

تغییرات خواص ویسکوالاستیک انگور سفید بیدانه در طی رسیدن

علی حسن‌پور^۱، محسن اسمعیلی^{۲*}، اسعد مدرس مطلق^۳ و علاالدین رحمانی‌دیدار^۳

تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۱

۱- دانشجوی دوره دکتری گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

۲- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه ارومیه

۳- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

* مسئول مکاتبه: E-mail: m.esmaili@urmia.ac.ir

چکیده

به منظور بررسی خواص ویسکوالاستیک انگور سفید بیدانه در حین رسیدن، آزمون استراحت تنش جداگانه بر روی حبه‌ی کامل، گوشت میوه و پوست آن انجام گرفت. انگور در هفت مرحله با فواصل زمانی یک هفته از یک تاک معین برداشت و پس از آماده‌سازی نمونه، آزمایش استراحت تنش با استفاده از یک دستگاه سنجش بافت اجرا گردید. با استفاده از یک سری اعداد فرضی جمله اول مدل سه جزئی ماکسول عمومی تعیین و پس از آن داده‌های آزمایش با این مدل ارزیابی شد. نتایج نشان داد که در طی دوره‌ی رسیدن میوه از درجه بریکس ۱۶/۰۴۰/۴۵ تا ۲۲/۵۴۰/۲۵ مقدار تنش اولیه (تنش در زمان صفر) لازم برای ایجاد یک کرنش ثابت در میوه‌ی کامل کاهش ولی زمان استراحت تنش در گستره‌ی ۴۱/۶۸۱ تا ۴۵/۶۳۰ ثانیه تقریباً ثابت باقی می‌ماند. طبق نتایج بدست آمده با رشد و رسیدن میوه، رفتار الاستیک پوست انگور تشدید و سفتی گوشت میوه افزایش می‌یابد. بر طبق نتایج در مقایسه با گوشت میوه پوست آن در تغییرات خواص ویسکوالاستیک میوه‌ی کامل نقش تعیین کننده دارد. همچنین بر اساس نتایج حاصل از آنالیز رگرسیون غیر خطی، مقدار اجزاء الاستیک مدل، با طی شدن زمان رشد و رسیدن در مورد گوشت میوه افزایش و در مورد پوست و حبه‌ی کامل کاهش یافت. مدل سه جزئی ماکسول عمومی با ضریب تبیین بسیار بالایی بر روی داده‌های تجربی برازش گردید.

واژه‌های کلیدی: خاصیت ویسکوالاستیک، انگور سفید بیدانه، دوره‌ی رسیدن، مدل ماکسول

Changes in Viscoelastic Properties of Thompson Seedless Grapes During Ripening

A Hassanpour¹, M Esmaili^{2*}, A Modarres Motlagh³ and A Rahmani Didar³

Received: 02 November, 2010

Accepted: 20 February, 2011

¹PhD Student, Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran

²Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran

³Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran

*Corresponding author: E-mail: m.esmaili@urmia.ac.ir

Abstract

In order to investigate the viscoelastic properties of Thompson seedless grapes in ripening, relaxation tests were carried out on whole berry, flesh and skin of the fruit. Samples were harvested weekly from a grapevine for seven consecutive weeks and relaxation test was done using a texture analyzer after sample preparation. The first term of generalized Maxwell model with three elements was determined using a series of assumed data and then the experimental data were evaluated by the model. The results showed that the magnitude of initial stress (stress at time zero) required to create a fixed strain on whole fruit decreases during ripening period when °Brix of the fruit increases from 16.0±0.45 to 22.5±0.25, but the relaxation time remains almost constant at the range of 41.681 to 45.630 s. Based on results, elastic behavior of the skin enhances and firmness of flesh increases during fruit growth and ripening. According to the results, the skin as compared with the flesh plays a main role on the behavior of viscoelastic alterations of whole fruit. Also on the basis of results obtained by non-linear regression analysis, amount of elastic components of the model raises for flesh and declines for skin and whole berry through ripening. The generalized Maxwell with three elements was the best in fitting experimental data with highest determination coefficients.

Keywords: Viscoelastic properties, Ripening, Thompson seedless grape, Maxwell model

علایم اختصاری:

نیروی اولیه (N)	F_0	تنش در هر زمان t (MPa)	$\sigma(t)$
مدول الاستیسیته‌ی المان i ام (MPa)	E_i	ثابت‌های استراحت تنش (MPa)	$\sigma_{A,B,C}$ یا σ_i
مدول الاستیسیته‌ی تعادلی (MPa)	E_e	تنش تعادلی (MPa)	σ_e
زمان (s)	t_i یا t	تنش اولیه (MPa)	σ_0
ویسکوزیته‌ی المان i ام (MPa s)	η_i	تنش در زمان t_i (MPa)	σ_{t_i}
سطح مقطع (mm^2)	A	کرنش اولیه	ϵ_0
$T_i = \frac{\eta_i}{E_i}$: زمان استراحت تنش (s)	T_{rel} یا T_i	نسبت بدون بعد تنش	$\sigma(t)_{ND}$
		نیرو در هر زمان t (N)	$F(t)$
		ثابت استراحت نیرو (N)	F_i
		نیروی تعادلی (N)	F_e

مقدمه

عربستان سعودی آزمون استراحت تنش هشت واریته‌ی خرما را در دو مرحله از مراحل رسیدگی خلال^۲ و رطب^۳ مطالعه نموده و گزارش دادند که زمان استراحت تنش در تمامی واریته‌ها به جز واریته‌ی سوکاری^۴ در مرحله خلال، کوتاهتر از مرحله‌ی رطب می‌باشد. مقصودی و همکاران (۱۳۸۷) با مطالعه‌ای که روی پسته انجام دادند نشان دادند که ضرایب منحنی استراحت تنش با افزایش رطوبت، کاهش پیدا می‌کند. وو و آبوت (۲۰۰۲) مشاهده کردند که مشخصات ویسکو الاستیک گوجه‌فرنگی به طور واضح در طی مدت انبارداری تغییر کرده است.

خزایی و مان (۲۰۰۴) اثر دما و سرعت بارگذاری را روی رفتار مکانیکی و استراحت تنش میوه‌ی خولان دریا^۵ (سنجد تلخ) انجام داده و نشان دادند که میزان تغییر شکل و سرعت بارگذاری یک اثر کاهشی و دما یک اثر افزایشی روی زمان استراحت تنش دارد. خزایی و مان (۲۰۰۵) با مطالعه‌ای اثر رطوبت و دفعات بارگذاری را روی رفتار استراحت تنش دانه‌ی نخود بررسی نموده و گزارش کردند که میزان رطوبت یک اثر کاهشی و دفعات بارگذاری یک اثر افزایشی روی مقادیر جزء الاستیک و زمان استراحت جمله‌ی اول مدل ماکسول سه جزئی دارد. رجبی پور و همکاران (۲۰۰۴) آزمون استراحت تنش پوست گوجه فرنگی را با استفاده از روش حلقه‌ای^۶ انجام دادند و با این روش ضرایب مدل ماکسول عمومی^۷ را تعیین نمودند.

با وجود آنکه انگور از حالت نارس استفاده غذایی داشته و به منظوره‌ای مختلف فرآوری می‌شود، اطلاعات کافی در مورد تغییر خواص ویسکو الاستیک میوه‌ی کامل، پوست و گوشت انگور سفید بیدانه در طی دوره‌ی رسیدن در منابع علمی در دسترس نیست. هدف از مطالعه‌ی حاضر، ارزیابی خواص ویسکو الاستیک میوه‌ی

اغلب محصولات کشاورزی از نظر مقاومت به نیروهای فشاری، دینامیکی و ارتعاشی رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. به منظور کمینه سازی صدمات مکانیکی باید تنش‌های ناشی از جابجایی به کمترین مقدار ممکن کاهش یابند. علاوه بر اهمیت مطالعه‌ی خواص مکانیکی در رابطه با حداقل سازی صدمات مکانیکی، این ویژگی‌ها در طراحی ماشین‌آلات و تجهیزات حین برداشت و پس از برداشت جزو اطلاعات پایه محسوب می‌شود. در محصولات کشاورزی تغییر شکل فقط تابعی از تنش وارده نمی‌باشد، بلکه به زمان هم بستگی دارد (سیتیکی ۱۹۸۶). میوه‌ها و سبزی‌ها دارای خواص ویسکو الاستیک هستند یعنی دارای بخشی از خواص جامدات و بخشی از خواص مایعات می‌باشند (شاهین و سومنا ۲۰۰۶). این محصولات در طول برداشت، جابجایی، نقل و انتقال و انبارداری مستعد صدمه‌پذیری مکانیکی هستند (رانگ و همکاران ۲۰۰۴). آسیب پذیری انگور به علت بافت نرم و پوست نازک در برابر صدمه‌های مکانیکی بیشتر است (رانگ و همکاران ۲۰۰۴). این صدمه‌ها کیفیت محصول را کاهش و ضایعات محصول را به دلیل فساد محصول افزایش می‌دهد (لی و وانگ ۱۹۹۸).

یکی از مهمترین مشخصه‌های مواد ویسکو الاستیک، استراحت تنش^۱ می‌باشد، که در یک تغییر شکل اولیه‌ی ثابت و ناگهانی، به کاهش پیوسته‌ی تنش با گذشت زمان، استراحت تنش گفته می‌شود (شاهین و سومنا ۲۰۰۶). اندازه و سرعت کاهش تنش به ساختمان و اندازه تغییر شکل بستگی دارد. معمولاً کاهش تنش بطور جانبی به یک مقدار حدی میل کرده و زمان استراحت، یعنی دوره زمانی که طول می‌کشد تنش به یک مقدار معین کاهش یابد، مشخص می‌شود (استف ۱۹۹۶).

توصیف و اندازه‌گیری خواص ویسکو الاستیک محصولات کشاورزی موضوع مورد بررسی بسیاری از محققین بوده است. حسن و همکاران (۲۰۰۴) در

² Khalal

³ Rutab

⁴ Sukkarri

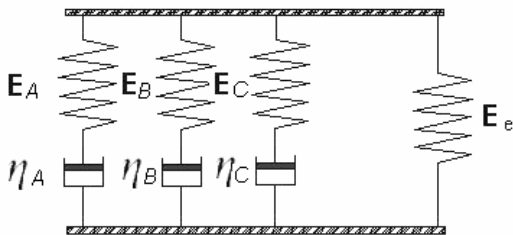
⁵ Sea Buckthorn Berries

⁶ loop technique

⁷ Generalized Maxwell model

¹ Stress Relaxation

خزایی و مان ۲۰۰۴ و کامپوس و همکاران ۲۰۱۰). هر جزء این مدل شامل یک فنر و یک میراگر^۳ به صورت سری بوده و این سه جز به همراه یک فنر اضافی موازی، دستگاه ماکسول عمومی سه جزئی را تشکیل می‌دهد (شکل ۱).



شکل ۱ - مدل سه جزئی ماکسول عمومی شامل سه جزء A، B و C و فنر اضافی.

رابطه‌ی ریاضی مدل فوق را می‌توان با معادله‌ی ۴ نشان داد:

$$\sigma(t) = \sigma_A \left(e^{-\frac{t}{T_A}} \right) + \sigma_B \left(e^{-\frac{t}{T_B}} \right) + \sigma_C \left(e^{-\frac{t}{T_C}} \right) + \sigma_e \quad [4]$$

هر کدام از جملات مدل با اندیس‌های A، B و C نشان داده شده است. تابع زمانی تنش یا منحنی اصلی^۴ حاصل جمع سه جمله‌ی A، B و C و یک عدد ثابت مربوط به فنر اضافی می‌باشد. به دلیل اینکه جمله‌ی اول در مدل سه جزئی ماکسول (معادله‌ی ۴) بیشترین سهم را در توصیف رفتار مدل دارد، مقادیر جزء الاستیک و زمان استراحت (T و σ) مربوط به آن جمله در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفته است (حسن و همکاران ۲۰۰۴، خزایی و مان ۲۰۰۴ و کامپوس و همکاران ۲۰۱۰).

محسنین (۱۹۸۶) جمله‌ای را که دارای بیشترین مقدار جزء الاستیک و زمان استراحت بوده جمله‌ی اول مدل معرفی کرده و مقدار زمان استراحت آن را به عنوان زمان استراحت تنش ماده تلقی نموده است. اگرچه

انگور سفید بیدانه در حین رسیدن است. اطلاعات این تحقیق می‌تواند در طراحی و مدل‌سازی فرآیندهای برداشت، جابجایی و عملیات پس از برداشت انگور به عنوان اطلاعات ورودی قابل استفاده باشد.

ملاحظات تئوری

برای بررسی ویژگی ویسکوالاستیک میوه‌ها و محاسبه‌ی زمان استراحت تنش این محصولات، مدل‌های ماکسول عمومی، ناسین اویچ^۱ و پلگ^۲ مورد استفاده محققین قرار گرفته است (حسن و همکاران ۲۰۰۴ و کامپوس و همکاران ۲۰۱۰). بر اساس نتایج انتشار یافته از میان این سه مدل مکانیکی، مدل عمومی ماکسول با بهترین شرایط خواص ویسکوالاستیک میوه‌ها را پیش‌بینی نموده و برآزش خوبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده است (وزاری و مزاروس ۲۰۰۷ و حسن و همکاران ۲۰۰۴). معادله‌ی ۱ مدل ماکسول عمومی را نشان می‌دهد:

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \left(e^{-\frac{t}{T_i}} \right) + \sigma_e \quad [1]$$

که با در نظر گرفتن $\sigma_i = \varepsilon_0 E_i$ و $\sigma_e = \varepsilon_0 E_e$ می‌توان آن را به صورت رابطه‌ی ۲ نوشت:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(\sum_{i=1}^n E_i \left(e^{-\frac{t}{T_i}} \right) + E_e \right) \quad [2]$$

با توجه به رابطه‌ی بین تنش و نیرو ($F = \sigma.A$) می‌توان معادله‌ی ۱ را به صورت زیر نشان داد:

$$F(t) = \sum_{i=1}^n F_i \left(e^{-\frac{t}{T_i}} \right) + F_e \quad [3]$$

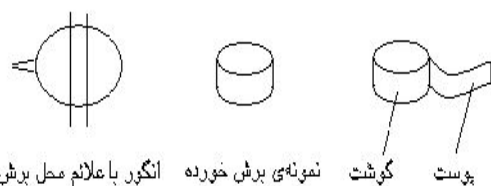
مدل ماکسول عمومی (معادله‌ی ۱) مهمترین و پرکاربردترین مدلی است که برای تحلیل نتایج تجربی حاصل از آزمون استراحت تنش به کار می‌رود. پژوهشگران زیادی حالت سه جزئی مدل ماکسول (معادله‌ی ۴) را برای توصیف رفتار واقعی محصولات کشاورزی مناسب دانسته‌اند (وزاری و مزاروس ۲۰۰۷،

³ Dashpot

⁴ Original Curve

¹ Nussinovitch model

² Peleg model



شکل ۲ - مراحل آماده سازی نمونه‌های پوست و گوشت انگور.

اندازه‌گیری ضخامت و پهنای پوست

برای محاسبه‌ی مقادیر تنش، ضخامت و پهنای پوست نمونه‌های انگور اندازه‌گیری شد. جهت تعیین ضخامت پوست از یک میکرومتر^۱ دیجیتال با دقت 0.001 mm استفاده شد. در این کار بخشی از پوست که کاملاً فاقد بافت گوشتی است مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه‌گیری پهنای نوار پوست از یک کولیس^۲ دیجیتال با دقت 0.01 mm استفاده گردید. از روی مقادیر ضخامت و پهنای، مساحت سطح مقطع پوست محاسبه شد.

اندازه‌گیری زمان استراحت تنش

برای انجام آزمایشات استراحت تنش از یک ماشین آنالایزر بافت^۳ مجهز به یک نیروسنج ۵ کیلوگرمی استفاده شد. جزییات تنظیم دستگاه و نوع پروب‌های مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. برای سنجش استراحت تنش حبه‌ی کامل، آنرا به طور افقی روی صفحه‌ی آزمون دستگاه قرار داده و با پروب استوانه‌ای ۲۵ میلی متری آزمون اجرا شد. برای مطالعه‌ی رفتار ویسکو الاستیک گوشت ابتدا ابعاد نمونه‌های استوانه‌ای شکل تهیه شده با ابزار برش به وسیله‌ی کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد و سپس

همیشه چنین شرایطی حاکم نیست، این روش را برخی محققین دیگر نیز پذیرفته‌اند (مقصودی و همکاران ۱۳۸۷). کامپوس و همکاران (۲۰۱۰) نیز جمله‌ای را که شامل بزرگترین جزء الاستیک است جمله‌ی اول منظور کرده‌اند. خزایی و همکاران (۲۰۰۴) جمله‌ی دارای بزرگترین زمان را جمله‌ی اول در نظر گرفته‌اند. حسن و همکاران (۲۰۰۴) نیز قاعده خاصی را برای تعیین جمله‌ی اول مشخص ننموده و فقط به گزارش ضرایب مدل اکتفا نموده‌اند که به نظر می‌رسد این روش به دلیل مشخص نکردن اهمیت جمله‌ی اول در تعیین ویژگی‌های ویسکوز و الاستیک، روش مناسبی برای توصیف خاصیت ویسکو الاستیک محصول مورد مطالعه نباشد.

مواد و روشها

نمونه‌ی انگور

انگور از یکی از باغات ارومیه در تابستان ۱۳۸۸ تهیه شد. خوشه‌های انگور در فواصل زمانی یک هفته‌ای به طور تصادفی از یک درخت مو معین چیده شد. حبه‌ها از محل دم میوه از خوشه جدا گردید. سپس اسیدیته (قابل تیتر)، قند کل و درصد رطوبت نمونه‌ها اندازه‌گیری شده (AOAC ۱۹۹۵) و با استفاده از یک رفاکتومتر درجه بریکس مشخص گردید. تک تک حبه‌ها با ترازوی دقیق توزین و به روش جابجایی سیال و غوطه‌وری در تولوئن چگالی نمونه‌ها تعیین شد (محسنین ۱۹۸۶).

برای تهیه‌ی برش از مقطع عرضی حبه از دو تیغه‌ی تیز موازی با فاصله قابل تنظیم (۲ تا ۴ میلی متری) استفاده شد. نمونه‌ی پوست و گوشت حبه‌ی انگور از برش‌های تهیه شده جدا گردید. بدین منظور خراشی بسیار جزئی در روی پوست ایجاد کرده و سپس با دقت زیاد پوست از گوشت جدا شد. پوست حاصل برای اندازه‌گیری ضخامت و آزمون استراحت تنش کششی به کار رفت و گوشت استوانه‌ای شکل حاصل برای انجام آزمون استراحت تنش تراکمی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲).

¹Mitutoyo 293-831 MDC-1" SB, Japan

²Mitutoyo, Model CD-15CPX, Japan

³Texture Analyzer model TA.XT-Plus (Stable Micro Systems, Surrey, UK)



شکل ۳ گیره‌های مخصوص کشش پوست متناسب با دستگاه آنالایزر بافت.

این آزمون در هر اجرا شش بار تکرار گردید. همزمان با اجرای آزمون، وزن حبه، درصد آب، چگالی و درجه‌ی بریکس نیز اندازه‌گیری شد. برای مدل‌سازی آزمون استراحت تنش پوست، معادله ۲ مورد استفاده قرار گرفت. ضرایب مدل از طریق رگرسیون غیر خطی محاسبه شد. بدین منظور از نسخه‌ی شماره ۶ نرم افزار *Statistica* استفاده شد.

آزمون استراحت تنش با پروب ۲۵ میلی متری اجرا گردید.

در این تحقیق، به منظور تعیین جمله‌ی اول و محاسبه زمان استراحت تنش، ابتدا با استفاده از یک سری اعداد فرضی به‌عنوان ضرایب جمله (تنش در زمان، تنش تعادلی و زمان‌های استراحت تنش)، رفتار مدل با روش باقیمانده‌های متوالی^۱ بررسی شد. با توجه به سهم جملات در توصیف رفتار مدل و بر اساس معادله ۵، مشخص شد که جمله‌ی اول جمله‌ای خواهد بود که دارای بیشترین زمان استراحت تنش است. به همین دلیل در تحقیق حاضر بیشترین زمان استراحت تنش مبنای تعیین جمله‌ی اول بوده و در نتیجه با استفاده از این روش، زمان استراحت تنش نمونه‌های انگور مورد آزمایش محاسبه شده است (محسنین ۱۹۸۶).

$$T_{rel} = \frac{t_2 - t_1}{\ln \sigma(t_1) - \ln \sigma(t_2)} \quad [5]$$

به منظور مقایسه‌ی رفتار ویسکوالاستیک اجزاء میوه، تنش بدون بعد با استفاده از معادله‌ی زیر محاسبه شد:

$$\sigma(t)_{ND} = \frac{\sigma(t) - \sigma_e}{\sigma_0 - \sigma_e} \quad [6]$$

آزمون کشش پوست

به منظور مطالعه‌ی استراحت تنش پوست، پروب مخصوصی طراحی و ساخته شد (شکل ۳). این پروب بدون آسیب زدن به نمونه‌های پوست، آن را بر اساس تنظیمات دستگاه تحت کشش قرار می‌دهد. نمونه‌های نواری شکل پوست به پهنای تقریبی ۳ میلی‌متر و طول تقریبی ۱۵ میلی‌متر به گیره‌های پروب متصل شده و تحت آزمون کششی تک محوره واقع شدند.

¹ Successive Residuals

جدول ۱ تنظیمات دستگاه آنالایزر بافت برای آزمون‌های استراحت تنش.

بخش	پروب	پیش سرعت پروب (mm/s)	سرعت پروب (mm/s)	پس سرعت پروب (mm/s)	کرنش (mm/mm)	زمان نگهداری (s)
حبه	P/25	۱	۰/۵	۱۰	۰/۳	۱۰۰
گوشت	P/25	۱	۰/۵	۱۰	۰/۲۵	۱۰۰
پوست	اصلاح شده	۱	۰/۵	۱۰	۰/۳	۱۰۰

نتایج و بحث

۱ ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی انگور مورد مطالعه

مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ی انگور مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنانکه در جدول ۲ مشاهده می‌شود متوسط وزن حبه‌ها در مدت ۷ هفته حدوداً ۰/۳۱۷ گرم افزایش نشان می‌دهد. همچنین با بزرگ شدن و رسیدن حبه‌ها چگالی آنها افزایش می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند تداوم ماده سازی در درون میوه و افزایش درصد مواد جامد محلول باشد. در طول رسیدن میوه مقدار مواد جامد محلول در میوه به شدت افزایش یافته و این امر سبب می‌گردد تغییراتی در بافت میوه صورت بگیرد. همانطور که در جدول ۲ دیده می‌شود مقدار قندها در مدت رسیدن میوه از ۱۳/۵ درصد به ۱۹/۱ درصد افزایش یافته است. نسبت اسید به قند نیز در این مدت از ۰/۰۷۴۱ به ۰/۰۳۶۶۵ کاهش یافته است. روند مشابهی در تغییر ترکیبات شیمیایی انگور در حین رشد و رسیدن توسط کومبه (۱۹۹۲) گزارش شده است. مهمترین شاخص در بین ترکیبات شیمیایی انگور مقدار مواد جامد محلول هست که اساساً برای ارزیابی رسیدن میوه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲ زمان‌های استراحت و اجزاء الاستیک (نیرو یا

تنش به عنوان ضریب جملات مدل)

جدول ۳ مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول را که با استفاده از معادله‌ی ۳ و روش رگرسیون غیر خطی

محاسبه شده، برای حبه‌ی کامل انگور نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، با توجه به گذشت زمان‌های متوالی برداشت، این مقادیر دارای تغییرات مشخصی است. طی دوره رسیدن زمان استراحت میوه‌ی کامل در گستره‌ی ۴۱/۶۸۱ تا ۴۵/۶۳۰ متغیر بوده و متوسط آن ۴۴/۵۵ ثانیه محاسبه شد. کاهش تنش (یا نیروی معادل آن) در مواد ویسکو الاستیک به تدریج صورت گرفته و بسته به ساختار مولکولی ماده در یک زمان معین متوقف می‌شود. این کاهش تنش (یا نیرو) تا یک تنش یا نیروی تعادلی (F_e) که بزرگتر از صفر می‌باشد ادامه می‌یابد. مقدار زمان استراحت بسته به سهم ویژگی ویسکوز یا الاستیک ماده متفاوت است بطوریکه این زمان برای جامدات الاستیک بسیار طولانی ولی برای مواد ویسکوالاستیک از 10^{-1} تا 10^6 ثانیه فرق می‌کند (وان والیت ۱۹۹۹).

با توجه به جدول ۳ مقدار نیروی تعادلی که محدوددهی تغییرات آن بین ۲/۰۴۵ تا ۴/۰۹۳ نیوتن می‌باشد با گذشت دوره‌ی رسیدن میوه‌ی انگور بطور نسبی کاهش می‌یابد و مقدار F_0 (نیروی لازم برای تغییر شکل ثابت و معین نمونه در زمان صفر) نیز که با مجموع اجزاء نیرو برابر است از ۳/۳۴۸ تا ۵/۰۳۱ نیوتن متغیر بوده و دارای روند تغییرات مشابه با F_e است. مقدار این نیرو طی رسیدن میوه کاهش یافته است. شکل ۴ تغییرات مقدار F_0 را برحسب تغییرات درجه بریکس میوه نشان می‌دهد.

جدول ۲ - مشخصات فیزیکی و شیمیایی انگور سفید بیدانه‌ی مورد استفاده.

نوبت برداشت	متوسط وزن حبه (g)	چگالی (g/cm ³)	رطوبت (%)	درجه‌ی بریکس	قند کل (%)	اسیدیته (%)
اولین برداشت	۱/۴۲۵ ± ۰/۱۴۹	۱/۰۷۳ ± ۰/۰۰۴	۸۳/۰۰ ± ۰/۳۶	۱۶/۰۰ ± ۰/۴۵	۱۳/۰۰ ± ۰/۵۶	۱/۰۰ ± ۰/۰۸
آخرین برداشت	۱/۶۹۸ ± ۰/۲۳۶	۱/۱۰۶ ± ۰/۰۰۷	۷۴/۸۰ ± ۰/۴۱	۲۲/۵۰ ± ۰/۲۵	۱۹/۰۰ ± ۰/۳۴	۰/۷۰ ± ۰/۰۴

جدول ۳ میانگین مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول در آزمون استراحت تنش حبه‌ی انگور سفید بیدانه.

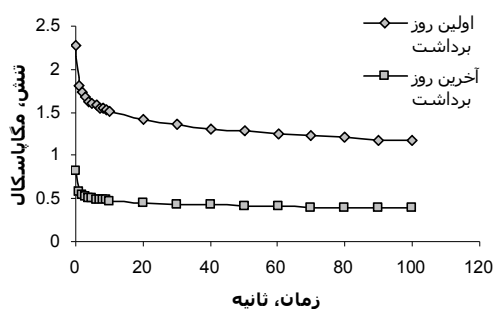
روز	F_e (N)	F_1 (N)	T_1 (s)	F_2 (N)	T_2 (s)	F_3 (N)	T_3 (s)	R^2
۱	۳/۰۴۹	۰/۵۸۸	۴۴/۵۷۶	۰/۵۳۴	۴/۵۹۴	۰/۸۶۰	۰/۴۸۲	۰/۹۹۹۹
۸	۲/۷۵۹	۰/۵۹۰	۴۵/۳۵۷	۰/۴۸۷	۴/۴۳۹	۰/۷۹۹	۰/۴۶۹	۰/۹۹۹۹
۱۵	۲/۶۶۴	۰/۵۱۱	۴۵/۵۹۳	۰/۴۳۸	۴/۸۶۳	۰/۶۴۸	۰/۶۰۲	۰/۹۹۹۹
۲۲	۲/۴۰۴	۰/۴۹۹	۴۵/۶۳۰	۰/۴۸۵	۳/۲۴۹	۰/۵۷۱	۱/۷۶۶	۰/۹۹۹۹
۲۹	۲/۰۳۵	۰/۳۹۶	۴۱/۶۸۱	۰/۴۱۹	۳/۰۱۹	۰/۵۰۲	۱/۶۷۴	۰/۹۹۹۹
۳۶	۲/۰۷۳	۰/۴۰۹	۴۵/۱۱۴	۰/۳۴۵	۴/۴۷۴	۰/۵۵۲	۰/۴۷۱	۰/۹۹۹۹
۴۳	۲/۰۴۵	۰/۴۰۴	۴۳/۹۳۰	۰/۳۴۷	۴/۴۷۱	۰/۵۵۱	۰/۴۶۸	۰/۹۹۹۹

الاستیسیته‌ی گلابی و هلو در طی مراحل رشد و رسیدن و همچنین گزارش جا و همکاران (۲۰۰۶) در مورد افت سفتی^۱ میوه‌ی انبه در زمان رسیدن، برای تعیین تغییرات ویژگی الاستیک میوه‌ی کامل انگور و سفتی آن، انجام و آنالیز نتایج آزمون استراحت تنش میوه در حین رشد و رسیدن ضروری است.

شکل ۵ نمودار استراحت نیروی میوه‌ی کامل انگور را در ابتدا و انتهای دوره‌ی برداشت نشان می‌دهد. مطابق این شکل سفتی میوه در آخرین برداشت نسبت به اولین برداشت بطور قابل توجهی کاهش یافته است و باعث شده برای تغییر شکل ۳۰ درصدی در میوه، نیروی لازم از حدود ۵ نیوتن به ۳ نیوتن کاهش یابد.

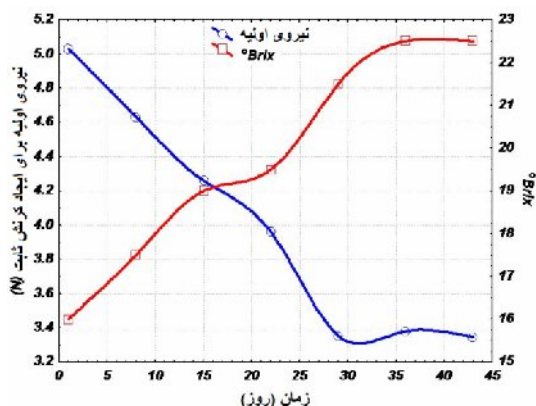
تغییرات خواص ویسکوالاستیک یک ماده در حین رشد یا نگهداری می‌تواند بر زمان استراحت تنش یا نیرو و بر مقدار اجزاء الاستیک اثرگذار باشد. کاجونا و همکاران (۱۹۹۸) اظهار نموده‌اند که کاهش مجموع مقادیر F_2 ، F_1 و F_3 به عنوان اجزاء الاستیک در مدل ماکسول حاکی از کاهش ویژگی الاستیسیته‌ی ماده‌ی تحت آزمایش است. زمان استراحت تنش نیز به طور غیر مستقیم خواص ویسکوز دیواره‌ی سلولی را نشان می‌دهد (ساکوریا و نوینس ۱۹۹۲). بررسی تغییرات خواص ویسکوالاستیک انگور نشان می‌دهد که تغییر در ویژگی الاستیک یا ویسکوز فقط تحت تأثیر تغییرات اجزاء نیرو یا تنش نیست بلکه به شدت تغییرات اجزاء تنش یا نیرو و زمان استراحت آنها بستگی دارد. مقدار کم استراحت نیرو و زمان در مقادیر رطوبت بالا عمدتاً ناشی از اثر نرم‌کنندگی آب است که مقدار استراحت نیرو را کاهش می‌دهد (خزایی و مان ۲۰۰۵). با توجه به ارتباط ویژگی الاستیسیته‌ی ماده‌ی تحت آزمایش با اجزاء مدل ماکسول و با توجه به گزارش فینی (۱۹۶۷) مبنی بر کاهش مدول

¹ Firmness



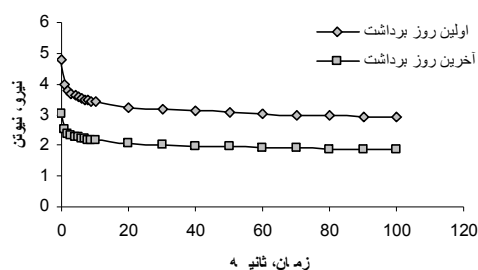
شکل ۶ - نمونه‌ای از دو نمودار استراحت پوست در اولین و آخرین روز نمونه‌برداری.

طی دوره‌ی رسیدن زمان استراحت تنش در پوست انگور در گستره‌ی ۰/۴۴ تا ۰/۷۰ متغیر بوده و متوسط آن حدود ۰/۶ ثانیه می‌باشد. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود با گذشت دوره‌ی رسیدن، پوست نرمتر و در عین حال ویژگی الاستیک آن تشدید می‌شود. علت کاهش سفتی پوست می‌تواند از کاهش ضخامت پوست در طی رسیدن ناشی شود (لی و بورن ۱۹۸۰). شکل ۶ به وضوح الاستیک شدن پوست میوه را در آخرین برداشت نسبت به اولین برداشت نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴ مقادیر زمان استراحت تنش (T_I) نیز عدم کاهش ویژگی الاستیک پوست میوه را در مقابل نرم شدن آن تأیید می‌کند. در شکل ۷ تغییرات ضریب جمله‌ی اول به عنوان جزء الاستیک اصلی مدل ویسکو الاستیک پوست در مقابل افزایش مواد جامد محلول نشان داده شده است. با توجه به این شکل یک کاهش قابل ملاحظه در جزء الاستیک اولین جمله‌ی مدل در فاصله ۳۰ تا ۳۵ روز دوره‌ی مطالعه، مشاهده می‌گردد که در این شرایط درجه بریکس میوه قبل از نرم شدن بیشتر پوست تقریباً به حداکثر مقدار خود رسیده است.



شکل ۴ - تغییرات مقدار F_0 برحسب تغییرات درجه بریکس میوه‌ی کامل انگور در حین رسیدن.

همچنین با توجه به شکل ۵ می‌توان گفت ویژگی الاستیک میوه‌ی کامل انگور در طی رسیدن کاهش نیافته بلکه با توجه به شکل بطور جزئی افزایش یافته است.

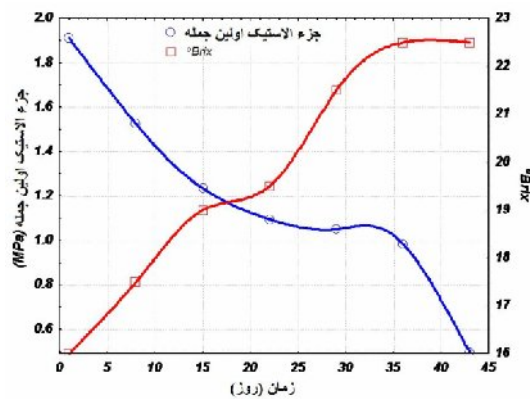


شکل ۵ - نمونه‌ای از دو نمودار استراحت نیروی حبه‌ی انگور در اولین و آخرین روز نمونه‌برداری.

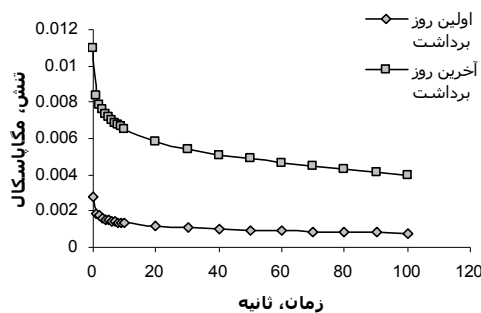
با وجود کاهش سفتی میوه، عدم کاهش زمان استراحت نیرو در طی هفت هفته رشد میوه (جدول ۳) حفظ ویژگی الاستیک میوه کامل را تأیید می‌کند. مقادیر میانگین ضرایب مدل ماکسول پوست انگور سفید بیدانه بر اساس معادله‌ی ۲ در جدول ۴ دیده می‌شود.

جدول ۴ - مقادیر میانگین ضرایب مدل ماکسول پوست انگور سفید بیدانه بر اساس معادله‌ی ۲.

روز	E_e (Mpa)	E_1 (Mpa)	T_1 (s)	E_2 (Mpa)	T_2 (s)	E_3 (Mpa)	T_3 (s)	R^2
۱	۴/۵۷۹	۱/۹۰۹	۶۱/۴	۱/۲۰۴	۵/۱	۱/۹۵۰	۰/۵	۰/۹۹۹۸
۸	۲/۷۱۹	۱/۵۲۵	۴۸/۲	۱/۱۳۳	۳/۰	۱/۱۱۶	۰/۳	۰/۹۹۹۹
۱۵	۲/۸۶۸	۱/۲۳۵	۷۰/۷	۱/۲۱۲	۶/۹	۱/۷۴۹	۰/۶	۰/۹۹۹۶
۲۲	۲/۱۱۰	۱/۰۹۶	۶۸/۱	۰/۵۶۴	۵/۰	۰/۹۰۲	۰/۵	۰/۹۹۹۸
۲۹	۲/۳۸۸	۱/۰۵۰	۵۸/۳	۰/۷۱۱	۵/۰	۱/۱۵۳	۰/۵	۰/۹۹۹۹
۳۶	۲/۵۷۸	۰/۹۸۴	۴۴/۰	۰/۷۴۹	۴/۲	۱/۳۱۳	۰/۵	۰/۹۹۹۹
۴۳	۱/۴۲۲	۰/۴۹۶	۶۸/۵	۰/۳۸۲	۴/۸	۱/۰۲۲	۰/۴	۰/۹۹۹۷



شکل ۷ - تغییرات جزء الاستیک جمله‌ی اول مدل ویسکوالاستیک پوست در مقابل افزایش درجه بریکس میوه‌ی انگور.

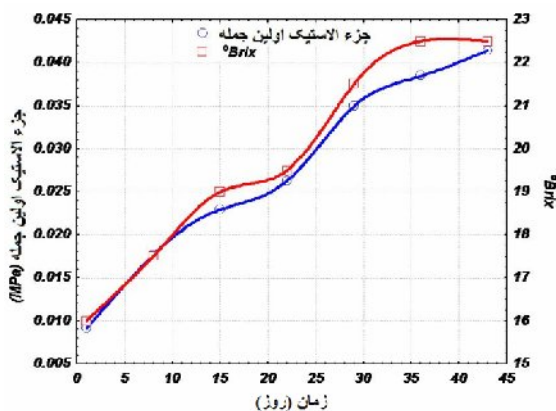


شکل ۸ - نمونه‌ای از نمودار استراحت گوشت در اولین و آخرین روز نمونه‌برداری.

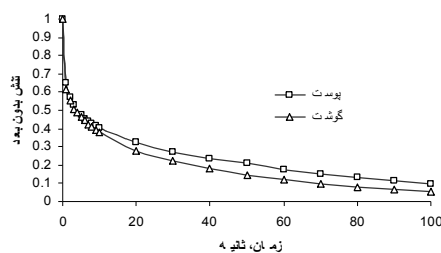
محلول باشد. شکل ۹ می‌تواند این پدیده را توصیف نماید. مقدار تنش جمله‌ی اول مدل ویسکو الاستیک گوشت با یک هماهنگی نزدیک، همزمان با افزایش مواد جامد محلول میوه افزایش می‌یابد.

به منظور مقایسه‌ی ویژگی‌های ویسکو الاستیک پوست و گوشت انگور با همدیگر، نسبت بدون بعد تنش طبق رابطه‌ی ۶ محاسبه و تغییرات آنها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل نمودار استراحت تنش بدون بعد پوست و گوشت نمونه‌های برداشت شده در هفته دوم مشاهده می‌شود. این نمودار به وضوح تأیید می‌کند که پوست انگور دارای ویژگی الاستیک بیشتری از گوشت آن می‌باشد و تنش تعادلی مشاهده شده در شکل اساساً می‌تواند بسیار مهم و قابل توجه تلقی شود.

جدول ۵ مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول را که با استفاده از معادله‌ی ۲ و روش رگرسیون غیر خطی محاسبه شده، برای گوشت انگور نشان می‌دهد. طی دوره‌ی رسیدن زمان استراحت تنش در گوشت انگور در گستره‌ی ۴۲/۶ تا ۷۲/۹ متغیر بوده و متوسط آن حدود ۵۳ ثانیه می‌باشد. همچنانکه در این جدول مشاهده می‌شود بر خلاف کاهش F_0 حبه‌ی کامل و σ_0 (تنش اولیه ناشی از کرنش ثابت اعمال شده) پوست، گوشت افزایش پیدا کرده است. با توجه به تغییرات اجزاء مدل (جدول ۵) و شکل ۸ به طور واضح افزایش ویسکوزیته در گوشت با طی دوره‌ی رسیدن مشاهده می‌شود. افزایش تنش اولیه‌ی مورد نیاز برای ایجاد یک کرنش ثابت در گوشت میوه می‌تواند به علت افزایش مواد جامد



شکل ۹ - تغییر مقدار جزء الاستیک جمله اول مدل ویسکو الاستیک گوشت میوه‌ی انگور در برابر درجه بریکس.



شکل ۱۰ آزمون استراحت پوست و گوشت بر اساس تنش بدون بعد (معادله‌ی ۶) برای یک نمونه‌ی معین برداشت شده در هفته‌ی دوم زمان مطالعه.

نتیجه گیری کلی

نظر گرفتن تغییرات خواص ویسکوالاستیک در گوشت، پوست و میوه‌ی کامل انگور و همچنین با در نظر گرفتن مقدار کاهش تنش نسبت به تنش اولیه‌ی حبه‌ی کامل انگور در مدت زمان آزمایش، نقش پوست میوه در تعیین رفتار ویسکوالاستیک حبه‌ی کامل بیشتر نمایان می‌شود. به نظر می‌رسد که بتوان با ردیابی تغییرات ویسکوالاستیک میوه در حین رسیدن نه تنها تغییرات زمان استراحت را پیش‌بینی نمود بلکه شرایط بهینه‌ای را نیز برای برداشت تعیین کرد.

با توجه به نتایج این تحقیق میوه‌ی انگور یک جامد ویسکوالاستیک محسوب می‌شود که خصوصیات ویسکوز و الاستیک آن از تغییرات ایجاد شده در ترکیبات شیمیایی میوه در طی دوره‌ی رسیدن تأثیر می‌پذیرد. با توجه به نتایج، پوست در مقایسه با گوشت نظیر یک ماده‌ی جامدی که از خاصیت ویسکوالاستیک با درجه‌ی الاستیسیته‌ی بیشتر برخوردار است رفتار می‌نماید در حالی که گوشت دارای ویژگی ویسکوالاستیک با ویژگی ویسکوز قوی می‌باشد. با در

جدول ۵ - مقادیر میانگین ضرایب مدل ماکسول گوشت انگور سفید بیدانه بر اساس معادله‌ی ۲.

R ²	T ₃ (s)	E ₃ (MPa)	T ₂ (s)	E ₂ (MPa)	T ₁ (s)	E ₁ (MPa)	E _e (Mpa)	روز
۰/۹۹۹۸	۰/۴۰۶۲	۰/۰۱۱۰	۴/۱	۰/۰۰۶۶	۴۳/۳	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۹۳	۱
۰/۹۹۹۹	۰/۴۱۰۱	۰/۰۱۶۸	۴/۸	۰/۰۱۲۳	۴۲/۶	۰/۰۱۷۷	۰/۰۱۱۶	۸
۰/۹۹۹۹	۰/۴۰۲۱	۰/۰۲۲۶	۴/۶	۰/۰۱۲۷	۴۷/۴	۰/۰۲۳۰	۰/۰۲۳۹	۱۵
۰/۹۹۹۹	۰/۴۰۵۷	۰/۰۲۶۲	۴/۹	۰/۰۱۴۲	۶۰/۲	۰/۰۲۶۲	۰/۰۲۲۳	۲۲
۰/۹۹۹۸	۰/۴۳۳۲	۰/۰۳۳۳	۷/۱	۰/۰۲۷۸	۷۲/۹	۰/۰۳۵۰	۰/۰۲۷۹	۲۹
۰/۹۹۹۹	۰/۴۴۱۰	۰/۰۳۱۷	۵/۰	۰/۰۱۹۸	۵۵/۱	۰/۰۳۸۵	۰/۰۴۰۱	۳۶
۰/۹۹۹۹	۰/۴۲۹۶	۰/۰۳۱۴	۴/۸	۰/۰۲۰۳	۴۹/۷	۰/۰۴۱۴	۰/۰۴۶۸	۴۳

منابع مورد استفاده

مقصودی ح، خوش‌تقاضا م و مینایی س، ۱۳۸۷. بررسی رفتار ویسکوالاستیک دانه پسته دهان بسته تحت بارگذاری شبه استاتیکی. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون. دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

AOAC, 1995. Official method of analysis. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.

Campus M, Addis MF, Cappuccinelli R, Porcu MC, Pretti L, Tedde V, Secchi N, Stara G and Roggio T, 2010. Stress relaxation behaviour and structural changes of muscle tissues from Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata* L.) following high pressure treatment. J Food Eng 96: 192-198.

Coombe BG, 1992. Research on development and ripening of the grape berry. Am J Enol Vitic 43: 101-110.

- Finney EET, 1967. Dynamic elastic properties of some fruits during growth and development. *J Agric Eng Res* 12(4): 249-256.
- Hassan BH, Alhamdan AM and Elansari AM, 2004. Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity. *J Food Eng* 66: 439-445.
- Jha SN, Kingsly ARP and Chopra S, 2006. Physical and mechanical properties of mango during growth and storage for determination of maturity. *J Food Eng* 72:73-76.
- Kajuna STAR, Bilanski WK and Mittal GS, 1998. Effect of ripening on the parameters of three stress relaxation models for banana and plantain. *Transactions of the ASAE* 41(1): 55-61.
- Khazaei J and Mann DD, 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 J Sci Res Develop* 5:1-12.
- Khazaei J and Mann DD, 2005. Effects of moisture content and number of loadings on force relaxation behaviour of chickpea kernels. *Inter Agrophysics* 19: 305-313.
- Li X and Wang W, 1998. Study on compressive properties of apple. *J Northwest agric univer* 26(2): 107-108.
- Lee C and Bourne YMC, 1980. Changes in grape firmness during maturation. *J Texture Studies* 11(2): 163-172.
- Mohsenin NN 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials: Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties*. 2nd ed., Gordon Breach Science Publisher, New York.
- Rajabipour A, Zarietard MR, Dodd GT and Norris ER, 2004. Tensile strength and relaxation of tomato skin by a loop technique. *Inter Agrophysics* 18:1-5.
- Rong W, Qunying J and Deqiang W, 2004. On the mechanical damage of grape using finite element analysis. *An ASAE/CSAE Meeting presentation*.
- Sahin S and Sumna S, 2006. *Physical properties of foods*. Springer-Verlag, Berlin.
- Steffe JF, 1996. *Rheological methods in food process engineering*. 2nd ed. Freeman Press, East Lansing, MI USA.
- Sakuria N and Nevins DJ, 1992. Evaluation of stress relaxation in fruit tissues. *Hort Technol* 2(3): 398-402.
- Sitkei G, 1986. *Mechanics of Agricultural Materials*. Elsevier, New York, Budapest, Hungary.
- 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.
- Vozary E and Meszaros P, 2007. Effect of mechanical stress on apple impedance parameters. *ICEBI,IFMBE Proceedings* 17: 118-121.
- Wu T and Abbott JA, 2002. Firmness and force relaxation characteristics of tomatoes stored intact or as slices. *Postharv Biol Technol* 24:59-68.