

مدلسازی ویسکوالاستیک سیب تحت بارگذاری شبه‌استاتیک با استفاده از روش اجزاء محدود به‌منظور بررسی علل کوفتگی در آن

بنت الهدی قاسمی باغبادرانی^۱ - عباس همت^{۲*} - علی قاسمی^۳ - علی حسین حبیبی راد^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۸

چکیده

اکثر آسیب‌های مکانیکی در انواع میوه و سبزی در اثر تنش‌های تماسی تحت بارهای استاتیکی، شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای ایجاد و موجب کاهش کیفیت محصول و ارزش اقتصادی آن می‌شود. در این پژوهش، سیب به‌عنوان یک ماده ویسکوالاستیک تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی با استفاده از روش اجزاء محدود مدلسازی شد. با استفاده از آزمایش‌های تجربی خواص الاستیک، ویسکوالاستیک و مقاومت برشی سیب تعیین شدند و در شبیه‌سازی سیب در نرم افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفتند. مقایسه نتایج تجربی و مدلسازی شده‌ی سیب نشان داد که مدل ویسکوالاستیک رفتار سیب حین بارگذاری شبه‌استاتیک را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد. محل ظهور کوفتگی در گوشت سیب آزمایش شده با محل ظهور تنش برشی بیشینه در سیب شبیه‌سازی شده همخوانی داشت. بنابراین، معیار تنش برشی بیشینه برای برآورد حساسیت گوشت ارقام سیب به کوفتگی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آباکوس، تنش برشی، سیب گلاب کهنز، کوفتگی، معیار گسیختگی

مقدمه

در خصوص مکانیزه کردن این مراحل و به‌تبع تولید سیب تجاری بیشتر و افزایش کسب درآمد برسانند.

آسیب مکانیکی در انواع میوه و سبزی در اثر تنش‌های تماسی تحت بارهای استاتیکی، شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای ایجاد و موجب کاهش کیفیت محصول و ارزش اقتصادی آن می‌شود. گزارش شده است که مشکل عمده صدمات مکانیکی پس از برداشت، برای بسیاری از میوه‌ها، کوفتگی است (Van Zeebroeck et al., 2007). بهبود شرایط برداشت، حمل و نقل، بسته‌بندی و انبارداری می‌تواند باعث کاهش حساسیت میوه به کوفتگی گردد (Kays, 1997).

حالت تنش و کرنش تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی که به طبیعت و رفتار مکانیکی مواد ارتباط داده می‌شود؛ به‌عنوان اولین قدم در کمی کردن مشخصه‌های محصولات کشاورزی و استفاده از این اطلاعات برای کاهش صدمات مکانیکی محسوب می‌شود. با توجه به پیچیده بودن شکل میوه‌ها و سبزی‌ها برای تعیین توزیع تنش و کرنش در آنها از مدلسازی عددی همچون اجزاء محدود استفاده شده است (Bajema et al., 1998). کاربرد اجزاء محدود در میوه‌ها بیشتر روی ارزیابی خواص ویسکوالاستیک و تخمین سفتی گوشت میوه بوده است. هرچند برای آسانتر کردن مدلسازی با روش اجزاء محدود، در اغلب پژوهش‌ها خواص میوه ایزوتروپیک فرض شده است

سیب یکی از مهم‌ترین محصولات باغی ایران محسوب می‌شود که پس از مرکبات مقام دوم را از نظر میزان تولید در سطح کشور دارد. ایران با دارا بودن مقام چهارم تولید جهانی سیب، سهم عمده‌ای را در صادرات این محصول داشته و لازم است با افزایش کمیت و کیفیت میوه سیب، جایگاه خود را بین کشورهای تولیدکننده این محصول حفظ نموده و ارتقا دهد. از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر افزایش کمی و کیفی میوه سیب، مراقبت در حین و پس از برداشت به‌منظور کاهش صدمات آن می‌باشد (Sayari, 2000). همچنین می‌توان گفت که تحقیقات انجام شده در ایران بسیار ناچیز و انگشت شمار است، به‌همین علت برداشت، انتقال و بسته‌بندی سیب در کشورمان همچنان به‌صورت دستی انجام می‌گیرد. بنابراین تحقیق و پژوهش بیشتر در این زمینه می‌تواند باغداران را به یک آینده‌ی درخشان‌تری

۱، ۳ و ۴- دانش‌آموخته‌گان کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

*- نویسنده مسئول: (Email: ahemmat@cc.iut.ac.ir)

دو فک تخت دستگاه تحت بارگذاری فشاری با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند و نمودار نیرو - تغییر شکل برای هر نمونه در نرم افزار رایانه‌ای مربوطه ترسیم گردید (ASAE, 2001). سپس با تقسیم نیرو بر مساحت قاعده نمونه‌ی استوانه‌ای، تنش؛ و با تقسیم تغییر شکل نمونه بر طول اولیه نمونه کرنش محوری محاسبه شد. نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش سیب در شکل ۱ نشان داده شده است. با استفاده از منحنی تنش-کرنش نمونه غیر محصور، مدول الاستیسیته، تنش و کرنش شکست، چقرمگی و انرژی شکست تعیین گردید. مدول الاستیسیته از شیب نمودار تنش-کرنش در حدود ۱/۳ نقطه شکست به دست آمد. تنش و کرنش شکست از مقدار تنش و کرنش در نقطه شکست تعیین شد. چقرمگی از سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا نقطه شکست محاسبه شد. برای به دست آوردن انرژی شکست، مقدار چقرمگی هر نمونه در حجم آن بر حسب mm^3 ضرب شد (Mohsenin, 1986).

برای انجام آزمایش‌های محصور از یک استوانه توخالی با قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر و قطر خارجی ۳۰ میلی‌متر و یک سنجه فولادی هم اندازه قطر داخلی آن برای اعمال بارگذاری، استفاده شد. کف استوانه برای خارج کردن نمونه قابل جدا شدن بود و همچنین سوراخ ریزی در کف آن ایجاد گردید تا آب نمونه بتواند حین بارگذاری خارج شود.

نمونه‌های مورد نظر درون استوانه قرار گرفت و با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری شد. سپس نمودار تنش-کرنش آزمایش‌های غیر محصور و محصور در یک شکل رسم گردید و در یک تنش کم که نمونه هنوز الاستیک بود، شیب دو نمودار محاسبه گردید و با استفاده از رابطه (۱) نسبت پواسون محاسبه گردید (Gyasi *et al.*, 1981):

$$\mu = \frac{1}{4}(R + (R^2 - 8R)^{\frac{1}{2}}) \quad (1)$$

$$R = \frac{E_c}{E_r} - 1$$

که در این روابط E_c و E_r به ترتیب شیب نمودار تنش کرنش در حالت محصور و غیر محصور است.

برای انجام آزمایش آسایش تنش^۱ ده عدد سیب انتخاب شد و نصف گردید و از یک طرف برای آزمایش فشاری محصور و از طرف دیگر برای آزمایش فشاری غیر محصور نمونه با نمونه‌گیر به قطر ۱۲ میلی‌متر خارج شد. طول اولیه نمونه‌ها با کولیس اندازه‌گیری شد. نرخ بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بود. پس از رسیدن جابه‌جایی ۲ میلی‌متر و برای سیب، حدوداً کرنش ۰/۱، فک دستگاه ثابت شد و نمودار نیرو بر حسب زمان تا ۵ دقیقه رسم گردید.

(Bajema and Hyde, 1998; Baritelle and Hyde, 2001). لوییز و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از نرم افزار ANSYSLS-DYNA بارگذاری استاتیکی فشاری بین صفحات موازی را بر پایه‌ی اجزاء محدود تحلیل کردند. آنها از یک اسکن لیزری جهت تهیه شکل هندسی واقعی سیب استفاده کردند. در این مدلسازی خواص سیب را به صورت الاستیک در نظر گرفتند. نتایج به دست آمده جهت تعیین بار آستانه‌ای در وقوع صدمات مکانیکی استفاده شد (Lewis *et al.*, 2008).

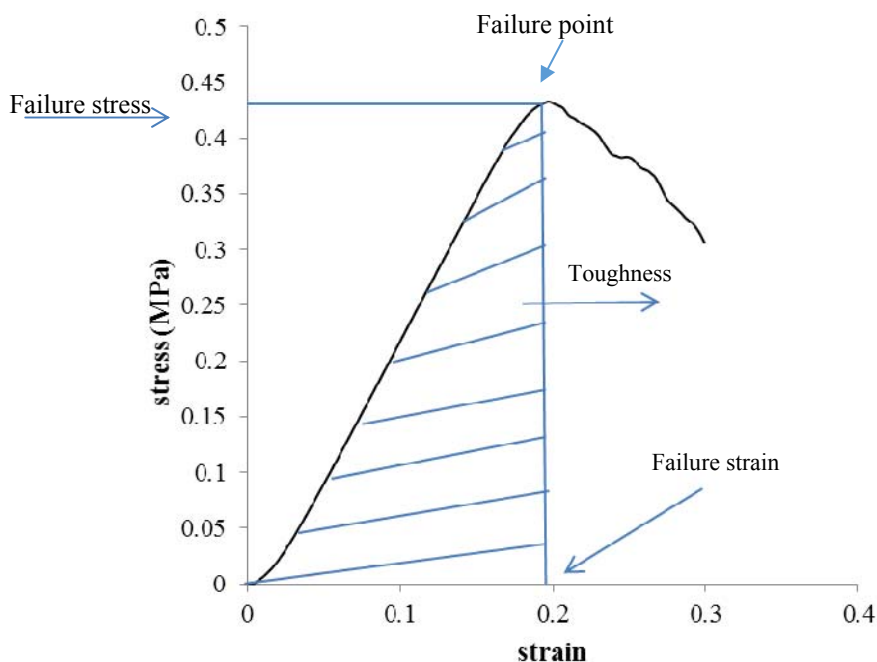
علاوه بر مدلسازی رفتار میوه‌ها به عنوان یک جسم الاستیک، چندین محقق تاکنون رفتار ویسکوالاستیک محصولات کشاورزی را بررسی کرده‌اند و از مدل‌های مکانیکی ساده با ترکیب خواص الاستیک و ویسکوز برای بیان رفتار جسم زمانی که محصول تحت بارگذاری کششی یا فشاری است، استفاده کردند (De Baerdemaeker, 1975; De Baerdemaeker and Segerlind, 1976; Gyasi *et al.*, 1981; Kim *et al.*, 2008; Sadrnia *et al.*, 2008; Sadrnia *et al.*, 2011).

آنچه باعث صدمه به میوه می‌گردد، افزایش تنش حاصل از نیروهای خارجی به مقداری بیش از تنش شکست بافت است (Rahemi, 2005). از طرف دیگر اندازه‌گیری تنش‌های ایجاد شده در داخل سیب حین بارگذاری‌های مختلف بسیار مشکل است. روش جایگزین مناسب استفاده از تحلیل اجزاء محدود جهت تخمین تنش‌های داخلی است. روش اجزاء محدود توانایی حل مسائل غیر خطی از قبیل تغییر شکل هندسی جسم و چگونگی تماس اجسام را دارد (Sadrnia *et al.*, 2011).

هدف این پژوهش شبیه‌سازی رفتار سیب به صورت ویسکوالاستیک تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و تعیین معیار شکست (تئوری تنش عمودی بیشینه و تئوری تنش برشی بیشینه) برای بررسی حساسیت به کوفتگی آن است.

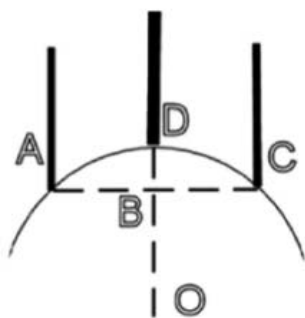
مواد و روش‌ها

این پژوهش در تابستان سال ۱۳۹۱ انجام شد. ۵۰ عدد سیب‌های گلاب که‌نز در تاریخ ۹۱/۵/۱ از باغ وابسته به مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی استان اصفهان، واقع در شهرستان سمیرم، به روش دستی برداشت شد. ده عدد سیب انتخاب شدند و از گوشت هر سیب دو نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۲ و طول ۲۰ میلی‌متر توسط نمونه‌گیر خارج شد که یکی برای آزمایش فشار تک‌محوری غیر محصور و دیگری برای آزمایش فشاری محصور به کار برده شد. دو طرف هر نمونه استوانه‌ای با استفاده از یک عدد تیغ جراحی تیز به صورت کاملاً صاف و یکنواخت شد. نمونه‌های تهیه شده توسط دستگاه جامع کشش و فشار سنتام مدل STM20 (همراه با لود سل ۵۰ کیلوگرمی مدل DBBP50 با دقت ۳ میلی‌ولت بر ولت) در بین



شکل ۱- نمونه‌ای از منحنی تنش- کرنش در آزمایش شبه‌استاتیکی سیب
Fig.1. Typical sample of stress-strain curve of apple under quasi-static test

که در این رابطه μ نسبت پواسون، $E_r(t)$ تغییرات مدول الاستیسیته محصور بر حسب زمان و $G(t)$ تغییرات مدول برشی بر حسب زمان در آزمایش آسایش تنش است (Tshoegl, 2002).
 بیست عدد از سیب‌ها توسط یک چاقوی تیز دو نصف شد و در محل گونه سیب دو شعاع انحنای عمود برهم با استفاده از دستگاه شعاع انحسانج توسط رابطه (۴) اندازه‌گیری شد (شکل ۲).



شکل ۲- طرح شماتیک دستگاه برای محاسبه شعاع انحنای سیب
Fig.2. Schematic representation of geometry to calculate the radius of curvature of the apple fruit

$$R = \frac{(AC)^2}{8BD} + \frac{BD}{2} \quad (4)$$

با تقسیم نیروها بر مساحت نمونه نمودار تنش بر حسب زمان به دست آمد و سپس با برازش منحنی روی نمودار تنش- زمان متغیرهای رابطه (۲) برای آزمایش‌های محصور و غیر محصور به دست آمد.

از سری پرونی برای برازش منحنی‌های آسایش تنش و استخراج پارامترهای مدل عمومی ماکسول استفاده شد (Mohsenin, 1986).
 برای برازش سری پرونی از نرم افزار متلب استفاده شد.

$$\sigma(t) = [E_1 \exp(-t / \tau_1) + E_2 \exp(-t / \tau_2) + E_e] \varepsilon_0 \quad (2)$$

$E_0 = E_e + (E_1 + E_2)$
 که ε_0 کرنش ثابت اعمال شده اولیه، E_1 و E_2 به ترتیب مدول الاستیسیته و τ_1 و τ_2 به ترتیب زمان‌های آسایش تنش عنصر ۱ و ۲ مدل ماکسول، E_e مدول الاستیسیته تعادلی و E_0 مدول الاستیسیته اولیه جسم می‌باشد.

با فرض ثابت بودن نسبت پواسون، با استفاده از مقادیر ضرایب ماکسول در آزمایش محصور مدول برشی بر حسب زمان طبق رابطه (۳) به دست آمد.

$$G(t) = E_r(t) \left(\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \right) \quad (3)$$



شکل ۳- قسمت‌های مختلف دستگاه برش مستقیم میوه: (۱) فک پایینی، (۲) فک بالایی، (۳) راهنما، (۴) میز کار، (۵) قرقره، (۶) نمونه‌گیر و (۷) محل قرارگیری وزنه

Fig.3. Different parts of fruit direct shear stress apparatus: 1) Lower jaw, 2) Upper jaw, 3) Guide, 4) Desktop, 5) Spool, 6) Cork borer, 7) Location of the weight

مرحله شبیه‌سازی در نرم افزار

شبیه‌سازی نمونه کامل

به‌علت متقارن بودن هندسه نمونه و کاهش زمان تحلیل، سیب به‌صورت نیم‌کره‌ای تغییر شکل‌پذیر^۱ با قطر ۴۹/۶ میلی‌متر مدلسازی شد. به‌دلیل آنکه تغییر شکل صفحه بارگذاری نسبت به نمونه سیب ناچیز بود، صفحه بارگذاری به‌عنوان جسم صلب ($E=\infty$) به‌صورت صفحه‌ای با طول و عرض ۵ سانتی‌متر تعریف شد. به‌منظور اعمال شرایط اولیه و مرزی نقطه وسط صفحه بارگذاری به‌عنوان گره مرجع^۲ برای آن در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی نمونه استوانه‌ای

به‌منظور تأیید نتایج تحلیل تنش‌ها به روش اجزاء محدود به‌دست آمده از شبیه‌سازی با نرم افزار آباکوس، نمونه سیب به‌صورت استوانه‌ای تغییر شکل‌پذیر با قطر ۱۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۲/۵ میلی‌متر در نرم افزار آباکوس نیز شبیه‌سازی شد.

تعریف خواص الاستیک و ویسکوالاستیک نمونه سیب

در این مرحله ابتدا سیب به‌صورت یک جسم همگن و ایزوتروپیک فرض شد، خواص مکانیکی شامل چگالی، مدول یانگ و نسبت پواسون و خواص شکست شامل تنش تسلیم و انرژی شکست به‌دست آمده از آزمایش فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به‌ترتیب برابر با ۰/۷۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۲/۴ مگاپاسکال، ۰/۲۶، ۰/۴۰۷

AC فاصله دو پایه مجاور شعاع انحناسنج و BD طول پایه میانی دستگاه است که با قله میوه در تماس است و با شعاع انحنای میوه تغییر می‌کند (شکل ۲).

نمونه‌ها به چهار گروه ده تایی تقسیم شدند. گروه اول تا یک میلی‌متر، گروه دوم تا دو میلی‌متر، گروه سوم تا سه میلی‌متر و گروه چهارم تا چهار میلی‌متر با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری و با همان سرعت نیز باربرداری شد. بعد از انجام آزمایش‌ها، میوه‌ها در دمای آزمایشگاه (۲۵-۲۲ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. در این مدت رنگ قسمت کوفته شده تمایل به قهوه‌ای شدن پیدا کرد (Holt and Schoorl, 1983). برای اندازه‌گیری حجم کوفتگی، ابتدا به کمک یک چاقوی تیز دو برش عمود بر سطح کوفتگی در کل سیب ایجاد گردید و عرض‌های کوفتگی و عمق‌های آن اندازه‌گیری شد. سپس از رابطه (۵) برای محاسبه حجم کوفتگی استفاده شد (Mohsenin, 1986).

$$V = \frac{\pi(d_b - d_t)}{24} (3w_1w_2 + 4(d_b - d_t)^2) \quad (5)$$

که در آن V حجم کوفتگی به $w_1 w_2$ ، mm³ عرض کوفتگی عمود برهم، d_b عمق کامل کوفتگی و d_t عمق سطح میوه تا کوفتگی به mm می‌باشند.

مقاوت برشی سیب‌ها با استفاده از دستگاه طراحی شده، مشابه برش مستقیم خاک برای امکان اعمال بارهای برشی توسط دستگاه جامع کشش- فشار که نمونه‌ای از منحنی خروجی آن در شکل نشان داده شده است، با ده تکرار تعیین شد (Ghasemibaghdarani, 2013).

1- Deformabel

2- Reference point

نحوه بارگذاری و آنالیز

صفحه بارگذاری با یک حرکت نرم (Smooth Step) با تعریف یک دامنه حرکت خطی با شیب ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه جابه‌جا گردید و سرانجام مسئله به صورت Dynamic Explicit حل شد. بدین منظور که حل مسئله سریعتر انجام شود، یک Mass Scale برابر ۵ نیز برای مسئله تعریف شد.

نتایج و بحث

مدلسازی سیب به صورت استوانه ویسکوالاستیک

توزیع تنش عمودی سیب مدلسازی شده به صورت استوانه در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشترین تنش در محل تماس صفحه بارگذاری و سیب به مقدار ۰/۵۱ مگاپاسکال به دست آمد. منحنی تنش - کرنش تجربی و مدلسازی شده در شکل ۶ آورده شده است.

مگاپاسکال و ۱۵۱/۰۲ میلی ژول به نرم افزار داده شد و خواص ویسکوالاستیک (پارامترهای مدل عمومی ماکسول در آسایش تنش و مدول برشی بر حسب زمان) مستخرج از سری پرونی برازش شده بر آزمایش آسایش تنش به مدل داده شد (جدول ۱).

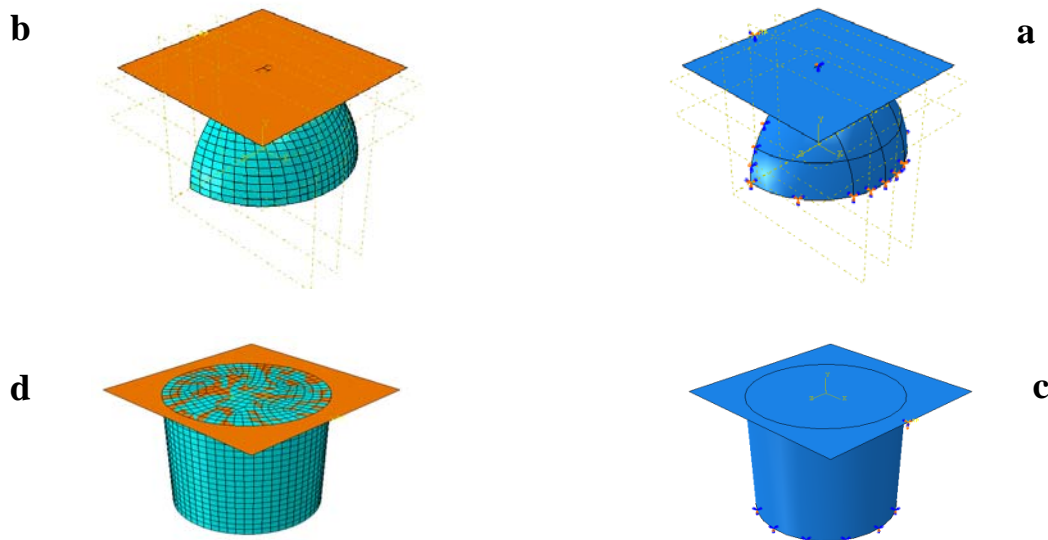
مش‌بندی مدل و اعمال شرایط مرزی

از تکنیک مش شبکه ساختار یافته آجری (Structured) برای مش‌بندی استفاده شد. المان‌ها هشت گرهی (C3D8R) برای مش‌بندی استفاده گردید به طوری که نمونه کامل سیب شامل ۲۱۹۸ المان و نمونه استوانه‌ای شامل ۷۱۲۵ المان بودند. کلیه درجات آزادی صفحه بارگذاری به جز حرکت در جهت Y مسدود شد و صفحه انتهایی نمونه سیب در جهت Y بسته شد و از چرخش آن جلوگیری شد (شکل ۴). سطوح تماس صفحه بارگذاری و سیب بدون اصطکاک در نظر گرفته شد.

جدول ۱- مقدار پارامترهای مدل ماکسول به دست آمده از آزمایش آسایش تنش ده نمونه گوشت سیب

Table 1- Values of Maxwell model obtained from stress relaxation test of ten apple flesh specimens

E_1	E_2	E_e	E_0	T_1	T_2
0.6188	0.6537	0.563	1.8355	107.1	4.9536

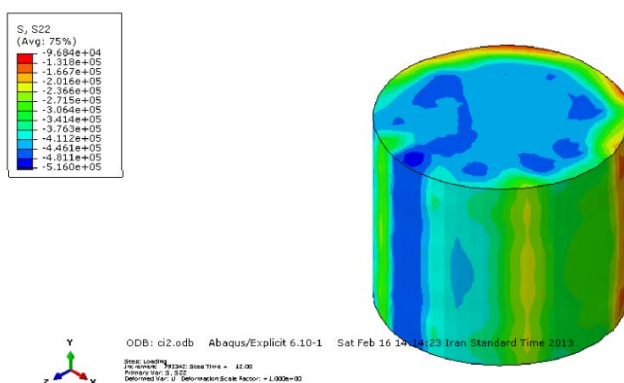


شکل ۴- a, b, c و d به ترتیب شرایط مرزی و مش‌بندی نیمه سیب شبیه‌سازی شده و نمونه استوانه‌ای سیب

Fig.4. a, b, c and d are boundary conditions and mesh geometry of half simulated apple and cylindrical apple sample, respectively

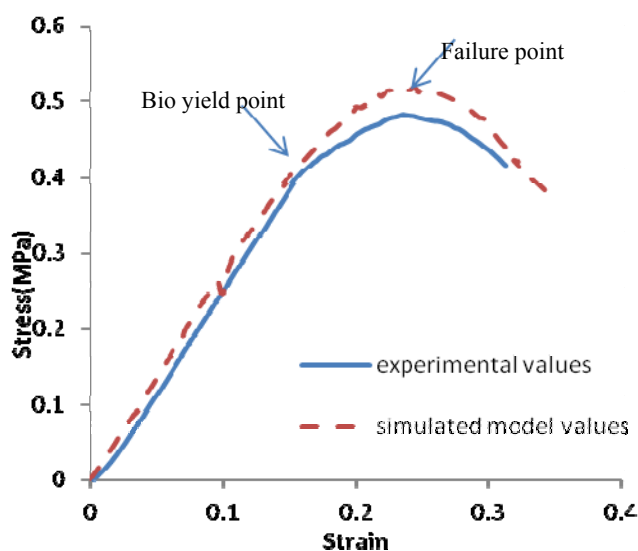
مدلسازی سیب به‌عنوان یک جسم کروی ویسکوالاستیک
 در جابه‌جایی یک و دو میلی‌متر مقدار حجم کوفتگی سیب‌ها تقریباً برابر صفر بود. حجم کوفتگی با جابه‌جایی سه و چهار میلی‌متر به ترتیب ۳۵۱/۶۸ و ۴۲۲/۹۸ میلی‌متر مربع به دست آمد. محققان معیارهای شکست را برای انواع میوه‌ها و سبزیجات مطالعه کرده‌اند. معمولاً اعتقاد بر این است که علت شکست در بافت میوه، عمدتاً به دلیل تنش برشی بیشینه است (Chen and Sun, 1984). در آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های استوانه‌ای سیب، نحوه شکست سیب شبیه شکل ۷ بود.

تا نقطه تسلیم زیستی منحنی‌ها تقریباً بر هم منطبق هستند و مدل به خوبی رفتار ویسکوالاستیک سیب را نشان می‌دهد. پس از آن تنش‌هایی که مدل‌سازی نشان داده است مقداری بیشتر از تنش واقعی هستند تا جایی که تنش شکست واقعی ۱۶٪ کمتر از تنش شکست سیب مدل شده می‌باشد. با این حال نقطه کرنشی که در آن شکست اتفاق افتاده است در آزمایش تجربی و مدلسازی تقریباً یکسان است.



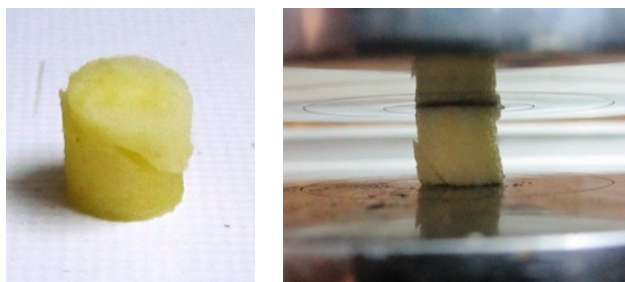
شکل ۵- توزیع تنش عمودی نمونه استوانه‌ای سیب شبیه‌سازی شده به‌عنوان یک جسم ویسکوالاستیک در لحظه شکست توسط نرم افزار آباکوس

Fig.5. Vertical stress distribution at failure point in simulated cylindrical apple as a viscoelastic body using ABAQUS software



شکل ۶- منحنی تنش (MPa) - کرنش یک نمونه استوانه‌ای سیب به دست آمده از آزمایش تجربی و مدل شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار آباکوس

Fig.6. Stress-strain curve of a cylindrical sample obtained from the experimental test and simulated model using ABAQUS software



شکل ۷- الگوی شکست در نمونه آزمایش شده
Fig.7. Failure pattern in a tested sample

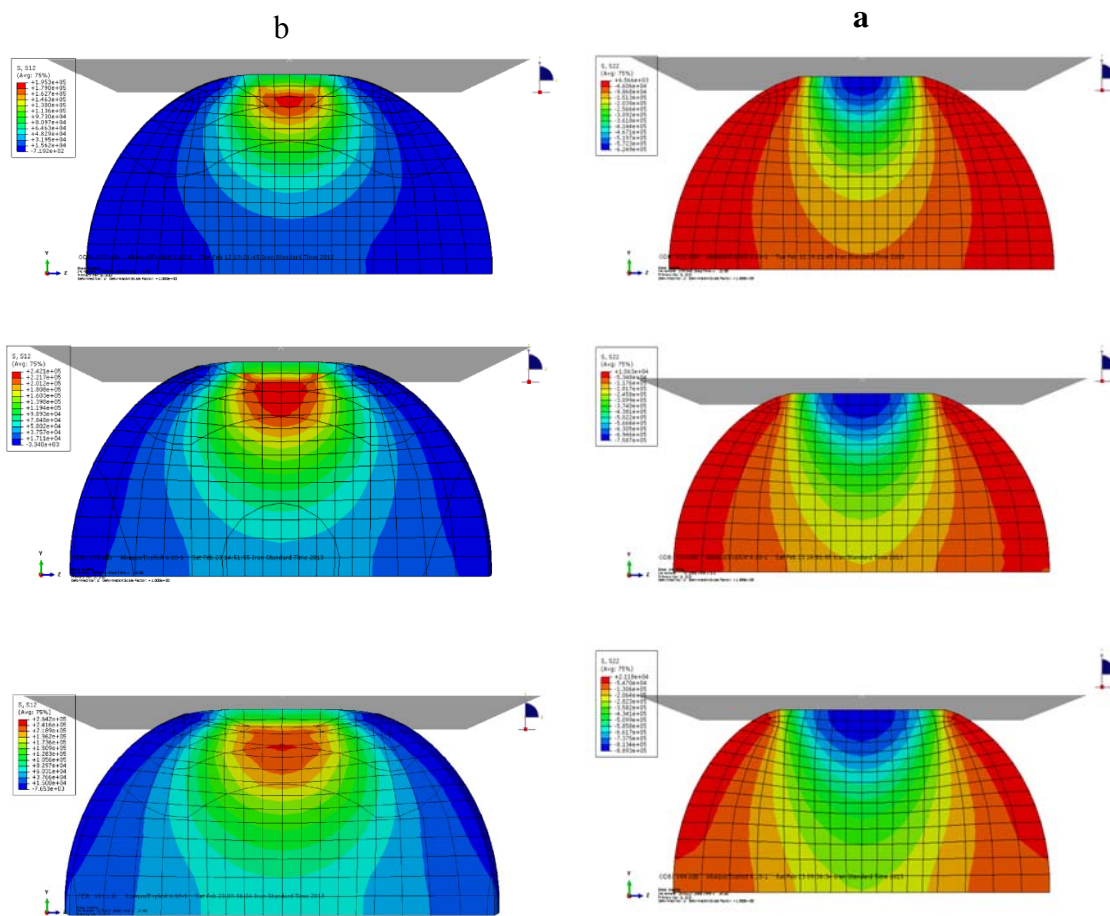
با توجه به آزمایش‌های انجام شده تنش عمودی شکست سیب گلاب کهنز در برداشت اول ۰/۴۹ مگاپاسکال است. طبق شکل ۹ (a) در هر سه تغییر شکل، بیشینه تنش عمودی ایجاد شده در سیب بالاتر از نقطه شکست (تنش شکست در آزمایش بر روی نمونه استوانه‌ای) است. با توجه به نتایج تجربی آزمایش بر اثر دو میلی‌متر تغییر شکل، تقریباً کوفتگی برابر صفر بود. بنابراین بر اثر شکست عمودی کوفتگی قابل دیدنی مشاهده نشد. مقدار تجربی مقاومت برشی سیب گلاب کهنز ۰/۲۳ مگاپاسکال به دست آمد. بیشینه تنش برشی ناشی از اعمال دو میلی‌متر تغییر شکل به سیب مدلسازی شده ۰/۱۹۵ مگاپاسکال به دست آمده که از مقاومت برشی سیب کمتر است. بنابراین شکست برشی هنوز اتفاق نیفتاده است. پس از آن با اعمال سه و چهار میلی‌متر تغییر شکل بیشینه تنش برشی به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۲۶ مگاپاسکال است که نشان می‌دهد شکست به احتمالاً واسطه تنش برشی اتفاق افتاده و بافت سیب دچار کوفتگی شده است. محل قرارگیری بیشینه تنش برشی با محل ایجاد کوفتگی در نمونه‌های آزمایش شده مطابقت دارد (شکل ۹ (b)).

محل و الگوی شکست، غالباً برای توضیح علت شکست در میوه‌ها استفاده شده است. وقتی که نمونه استوانه‌ای میوه تحت فشار تک محوری قرار می‌گیرد، شکست معمولاً در راستای صفحه بیشینه تنش برشی اتفاق می‌افتد. این الگوی شکست بیانگر این است که شکست به دلیل تنش‌های برشی اتفاق می‌افتد (Diehl and Hamann, 1972). یک توضیح دیگر که توسط محققان برای شکست برشی استفاده شده است، محل کوفتگی پس از بارگذاری، در میوه است. محل کوفتگی اکثر سیب‌ها پس از بارگذاری، با فاصله از سطح بود (شکل ۸). اطلاعات به دست آمده از نتایج حاصل از مطالعات انجام شده روی کوفتگی میوه با ضربه سقوط روی سطح صاف محل حداکثر تنش برشی حین ضربه اندکی زیر سطح است (Hamann, 1970; Rumsey and Fridley, 1977).

توزیع تنش عمودی و برشی برای ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر تغییر شکل برای سیب گلاب کهنز شبیه‌سازی شده به عنوان یک کره‌ی ویسکوالاستیک به ترتیب در شکل‌های ۹ (a و b) نشان داده شده است.



شکل ۸- نمونه‌ای از شکل کوفتگی در سیب
Fig.8. Typical sample of bruise shape in apple



شکل ۹- (a) توزیع تنش عمودی و (b) توزیع تنش برشی سیب شبیه‌سازی شده به‌عنوان یک کره ویسکوالاستیک تحت ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر تغییر شکل در نرم افزار آباکوس

Fig.9. (a) Vertical and (b) Shear stress distributions in simulated apple as a viscoelastic sphere under 2, 3 and 4 mm deformation using ABAQUS software

اندازه‌گیری مقاومت برشی سیب ما را یاری دادند کمال تشکر را داریم. ضمناً از آقای مهندس محمد نظری و علی کامشاد دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان که در ساخت دستگاه برش مستقیم میوه همکاری نمودند تشکر می‌گردد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده مدل‌سازی در نرم افزار اجزاء محدود، می‌تواند در شناخت و بررسی صدمات محصولات کشاورزی در حین بارگذاری‌های مختلف (فرآیندهای برداشت، حمل و نقل، بسته‌بندی و انبار کردن این محصولات) نمود.

سپاسگزاری

از آقای دکتر حمید هاشم الحسینی که در طراحی دستگاه

منابع

1. ASAE. 2001. Compression test of food materials of convex shape. In "ASAE Standards", ASAE S368.4, St. Joseph, MI, pp. 580-587.
2. Bajema, R. W., and G. M. Hyde. 1998. Instrumented pendulum for impact characterization of whole fruit and vegetable specimens. Transactions of the ASAE 41: 1399-1405.

3. Bajema, R. W., G. M. Hyde, and, K. Peterson. 1998. Instrumentation design for dynamic axial compression of cylindrical tissue samples. *Transactions of the ASAE*. 41: 747-754.
4. Baritelle, A. L., and G. M. Hyde. 2001. Commodity conditioning to reduce impact bruising. *Post harvest Biology and Technology* 21: 331-339.
5. Chen, P and., Z. Sun. 1984. Critical Strain Failure Criterion: Pros and Cons. *Transactions of the ASAE* 278-281.
6. De Baerdemaeker, J. G. 1975. Experimental and numerical techniques related to the stress analysis of apples under static load. Unpublished Ph.D. dissertation, Michigan State University.
7. De Baerdemaeker, J. G., and L. J. Segerlind. 1976. Determination of the Viscoelastic Properties of Apple Flesh. *Transactions of the ASAE* 19: 346-348.
8. De Baerdemaeker. J. G. 2008. Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models. *Journal of Food Engineering* 86: 272-280.
9. Diehl, K. C., and D. D. Hamann. 1979. Structural failure in selected raw fruit and vegetables. *Journal of Texture Studies* 10: 371-400.
10. Ghasemibaghdarani, B. H. 2013. Effect of variety, harvesting time on some mechanical properties of apple and its bruise susceptibility under quasi-static loading. Department of Agricultural Machinery Engineering. Isfahan University of Technology. Isfahan.
11. Gyasi, S. L., R. B. Fridley, and P. Chen. 1981. Elastic and Viscoelastic Poisson's Ratio Determination for Selected Citrus Fruits. *Transactions of the ASAE*. 24: 747-750.
12. Hamann, D. D. 1970. Analysis of stress during impact of fruit considered to be viscoelastic. *Transactions of the ASAE* 13 (6): 893-900.
13. Holt, J. E., and J. Schoorl. 1983. Fracture in potatoes and apples. *Journal of Materials Science* 18: 2017-2028.
14. Kays, S. T. 1997. *Postharvest physiology of perishable plant products*. Athens, GA: Exon press.
15. Kim, G. W., M. S. Kim, Y. Sagara, Y. H. Bae, I. B. Lee, G. S. Do, S. H. Lee, and S.W. Kang. 2008. Determination of the viscoelastic properties of apple flesh under quasi-static compression based on finite element method optimization. *Food Science and Technology* 14: 221-231.
16. Lewis, R., A. Yoxall, M. B. Marshall, and L. A. Canty. 2008. Characterizing pressure and bruising in apple fruit. *Wear* 264: 37-46.
17. Mohsenin, N. N. 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. 2nd Revised and Updated Edition. Gordon and Breach Science Publishers. New York.
18. Rahemi, M. 2005. *Postharvest: An Introduction to the Physiology and Handling of Fruit, Vegetables and Ornamental*. Shiraz University Press, Shiraz.
19. Rumsey, T. R., and R. B. Fridley. 1977. Analysis of viscoelastic contact stresses in agricultural products using a finite-element method. *Transactions of the ASAE* 20 (1): 162-167.
20. Sadrnia, H., A. Rajabipour, A. Jafari, A. Javadi, Y. Mostofi, J. Kafashan, E. Dintwa, and J. De Baerdemaeker. 2008. Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models. *Journal of Food Engineering* 86: 272-280.
21. Sadrnia, H., B. Emadi, A. Rajabipour, and J. De Baerdemaeker. 2001. Computer simulation of local bruising in Golden Delicious apple fruit. *Iranian Journal of Biosystems Engineering* 42: 69-78.
22. Sayari, M. 2000. Predicting and identifying physiological maturity and Heat Effects of Calcium Chloride and Potassium Permanganate on Storage Life of Golden Delicious apples in cold storage. Department of Horticultural Science. Shiraz University. Shiraz.
23. Tshoegl, N. W., W. G. Knauss, and I. Emri. 2002. Poisson's ratio in linear viscoelasticity: a critical review. *Mechanics of Time-Dependent Materials* 6: 3-51.
24. Van Zeebroeck, M., V. Van linden, P. Darius, B. De Ketelaere, H. Ramon, and E. Tijskens. 2007. The effect of fruit factors on the bruise susceptibility of apples. *Postharvest Biology and Technology* 46: 10-19.

Viscoelastic modeling of apples under quasi-static loading using finite element method to investigate the causes of bruising

B. Ghasemi¹ - A. Hemmat^{2*} - A. Ghasemi³ - A. Habini Rad⁴

Received: 17-11-2013

Accepted: 18-01-2014

Introduction: Apple is one of the most important horticultural crops of Iran. Its production in the country stands in the second place after citrus. Iran holds the fourth place in the world production of apples and gains a major share in the export of this product. Therefore, it is necessary to enhance the quantity and quality of the fruit in order to maintain and promote its position among the countries importing this product from Iran. Most of the mechanical damages to fruits and vegetables occur due to contact stresses under static, quasi-static and impact loading. To obtain stress distribution inside the fruit we can use finite element analysis. The aim of this study was to simulate the behavior of the apple as a viscoelastic body subjected to quasi-static loading and also to determine the failure criteria (maximum normal stress or shear stress) of apple flesh to estimate its susceptibility to mechanical bruising.

Materials and methods: In this study, Golab kohanz apple was used. Two samples were removed from each apple using a core sampler, one was used for uniaxial compression and the other was used for confined compression test using Instron universal tension and compression machine. Spherical indenter and parallel plate tests were performed in order to study apple susceptibility to bruising at four deformation levels (1, 2, 3 and 4 mm) and the bruise volume was then measured after 24 hours. Stress-strain curves were plotted and then, the elastic and viscoelastic properties were obtained. Then, by using the data obtained from apple properties, the apple was modeled in Abaqus software as spherical and cylindrical shapes with viscoelastic behavior subjected to quasi-static loadings.

Results and Discussion: The normal stress distribution of the modeled apple in the shape of a cylindrical sample is shown in Fig. 4. The value of maximum normal stress was obtained (0.51 MPa) at the contact point of the loading plate with the sample. Experimental and modeled stress-strain curves are shown in Fig. 5. Up to the bio-yield point, the two curves are nearly matched; and beyond that point, there are some overestimations in the predicted stress values.

The location and pattern of failure have often been used to explain the cause of failure in fruits. When specimens of fruit are subjected to a uniaxial compression, the failure often occurs the maximum shear stress plane. Failure patterns in the tested samples indicate that the failure occurs due to shear stresses. Another explanation that has been used by researchers for shear failure is the bruising position inside the fruit after loading. The position of bruising in most of the tested apples was a distance away from the apple surface (Fig. 7).

According to the experiments results at the three deformation levels of 2, 3, and 4 mm, the maximum generated normal stress inside the apple was above the point of failure of the cylindrical samples. Based on the empirical results, the bruising was almost zero for the apples subjected to one or two mm deformation (Fig. 9a). The experimental value of the shear strength of the Golab kahanz apple was obtained to be 0.23 MPa. The maximum shear stress inside the modeled apple due to the two mm deformation was 0.195 MPa, which was lower than the shear strength of the apple. On the other hand, by applying three and four mm of deformation, the maximum shear stresses were obtained to be 0.24 and 0.26 MPa, respectively, indicating that the induced stress exceeded the shear strength of apple flesh; therefore, the bruising was observed in the flesh of these apples. The location of the maximum shear stress corresponds to the location of bruising in the tested samples as shown in Fig. 9b.

According to the obtained results from the modeling in the finite element software, we can use this software in order to recognize and investigate the damages in agricultural products during different loading conditions (Harvesting, transportation, packaging and storage).

1, 3 & 4- Graduated student, Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan

2- Prof., Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan

(* - Corresponding Author Email: ahemmat@cc.iut.ac.ir)

Conclusions: In this work, Golab apple was considered as a viscoelastic material and its behavior under quasistatic loading was modeled using finite element method. Elastic, viscoelastic properties and shear strength of apple flesh were obtained and used in the simulation. Comparison of modeling and experimental results shows that the model simulates the behavior of apples during quasistatic loading well. The location of bruise occurrence in the flesh of tested apple and the location of maximum shear stress in the simulated apple was the same. Therefore, the maximum shear stress criterion can be used to estimate the susceptibility of apple varieties to internal bruising under quasistatic loading. Modeling of apple as a viscoelastic sphere in Abaqus software assuming constant bulk modulus could properly simulate apple behavior under quasistatic loading.

Keywords: Apple, Finite element, Quasi-static loading, Viscoelastic properties