

## مدلسازی ویسکوالاستیک سیب تحت بارگذاری شبه استاتیک با استفاده از روش اجزاء محدود به منظور بررسی علل کوفتگی در آن

بنت الهدی قاسمی باغبادرانی\*<sup>۱</sup>، عباس همت<sup>۲</sup>

۱- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی

اصفهان، اصفهان کدپستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

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

کدپستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

[b.ghasemibaghdarani@ag.iut.ac.ir](mailto:b.ghasemibaghdarani@ag.iut.ac.ir)

### 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 به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی با استفاده از روش اجزاء محدود مدل سازی شد. با استفاده از آزمایش‌های تجربی خواص الاستیک، ویسکوالاستیک و مقاومت برشی سیب تعیین شدند و در شبیه سازی 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 به خوبی شبیه‌سازی کرد. محل ظهور کوفتگی در گوشت سیب آزمایش شده با محل ظهور تنش برشی بیشینه در سیب شبیه سازی شده همخوانی داشت. بنابراین، معیار تنش برشی بیشینه برای برآورد حساسیت گوشت ارقام سیب به کوفتگی تحت بارگذاری شبه-استاتیکی پیشنهاد می‌گردد.

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

### مقدمه

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 تولید کننده این محصول حفظ نموده و ارتقا دهد. از مهم‌ترین عوامل موثر بر افزایش کمی و کیفی میوه سیب، مراقبت در حین و پس از برداشت به منظور کاهش صدمات آن می‌باشد (Sayari., 2000). همچنین می‌توان گفت که تحقیقات انجام شده در ایران بسیار ناچیز و انگشت شمار است، به همین علت برداشت، انتقال و بسته



بندی سبب در کشورمان همچنان به صورت دستی انجام می‌گیرد. بنابراین تحقیق و پژوهش بیشتر در این زمینه می‌تواند باغداران را به یک آینده‌ی درخشان تری در خصوص مکانیزه کردن این مراحل و به طبع تولید سبب تجاری بیشتر و افزایش کسب درآمد برساند.

آسیب مکانیکی در انواع میوه و سبزی در اثر تنش‌های تماسی تحت بارهای استاتیکی، شبه استاتیکی 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، بسته بندی 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، به عنوان 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 (Bajema and Hyde, 1998; Baritelle *et al.*, 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 سبب استفاده کردند. در این مدل‌سازی خواص سبب را به صورت الاستیک در نظر گرفتند. نتایج بدست 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 تا کنون 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).

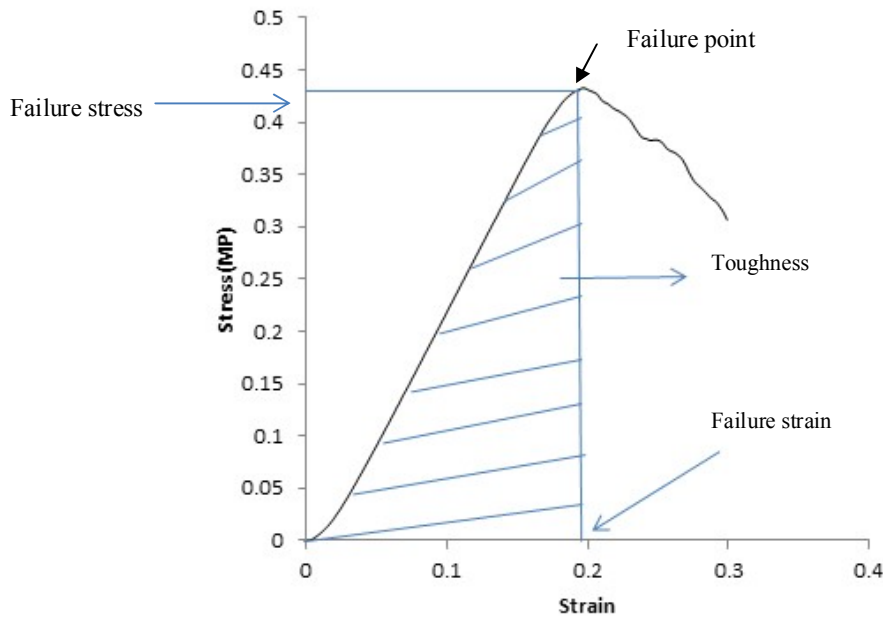
آنچه باعث صدمه به میوه می‌گردد، افزایش تنش حاصل از نیروهای خارجی به مقداری بیش از تنش شکست بافت است (Rahemi, 2005). از طرف دیگر اندازه‌گیری تنش‌های ایجاد شده در داخل سبب حین بارگذاری‌های مختلف بسیار مشکل است. روش جایگزین مناسب استفاده از تحلیل اجزاء محدود جهت تخمین تنش‌های داخلی است. روش اجزاء محدود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



هدف این پژوهش شبیه سازی رفتار سبب به صورت ویسکوالاستیک تحت بارگذاری شبه استاتیکی 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 کهیز 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 تک محوری غیر محصور و دیگری برای آزمایش فشاری محصور بکار 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 (STM20) همراه با لود سل ۵۰ کیلوگرمی مدل DBBP50 با دقت ۳ میلی‌ولت بر ولت در بین 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 رایانه ای 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 بدست 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 بدست آوردن انرژی شکست، مقدار چقرمگی هر نمونه در حجم آن بر حسب  $\text{mm}^3$  ضرب شد (Mohsenin., 1986).



شکل ۱- نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش در آزمایش شبه استاتیکی سیب

Figure 1-Typical sample of stress-strain curve of apple under quasi-static test.

برای انجام آزمایش‌های محصور از یک استوانه توخالی با قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر و قطر خارجی ۳۰ میلی‌متر و یک سنبه 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<sup>۱</sup> 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 جابجایی ۲ میلی‌متر و برای سیب، حدوداً کرنش ۰/۱، فک دستگاه ثابت شد و نمودار نیرو بر حسب زمان تا ۵ دقیقه رسم گردید. با تقسیم نیروها بر مساحت نمونه نمودار تنش بر حسب زمان بدست آمد و سپس با برازش منحنی روی نمودار تنش-زمان متغیرهای رابطه ۲ برای آزمایش‌های محصور و غیر محصور بدست 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<sup>۲</sup> استفاده شد.

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

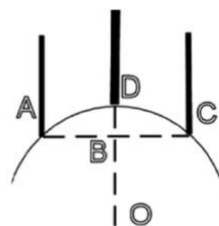
$$E_0 = E_e + (E_1 + E_2)$$

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

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

که در این رابطه  $\mu$  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 انحنای سنج توسط رابطه ۴ اندازه‌گیری شد (شکل ۲).



شکل ۲- طرح شماتیک دستگاه برای محاسبه شعاع انحنای سیب.

Figure 2- schematic representation of geometry to calculate the radius of curvature of the apple fruit.

<sup>1</sup> Stress Relaxation

<sup>2</sup> MATLAB



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

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: که 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 (۲۲-۲۵ 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 معادله 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  $mm^3$ ،  $w_1, w_2$  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 ۳ داده شده است، با ده تکرار تعیین شد (Ghasemibaghdarani., 2013).



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

Figure 3-Different parts of fruit direct shear stress apparatus: 1) lower jaw, 2) upper jaw, 3) guide, 4) desktop, 5) spool, 6) cork borer, and 7) location of the weight.

## مرحله شبیه سازی در نرم افزار

### شبیه سازی نمونه کامل

به علت متقارن بودن هندسه نمونه و کاهش زمان تحلیل، سیب به صورت نیم کره‌ای تغییر شکل پذیر<sup>۳</sup> با قطر ۴۹/۶ میلی‌متر مدل سازی شد. به دلیل آنکه تغییر شکل صفحه بارگذاری نسبت به نمونه سیب ناچیز بود، صفحه بارگذاری به عنوان جسم صلب ( $E=\infty$ ) به صورت صفحه‌ای با طول و عرض ۵ سانتی‌متر تعریف شد، به منظور اعمال شرایط اولیه و مرزی نقطه وسط صفحه بارگذاری به عنوان گره مرجع<sup>۴</sup> برای آن در نظر گرفته شد.

### شبیه‌سازی نمونه استوانه‌ای

به منظور تایید نتایج تحلیل تنش‌ها به روش اجزاء محدود به دست آمده از شبیه سازی با نرم افزار آباکوس، نمونه سیب به صورت استوانه‌ای تغییر شکل پذیر 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 به صورت 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 بدست آمده از آزمایش فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ترتیب برابر با ۰/۷۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۲/۴ مگاپاسکال، ۰/۲۶ ، ۰/۴۰۷ 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).

### جدول ۱- مقدار پارامترهای مدل ماکسول بدست 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

### مش بندی مدل و اعمال شرایط مرزی

از تکنیک مش شبکه ساختار یافته آجری (Structured) برای مش‌بندی استفاده شد. المان‌ها هشت‌گره‌ای (C3D8R) برای مش‌بندی استفاده گردید به طوری که، نمونه کامل سیب شامل ۲۱۹۸ المان و نمونه استوانه‌ای شامل ۷۱۲۵ المان بودند. کلیه

<sup>۳</sup> Deformabel

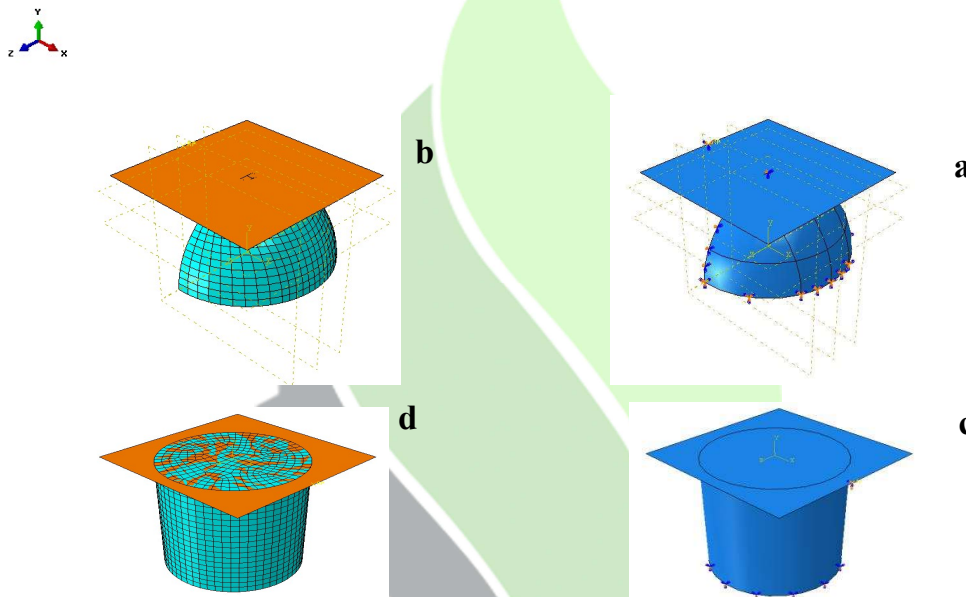
<sup>۴</sup> Reference Point



درجات آزادی صفحه بارگذاری بجز 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.

### نحوه بارگذاری و آنالیز

صفحه بارگذاری با یک حرکت نرم (Smooth Step) با تعریف یک دامنه حرکت خطی با شیب ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه جابجا گردید و سر انجام 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.



شکل ۴- a, b, c و d به ترتیب شرایط مرزی و مش بندی نیمه سیب شبیه سازی شده و نمونه استوانه‌ای سیب.

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

### نتایج و بحث

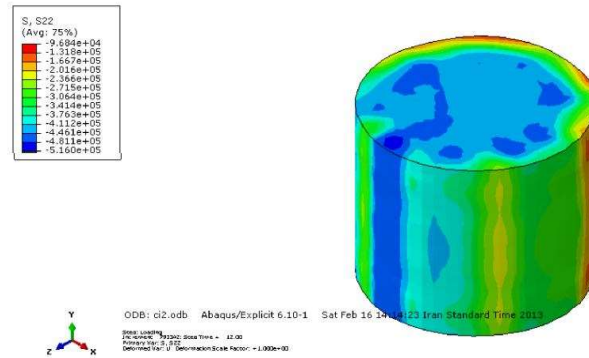
#### مدل سازی سیب به صورت استوانه ویسکوالاستیک

توزیع تنش عمودی سیب مدل سازی شده به صورت استوانه در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشترین تنش در محل تماس صفحه بارگذاری و سیب به مقدار  $0.51$  مگاپاسکال به دست آمد. منحنی تنش- کرنش تجربی و مدل سازی شده در شکل ۶ آورده شده است. تا نقطه تسلیم زیستی منحنی‌ها تقریباً بر هم منطبق هستند و مدل به خوبی رفتار ویسکوالاستیک سیب را نشان می-



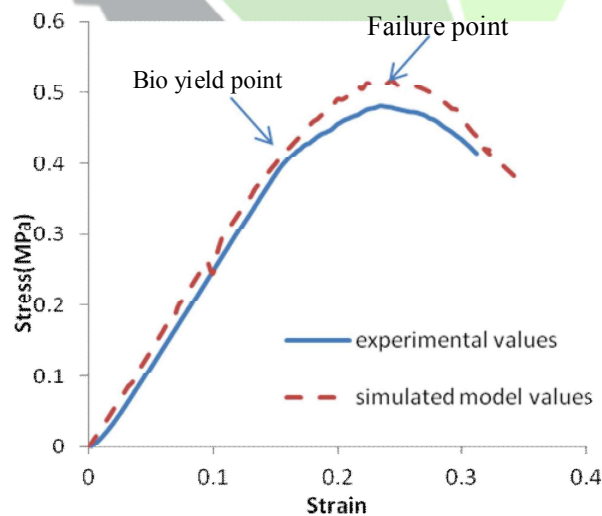


دهد. پس از آن تنش‌هایی که مدل‌سازی نشان داده است مقداری بیشتر از تنش واقعی هستند تا جاییکه تنش شکست واقعی ۱۶٪ کمتر از تنش شکست سبب مدل شده می‌باشد. با این حال نقطه کرنشی که در آن شکست اتفاق افتاده است در آزمایش تجربی و مدل‌سازی تقریباً یکسان است.



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

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



شکل ۶- منحنی تنش-کرنش یک نمونه استوانه‌ای سیب بدست آمده از آزمایش تجربی و مدل شبیه‌سازی شده با نرم افزار آباکوس.

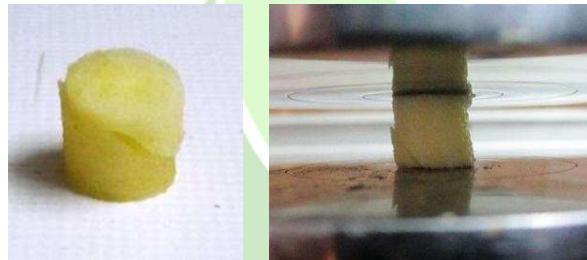


**Figure 6-** Stress-strain curve of a cylindrical sample obtained from the experimental test and simulated model using ABAQUS software.

#### مدل‌سازی سیب به عنوان یک جسم کروی ویسکوالاستیک

در جابجایی یک و دو میلی‌متر مقدار حجم کوفتگی سیب‌ها تقریباً برابر صفر بود. حجم کوفتگی با جابجایی سه و چهار میلی‌متر به ترتیب  $۳۵۱/۶۸$  و  $۴۲۲/۹۸$  میلی‌متر مربع بدست 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 شکل‌های ۷ بود.



**شکل ۷-** الگوی شکست در نمونه آزمایش شده.

**Figure 7-** Failure pattern in a tested sample.

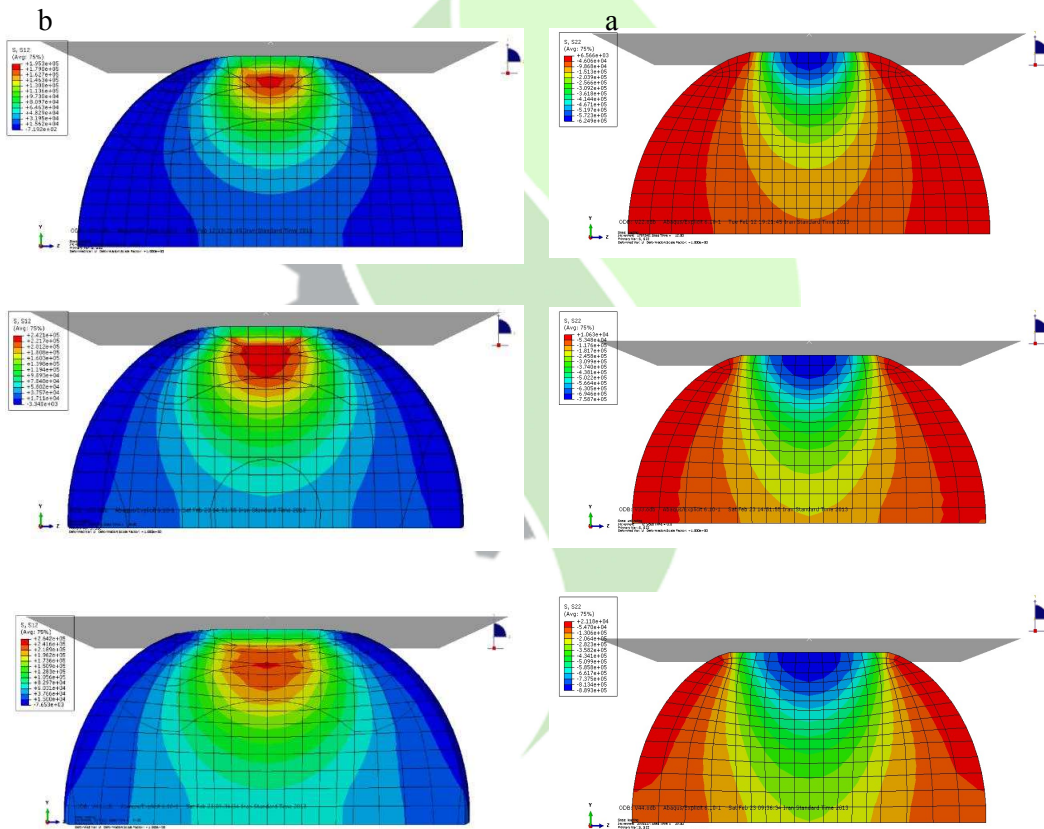
محل و الگوی شکست، غالباً برای توضیح علت شکست در میوه‌ها استفاده شده است. وقتی که نمونه استوانه‌ای میوه تحت فشار تک محوری قرار می‌گیرد، شکست معمولاً در راستای صفحه بیشینه تنش برشی اتفاق می‌افتد. این الگوی شکست بیانگر این است که شکست به دلیل تنش‌های برشی اتفاق می‌افتد (Diehl and Hamann, 1972). یک توضیح 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).



شکل ۸- نمونه‌ای از شکل کوفتگی در سیب.

Figure 8- Typical sample of bruise shape in apple.

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



شکل ۹- (a) توزیع تنش عمودی و (b) توزیع تنش برشی سیب شبیه سازی شده به عنوان یک کره ویسکوالاستیک تحت

۲، ۳ و ۴ میلی‌متر تغییر شکل در نرم افزار آباکوس.

Figure 9- (a) Vertical stress distribution and (b) shear stress distribution in simulated apple as a viscoelastic sphere under 2, 3 and 4 mm deformation using ABAQUS software.



با توجه به آزمایش‌های انجام شده تنش عمودی شکست سیب گلاب کهنز در برداشت اول ۰/۴۹ مگاپاسکال است. طبق شکل ۸ (الف) 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 بدست 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 واسطه تنش برشی اتفاق افتاده و بافت سیب دچار کوفتگی شده است. محل قرار گیری بیشینه تنش برشی با محل ایجاد کوفتگی در نمونه‌های آزمایش شده مطابقت دارد (شکل ۸).

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

### سپاسگزاری

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

### منابع

- ASAE. 2001. Compression test of food materials of convex shape. In "ASAE Standards", ASAE S368.4, St. Joseph, MI, pp. 580-587.
- 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.
- 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.
- Baritelle, A. L and., G. M. Hyde. 2001. Commodity conditioning to reduce impact bruising. Postharvest Biology and Technology. 21: 331-339.

- 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.
- De Baerdemaeker. J. G. 2008. Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models. . Journal of Food Engineering. 86: 272-280.
- De Baerdemaeker, J. G and., L. J. Segerlind. 1976. Determination of the Viscoelastic Properties of Apple Flesh. Transactions of the ASAE. 19: 346-348.
- Diehl, K. C and., D. D. Hamann. 1979. Structural failure in selected raw fruit and vegetables. Journal of Texture Studies. 10: 371-400.
- 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.
- Kays, S. T. 1997. Postharvest physiology of perishable plant products. Athens, GA: Exon press.
- 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.
- Hamann, D. D. 1970. Analysis of stress during impact of fruit considered to be viscoelastic. Transactions of the ASAE. 13(6): 893-900.
- Holt, J. E and., J. Schoorl. 1983. Fracture in potatoes and apples. Journal of Materials Science. 18: 2017-2028.
- Chen, P and., Z. Sun. 1984. Critical Strain Failure Criterion: Pros and Cons. Transactions of the ASAE. 278-281.
- 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 quasistatic compression based on finite element method optimization. Food Science and Technology. 14: 221-231.
- Lewis, R., A. Yoxall., M. B. Marshall and., L. A. Canty. 2008. Characterizing pressure and bruising in apple fruit. Wear. 264: 37-46.
- Mohsenin, N. N. 1986. Physical Properties of Plant and Animal Materials. 2nd Revised and Updated Edition. Gordon and Breach Science Publishers. Newyork.

- Rahemi, M. 2005. Postharvest an introduction to the physiology and handling of fruit, vegetables and ornamental. Shiraz university Press. Shiraz.
- 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, 171.
- Sadriana, 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.
- Sadriana, 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.
- 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.
- 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.
- 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.



## Viscoelastic modeling of apple under Quasi-Static Loading using finite element method to investigate the causes of apple bruising

Bentolhoda ghasemibaghbadrani<sup>1\*</sup> and Abbas Hemmat<sup>2</sup>

1- Graduated from the Masters, Department of Biosystems Engineering, Isfahan University of Technology

[b.ghasemibaghbadrani@ag.iut.ac.ir](mailto:b.ghasemibaghbadrani@ag.iut.ac.ir)

1- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Isfahan University of Technology

### Abstract

Most of mechanical damage in fruits and vegetables occurs due to contact stresses under static, quasi-static and impact loading, and it reduces the quality of the product and its economic values. In this work, apple was considered as a viscoelastic material and its behavior under quasi-static loading was modeled using finite element method. Elastic, viscoelastic properties and shear strength of apple tissue were obtained and used in the simulation. Comparison of modeling and experimental results shows that the model simulates the behavior of apples during quasi-static loading well. The location of bruise occurrence in 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 sensitivity of apple varieties to internal bruising under quasi-static loading.

Keywords: Abaqus, Bruising, Failure Criteria, Golab Kohanz apple, Shear Stress