. M., 2004, Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity. *Journal of Food Engineering*, 66, 439-445.
- Kajuna, S., Bilanski, W. K. & Mittal, G. S., 1998, Effect of ripening on the parameters of three stress relaxation models for banana and plantain. *Transactions of the ASAE*, 14 (1), 55-61.
- Khazaei, J. & Mann, D. D., 2004, Effects of Temperature and Loading Characteristics on Mechanical and Stress-Relaxation Behavior of Sea Buckthorn Berries. Part 3. Relaxation Behavior. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, 5, 1-12.
- Khazaei, J. & Mann, D. D., 2005, Effects of moisture content and number of loadings on force relaxation behaviour of chickpea kernels. *International Agrophysics*, 19, 305-313.
- Tous, J. & Ferguson, L., 1996, *Mediterranean fruits*. In: Janick, ed., *Progress in new crops*, ASHS Press, Arlington, 416-430.
- Kojima, K., Sakurai, N., Kuraishi, S., Yamamoto, R. & Nevins, D. J., 1991, Novel technique for measuring tissue

- firmness within tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit. *Plant Physiology*, 96(2), 545-550.
- Lewicki, P. P. & Spiess, W. E. L., 1995, Rheological properties of raisins: Part I. Compression test. *Journal of Food Engineering*, 24 (3), 321-338.
- Lewicki, P. & Wolf, W., 1995, Rheological properties of Raisins: Part II: Effect of water activity. *Journal of Food Engineering*, 26, 29-43.
- Lima, M. I. & Singh, R. P., 1995, Measurement of textural properties of French fries. Poster # 49-4 presented at 1995 IFT annual meeting, Anaheim, CA.
- Mohsenin, N. N. 1986, Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach, Amsterdam.
- Nussinovitch, A., Peleg, M. & Normand, M. D., 1989, A modified Maxwell and a non exponential model for characterization of the stress relaxation of agar and alginate gels. *Journal of Food Science*, 54 (4), 1013-1016.
- Nussinovitch, A. & Peleg, M., 1990, Strength-time relationships of agar and alginate gels. *Journal of Texture Studies*, 21(1), 51-60.
- Peleg, M. & Pollak, K., 1982, The problem of equilibrium conditions in stress relaxation analysis of solid foods. *Journal of Texture Studies*, 13, 1-11.
- Rajabipour, A., Zarietard, M. R., Dodd, G. T. & Norris, E. R., 2004, Tensile strength and relaxation of tomato skin by a loop technique. *International Agrophysics*, 18, 1-5.
- Sakuria, N. & Nevins, D. J., 1992, Evaluation of stress relaxation in fruit tissues. *Hort Technology*, 2(3), 398-402.
- Saravacos, G. D. & Kostaropoulos, A. E., 1995, Engineering properties in processing equipment for fruits and vegetables. Poster #23-9 presented at 1995 IFT annual meeting, Anaheim, CA.
- Steffe, J. F. 1992, Rheological methods in food processing engineering. Freeman Press, East Lansing, MI, USA.
- Van Vliet, T. 1999, Rheological classification of foods and instrumental techniques for their study. In: A.J. Rosenthal, ed., *Food Texture Measurement and Perception*, Aspen, New York, 65-98.
- Vozary, E. & Meszaros, P., 2007, Effect of mechanical stress on apple impedance parameters. ICEBI, IFMBE Proceedings, 17, 118-121.
- Waananen, K. M. & Okos, M. R., 1992, Stress-relaxation properties of yellow-dent corn kernels under uniaxial loading. *Transactions of the ASAE*, 35(4), 1249-1258.
- Wu, T. & Abbott, J. A., 2002, Firmness and force relaxation characteristics of tomatoes stored intact or as slices. *Postharvest Biology and Technology*, 24, 59-68.
- Zare, D., Jayas, D. S. & Singh, C. B., 2012, A generalized dimensionless model for deep bed drying of paddy. *Drying Technology*, 30, 44-51.



## Investigation of viscoelastic behavior of persimmon fruit during storage using stress relaxation models

F. Salmanizadeh<sup>1\*</sup>, A. Zomorodian<sup>2</sup>- H. Rahmanian<sup>3</sup>, H. Safiyari<sup>4</sup>

Received: 2013.11.05

Accepted: 2014.04.30

**Introduction:** Persimmon fruits are subjected to different environmental conditions from harvest to consumption. Foods, those are exhibiting characteristics of both liquid and solid, are described as viscoelastic where stress relaxation and strength properties are time dependant. Knowledge of viscoelastic properties of foods and agricultural materials are important when considering harvesting, handling, transportation, processing, and storage. Also the data on viscoelastic properties are required as an input for mathematical models, which describe and predict internal stress and cracking during different handling and processing procedures. The mechanical properties are considered one of the most important four parameters, which reflect the quality of food material. Those parameters include texture, firmness and chewability. Viscoelastic material exhibit stress relaxation phenomena, which is one of the most important factors in characterizing agricultural materials. The objectives of the current study were: (1) to obtain data to describe the stress relaxation characteristic of Persimmon fruits during Storage, (2) to investigate the effect of storage time on stress relaxation properties, and (3) to find the best model to describe the obtained stress relaxation data.

**Materials and Methods:** The persimmon fruits were manually picked up at maturity stage from persimmon trees in a garden, in Fars province, Iran. They were handled to Biophysics laboratory in Agricultural Engineering department, at Shiraz University, on the foam sheets in one layer array for minimizing any likely compaction. Initial moisture content was determined by gravimetric method in an oven at 70C till obtaining constant successive weight loss of 0.001 g. The initial moisture content was 44.26% (d.b). Since the rheological characteristics of fruits are important for any processing operation, viscoelastic behavior of persimmon fruits during storage in environmental conditions was investigated using estimating its relaxation parameters from experimental stress relaxation data. The rheological behavior of persimmon fruits was evaluated to uniaxial compression test for relaxing the stress during 480 s. Texture Profile Analyser (TPA) (TA.XT2 plus model, Stable Microsystems, England) with Exponent Lite (Version 4,0,8,0, UK) software was used to compress whole date samples and export data into Excel worksheets. TPA was equipped with a 30 kgf load cell. The cross head speed was adjusted on 1 mm/s, and samples compressed with 30% strain. The cross head then kept at 30% of strain for relaxing the stress in 480 s duration. A chamber with temperature control circuit was fabricated around the TPA cross head to prepare constant temperature identical to sample temperature with an accuracy of  $\pm 0.1$ C during the stress relaxation tests. All tests were performed with ten replications. Three popular stress relaxation models, namely the generalized Maxwell with three elements, Nussinovitch, and Peleg were fitted to experimental data and was used from R-square, standard error of estimation (SEE) and percent of average relative error (ARE%) indexes for evaluation of models.

**Results and Discussion:** The force-time curves were converted to stress-time curves by dividing the true compression force values to the corresponding true values of contact surface area. Analysis of variance showed that storage time had significant effect on initial stress relaxation. The results showed that the magnitude of initial stress (stress at time zero) required to create a fixed strain on whole fruit was significantly decreased up to 80% during storage in environmental conditions, but the relaxation time was increased at the range of 312.10 to 353.90 s. Based on the results, elastic behavior of persimmon fruit was enhanced and its firmness decreased during fruit storage. Persimmon is sugar rich fruit that its behavior is principally partly controlled by physico-chemical properties of sugar. Changes in sugar type as a result of enzymatic action are taken place during the storage process. However, in the present study all samples were in the time of maturation, and therefore the physical state of sugar was influenced by free water which is resulted in increasing in fruit moisture content. Stress relaxation curves were plotted at different storage time. Some variations were apparently observed among the curves. Sucrose decreased initial stress decay rate and increased proportion of un-relaxed force. Variations in stress decay rate might refer to the amount of initial stress which was affected by physic-chemical properties of the sugar. Recall that nonlinear regression method with non-negative constraint was used to derive the models

1- PhD Student, Department of Agricultural Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran  
2,3,4- Professors, Department of Agricultural Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran,  
(\* - Corresponding Author Email: zomorod@shirazu.ac.ir.)

constant.

**Conclusion:** All three models were valid for quantifying the viscoelastic behavior of persimmons; however the generalized Maxwell with three elements (with  $R^2=0.999$ ,  $SEE=0.017$  and  $ARE=0.19\%$ ) and Nussinovitch (with  $R^2=0.996$ ,  $SEE=0.057$ ,  $ARE=0.36\%$ ) were the best models in predicting experimental data.

**Keywords:** Generalized Maxwell model, Nussinovitch model, Peleg model, Stress relaxation, Viscoelastic characteristics.