

بررسی ویژگی‌های مکانیکی میوه به (*Cydonia oblonga*) تحت بارگذاری شبه استاتیک به روش اجزای محدود

شعیب غلامی^۱، سعید مینایی^{۲*}، علیرضا مهدویان^۳، شفیع رحمتی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استاد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

^۳ استادیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

چکیده

بسته‌بندی، انتقال و جدا کردن محصولات کشاورزی از جمله فرآیندهایی هستند که بسته به نوع محصول موجب آسیب دیدگی احتمالی، تلفات و افزایش ضایعات این محصولات می‌شوند. از این رو، شناخت ویژگی‌های مقاومت مکانیکی محصول برای جلوگیری از بروز آسیب‌های مکانیکی ضروری است. استفاده از آزمون‌های مکانیکی مانند آزمون فشاری از راهکاری‌های مرسوم برای رسیدن به اطلاعات مورد نیاز است، اما بهره‌گیری از روش‌های شبیه‌سازی با صرف هزینه کمتر و با سرعت بیشتر، دامنه گسترده‌تری از اطلاعات مانند محل توزیع تنش و کرنش در میوه را مشخص می‌کند. میوه "به" با نام علمی *Cydonia oblonga* مانند محصولات مشابه، امکان آسیب دیدگی مکانیکی دارد. در پژوهش حاضر، به منظور تعیین ویژگی‌های مکانیکی میوه "به" آزمون‌های مکانیکی توسط دستگاه آزمون مواد در سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه اجرا و برای شبیه‌سازی آزمون بارگذاری در سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به منظور اعتبار سنجی از نرم‌افزار ANSYS بهره‌گیری شد. نتایج تجربی و مدل‌سازی شده میوه "به" نشان داد در مدل ویسکوالاستیک، رفتار میوه در نقطه شکست حین بارگذاری شبه‌استاتیک با نتایج تجربی دارای ۷ درصد اختلاف است. نتایج ارزیابی سرعت‌های بارگذاری ۵ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شده در مدل شبیه‌سازی شده نشان داد که در سرعت ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه تنش برشی و عمودی بیشتری به نمونه وارد می‌شود و کمینه مقدار تنش برشی و عمودی که عامل اصلی شکست در میوه هستند، مربوط به سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه است. با توجه به نتایج ارزیابی‌ها، بهتر است عملیات برداشت و پس از برداشت میوه تحت شرایطی صورت پذیرد که منجر به سرعت‌های بارگذاری کمتر (۵ میلی‌متر بر دقیقه) می‌شود، تا از میزان ضایعات آن تا حد امکان کاسته شود.

واژه‌های کلیدی: ANSYS، تنش عمودی، تنش برشی، میوه به، خواص مکانیکی

مقدمه

مکانیکی، شناخت ویژگی‌های مقاومت مکانیکی محصول در شرایط مختلف است. نقطه تسلیم در مواد بیولوژیکی، نقش مهمی در تعیین حساسیت آنها به آسیب‌های مکانیکی دارد. در این نوع سامانه‌های تماسی، نحوه توزیع فشار ناشی از تماس اهمیت بیولوژیکی ویژه‌ای دارد. به همین دلیل در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای به شبیه‌سازی تغییر شکل‌های غیر الاستیک و مدل‌سازی غیرخطی فشار تماسی

"به" با نام علمی *Cydonia oblonga* میوه‌ای است غنی از نظر ترکیبات مختلف مانند فلاونوئید و اسید فنولیک که به فعالیت‌های ضد سرطان، ضد التهاب، ضد آلرژی و ضد میکروبی کمک می‌کند. میوه "به" به دلیل بوی مطبوع و طعم متمایز آن شناخته می‌شود (Yildiz et al., 2020). یکی از راه‌های اصلی برای جلوگیری از بروز آسیب‌های

داد که مدل ویسکوالاستیک رفتار سیب حین بارگذاری شبه استاتیک به خوبی با نتایج تجربی تطابق دارد (Celik *et al.*, 2011; Ghasemi *et al.*, 2015; Ahmadi *et al.*, 2016). ویژگی‌های ویسکوالاستیک محصولات کشاورزی برای بیان رفتار محصول زمانی را که تحت بارگذاری کششی یا فشاری است توسط پژوهشگران مختلف (Sadrina *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2012; Petru *et al.*, 2014; Yousefi *et al.*, 2016) به روش اجزای محدود بررسی شده است.

به منظور بسته‌بندی، جا به جایی، جدا سازی و انبارداری محصولات باغی از جمله میوه "به" شناسایی ویژگی‌های مکانیکی بسیار با اهمیت و کاربردی است. از سوی دیگر، روش‌های مرسوم تعیین ویژگی‌های مکانیکی از جمله با دستگاه آزمون مواد، هزینه بر و زمان بر هستند. تحلیل عددی روشی مؤثر برای تحلیل تنش و شبیه‌سازی شرایط بارگذاری و محاسبه تغییر شکل نمونه است. هدف این پژوهش شبیه‌سازی رفتار میوه "به" تحت بارگذاری شبه-استاتیک و تحلیل نیرو و تنش‌های وارده به این میوه با استفاده از روش اجزای محدود است.

مواد و روش‌ها

میوه "به" برداشت شده در یکی از باغ‌های اطراف شهر تهران برای آزمایش انتخاب شد. بیست عدد میوه انتخاب و از بافت هر یک، دو نمونه مکعبی با اضلاع ۱۶ میلی‌متر استخراج شد، یک نمونه برای آزمایش فشار تک محوری غیر محصور و دیگری برای آزمایش فشاری محصور به کار برده شد. لازم است گفته شود که برش و جدا کردن نمونه به نحوی صورت گرفت که بافت میوه دچار لهیدگی نشود. اطراف هر نمونه مکعبی با کمک یک عدد تیغ جراحی تیز به صورت کاملاً یکنواخت اصلاح شد. نمونه‌های تهیه شده، با دستگاه آزمون مواد (Hounsfield مدل k-SH50 ساخت کشور انگلستان) با دو فک تخت که روی نمونه قرار می‌گیرد تحت آزمایش فشاری قرار گرفت (شکل ۱). برای هر آزمایش، نمونه در فاصله بین فک‌های ثابت و متحرک

در تولیدات بیولوژیکی شده است (Chen *et al.*, 2012). در اغلب تحلیل‌های مهندسی از روش‌های عددی بهره گرفته می‌شود و شاخه‌های متفاوتی در علم مهندسی مکانیک به وجود آورده است مانند اجزای محدود، اجزای مرزی و اجزای گسسته که به منظور حل مسائل تماسی می‌توان از آنها بهره جست (Topakci *et al.*, 2010). یکی از مزایای روش اجزای محدود این است که خواص هر یک از اجزا می‌تواند متفاوت باشد و همچنین محاسبات را می‌توان برای اجسام با هندسه غیر یکنواخت مانند محصولات باغی به کار برد. با این روش، بی‌نظمی در شکل جسم را می‌توان از ترکیب کردن اجزا با اضلاع خطی یا غیرخطی به طور تقریبی تعیین کرد و توزیع تنش- کرنش را در تمام محصول به دست آورد که این امر امکان تشخیص تمام نقاط بحرانی و غیر بحرانی را به نحو معتبر و مشخصی فراهم می‌کند. این امر به‌ویژه هنگامی بسیار مفید است که هندسه محصول و شرایط بارگذاری پیچیده باشند (Kabas *et al.*, 2008). با توجه به پیچیده بودن شکل میوه‌ها و سبزی‌ها برای تعیین توزیع تنش و کرنش در آنها، کاربرد اجزای محدود برای تحلیل میوه‌ها در سال‌های اخیر بیشتر شده است (Ahmadi *et al.*, 2016).

در تحقیقی برای زدودن پوسته سبز گردو به روش اجزای محدود، هنگامی که بارهای محوری و یکنواخت در جهت عرضی اعمال شد، پوسته داخلی راحت‌تر از پوسته سبز جدا گردید و بهترین حالت برای زدودن پوسته سبز گردو به دست آمد (Xu *et al.*, 2012). در پژوهشی دیگر، روش اجزای محدود برای شبیه‌سازی تغییر شکل غیرخطی محدود برای استخراج روغن گردوی آمریکایی به کار گرفته شد و با استفاده از دستگاه آزمون مواد و روش فشاری نتایج تجربی به دست آمد. نتایج تغییر شکل پوسته سخت گردو در روش شبیه‌سازی مبتنی بر FEM^1 و شبیه‌سازی فشرده‌سازی واقعی بسیار نزدیک یکدیگر بودند (Celik, 2016). در تحقیقی برای شبیه‌سازی ویژگی‌های ویسکوالاستیک و مقاومت برشی سیب به روش اجزای محدود، مقایسه نتایج تجربی و مدل‌سازی شده سیب نشان

¹ Finite Element Method

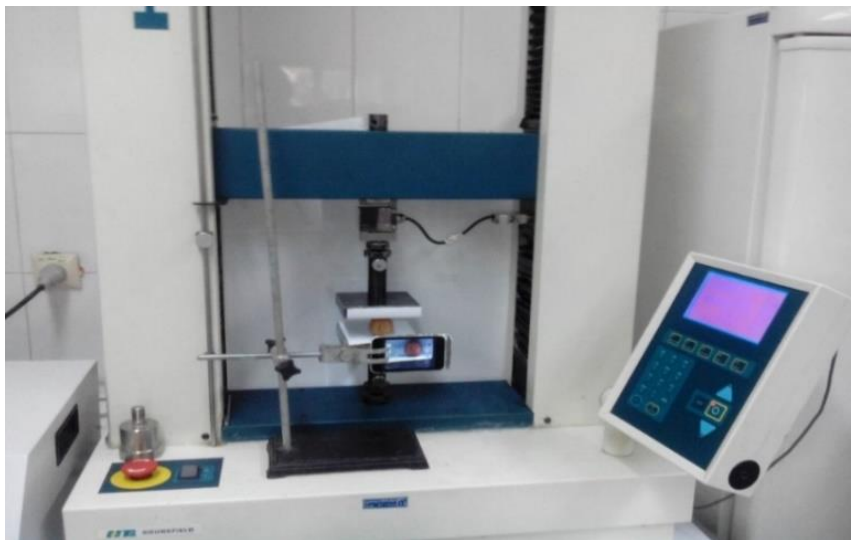
۱۶ میلی‌متر و یک سنبه فولادی هم اندازه قطر داخلی آن برای اعمال بارگذاری توسط دستگاه آزمون مواد بهره گرفته شد. به‌طور مشابه در حالت قبل، نمونه‌های مورد نظر درون استوانه قرار داده شدند و با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری اجرا شد. نمودار تنش-کرنش آزمایش‌های محصور در یک شکل رسم گردید و مقدار مدول الاستیسیته به دست آمد. با توجه به شیب‌های محاسبه شده نمودارهای تنش-کرنش در دو حالت محصور و غیر محصور و همچنین با استفاده از رابطه‌های (۱ و ۲) نسبت پواسون محاسبه شد (Gyasi *et al.*, 1981).

$$\mu = \frac{1}{4} (R + (R^2 - 8R)^{\frac{1}{2}}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

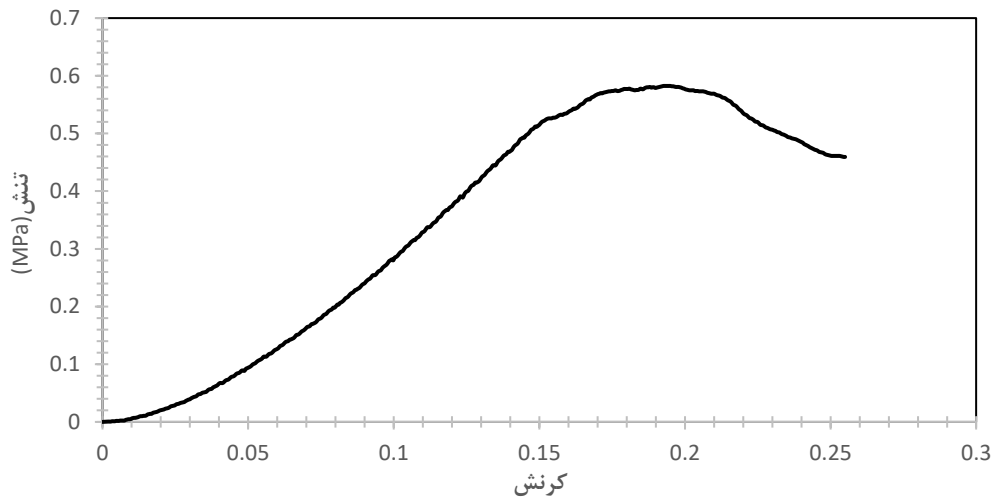
$$R = \frac{E_c}{E_r} - 1 \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه‌ها، μ بیانگر نسبت پواسون و E_c و E_r به ترتیب شیب نمودار تنش-کرنش در دو حالت محصور و غیر محصور است.

دستگاه آزمون مواد قرار گرفت و بارگذاری در سرعت ۱۰ mm/min در جهت طولی محصول تنظیم شد. نمودار نیرو-تغییر شکل برای هر نمونه به‌طور جداگانه رسم شد. با تقسیم نیروی محاسبه شده بر مساحت قاعده نمونه، مؤلفه تنش به دست آمد؛ با تقسیم تغییر شکل نمونه، که توسط دستگاه آزمون مواد اندازه‌گیری شده است، بر طول اولیه نمونه کرنش محوری محاسبه گردید. نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش میوه به در شکل (۲) نشان داده شده است. با استفاده از منحنی تنش-کرنش نمونه غیر محصور، مقادیر مدول الاستیسیته، تنش و کرنش شکست، چقرمگی و انرژی شکست محاسبه گردید. با بهره جستن از شیب نمودار تنش-کرنش، مقادیر مدول الاستیسیته نمونه و نیز مقدار تنش و کرنش شکست از مقدار تنش و کرنش در نقطه شکست تعیین شد. به منظور محاسبه چقرمگی نمونه، به کمک نرم‌افزار متلب، مساحت سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا نقطه شکست محاسبه گردید. با توجه به مقدار چقرمگی محاسبه شده برای هر نمونه، به‌منظور تعیین انرژی شکست، مقدار چقرمگی هر نمونه در حجم آن برحسب mm^3 ضرب شد (Mohsenin, 2020). برای اجرای آزمایش‌های محصور، از یک استوانه توخالی با قطر داخلی



شکل ۱- نمایی از بارگذاری میوه "به" توسط دستگاه آزمون مواد
Fig. 1- Quince fruit loading using the material testing machine



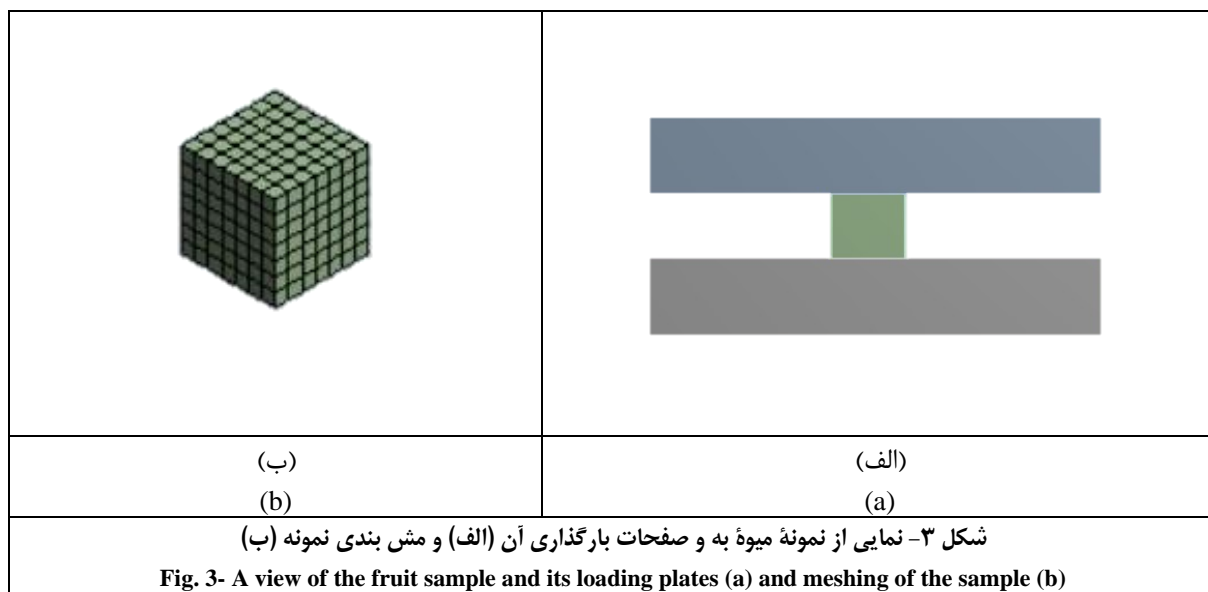
شکل ۲- نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش در آزمایش فشاری غیر محصور میوه "به"
 Fig. 2- stress-strain curve in the unconfined compressive test of quince fruit

که شامل المان‌های چهار وجهی^۳ و شش وجهی^۴ است، شبکه‌بندی به صورت چهارگوش^۵ اجرا شد. به منظور بررسی شبکه بهینه و استقلال نتایج از شبکه، شبکه‌های ریزتر و درشت‌تر بررسی و در آخر شبکه بهینه برای هندسه انتخاب گردید. کلیه درجات آزادی صفحه بارگذاری به جز حرکت در راستای Y محدود گردید و صفحه انتهایی نمونه در جهت Y مسدود و از چرخش آن جلوگیری شد. برای صفحات فشار دهنده المان جامد^۶ به دلیل عدم تغییر در ساختار آن از نوع صلب^۷ و برای سطوح تماس المان تماسی نوع جوش خورده^۸ انتخاب گردید. در تمام سطوح تماس، یک سطح به عنوان سطح هدف و یک سطح به عنوان سطح تماس تعریف می‌شود و معمولاً سطحی که صاف‌تر است و شکل هندسی منظم‌تری دارد، به عنوان سطح هدف انتخاب می‌گردد. از این رو صفحات فشار دهنده به عنوان سطح هدف و سطحی از نمونه که با صفحات فشار دهنده در تماس است به عنوان سطح تماس در نظر گرفته شد.

پس از آزمایش‌های تجربی و محاسبه مقدار متغیرهای مورد نظر، به منظور یافتن نقاط شکست در انواع بارگذاری و نیز به منظور توزیع تنش-کرنش درون نمونه میوه "به" رفتار آن تحت بارگذاری شبه استاتیک با FEM به کمک نرم‌افزار ANSYS R 18.2 تحلیل و بررسی شد. مطابق ابعاد واقعی قطعات‌های برش خورده که در آزمایش‌های تجربی استفاده شد، هندسه نمونه در بخش Design Modeler نرم‌افزار ANSYS رسم گردید. صفحه فشار دهنده (فک بالایی دستگاه آزمون مواد) بر طبق مشخصات مکانیکی فولاد و اندازه واقعی در دستگاه آزمون مواد شبیه‌سازی شد (شکل ۳). در نرم‌افزار ANSYS R 18.2 امکان شبکه‌بندی به دو روش خودکار و دستی وجود دارد. در روش خودکار نرم‌افزار با توجه به شکل هندسی مدل بهترین حالت مش‌بندی را برای مدل انتخاب می‌کند. در این تحقیق با بهره‌گیری از حالت خودکار مطابق شکل (۳) و استفاده از روش، مش شبکه ساختار یافته^۲ و المان‌های هشت گرهی (C3D8R)

⁶ Solid
⁷ Rigid
⁸ Bonded

² Structured
³ Tetrahedra
⁴ Hexahedral
⁵ Quad



نتایج به دست آمده از نمودارهای نیرو-شکست که خروجی دستگاه آزمون مواد است امکان تعیین چقرمگی، انرژی شکست و نیروی شکست را با استفاده از روابط می‌دهد. جنس میوه "به" از نوع الاستو پلاستیک با رفتار غیرخطی انتخاب گردید و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی اندازه‌گیری شده مطابق جدول (۱) به نرم‌افزار معرفی شد. مشخصه‌های صفحه فشار دهنده مطابق ویژگی‌های مکانیکی فولاد (ضریب کشسان ۲۰۰ GPa و پواسون ۰/۳) در نظر گرفته شد. در شرایط حقیقی، شرایط مرزی و سطح تماس به طور دائم در حال تغییر هستند. لذا در تعریف سطح تماس، از خاصیت bonded در نرم‌افزار به دلیل حرکت نکردن سطوح نسبت به هم استفاده گردید. صفحه بارگذاری با حرکت نرم^۹ و تعریف یک دامنه حرکت خطی با شیب ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه جابه‌جا گردید. با اعمال خواص مورد نیاز برای ماده و همچنین شرایط مرزی بیان شده، شبیه‌سازی فرآیند تعیین ویژگی‌های مکانیکی نمونه صورت گرفت.

نتایج به دست آمده از نمودارهای نیرو-شکست که خروجی دستگاه آزمون مواد است امکان تعیین چقرمگی، انرژی شکست و نیروی شکست را با استفاده از روابط می‌دهد. جنس میوه "به" از نوع الاستو پلاستیک با رفتار غیرخطی انتخاب گردید و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی اندازه‌گیری شده مطابق جدول (۱) به نرم‌افزار معرفی شد. مشخصه‌های صفحه فشار دهنده مطابق ویژگی‌های مکانیکی فولاد (ضریب کشسان ۲۰۰ GPa و پواسون ۰/۳) در نظر گرفته شد. در شرایط حقیقی، شرایط مرزی و سطح

جدول ۱- ویژگی‌های مواد استفاده شده در شبیه‌سازی مبتنی بر FEM
Table 1- Properties of materials used in the FEM-based simulation of Quince

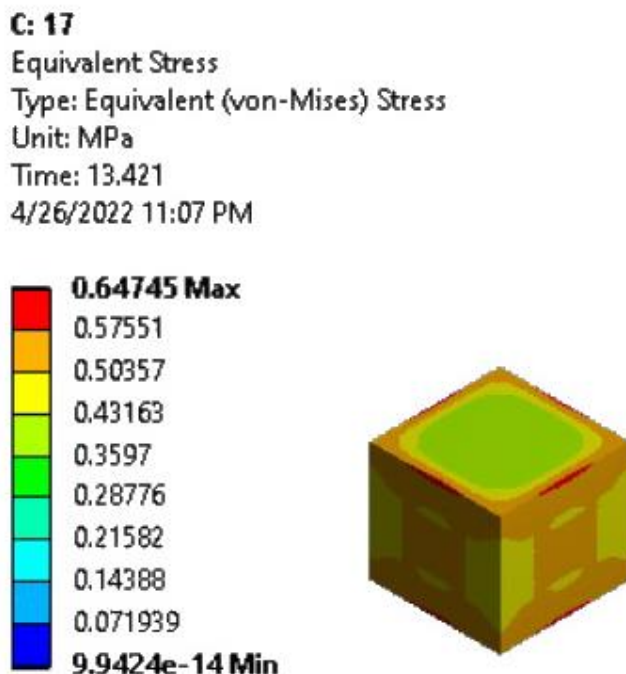
جهت بارگذاری Loading direction	چگالی (گرم بر میلی‌لیتر) ρ (gr/ml)	نیروی شکست (نیوتون) failure force (N)	چقرمگی (ژول بر میلی‌متر مکعب) Toughness (J/mm ³)	انرژی شکست (میلی ژول) Energy failure (mJ)	مدول کشسانی (مگا پاسکال) Elastic modulus (MPa)	ضریب پواسون Poisson's ratio
طولی linear	2.4	149.1	5.6	229.3	3.5	0.22

^۹ Smooth Step

نتایج و بحث

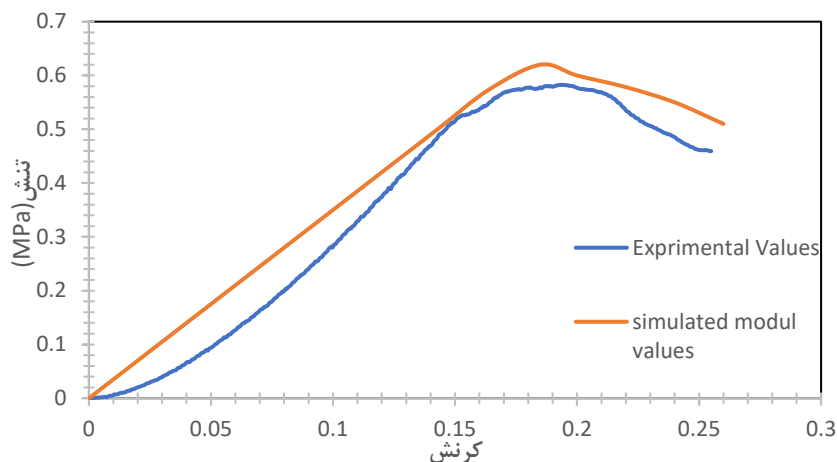
و تجربی نشان می‌دهد که رفتار مکانیکی تا نقطه تسلیم زیستی در این دو روش با یکدیگر انطباق دارند. بنابراین، با توجه به اهمیت نقطه تسلیم زیستی و انطباق مدل تجربی و شبیه‌سازی شده، پیش‌بینی رفتار ویسکوالاستیک میوه "به" به کمک شبیه‌سازی معتبر خواهد بود. لازم است گفته شود که انطباق نداشتن تنش‌ها در مدل شبیه‌سازی شده، با توجه به اینکه نقاط شکست در آزمایش تجربی و مدل‌سازی بسیار نزدیک است، در نتایج خطا ایجاد نخواهد کرد.

توزیع تنش عمودی در نمونه میوه "به" مدل‌سازی شده به صورت مکعب در شکل (۴) نشان داده شده است. بیشینه تنش در محل تماس صفحه بارگذاری و در میانه‌های نمونه به مقدار ۰/۵۷ مگا پاسکال به دست آمد. منحنی تنش-کرنش تجربی و مدل‌سازی شده در شکل (۵) آورده شده است. مقایسه منحنی بارگذاری شبیه‌سازی شده



شکل ۴- توزیع تنش عمودی نمونه میوه به شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ANSYS R 18.2

Fig. 4- Vertical stress distribution of the fruit sample simulated in ANSYS R 18.2 software

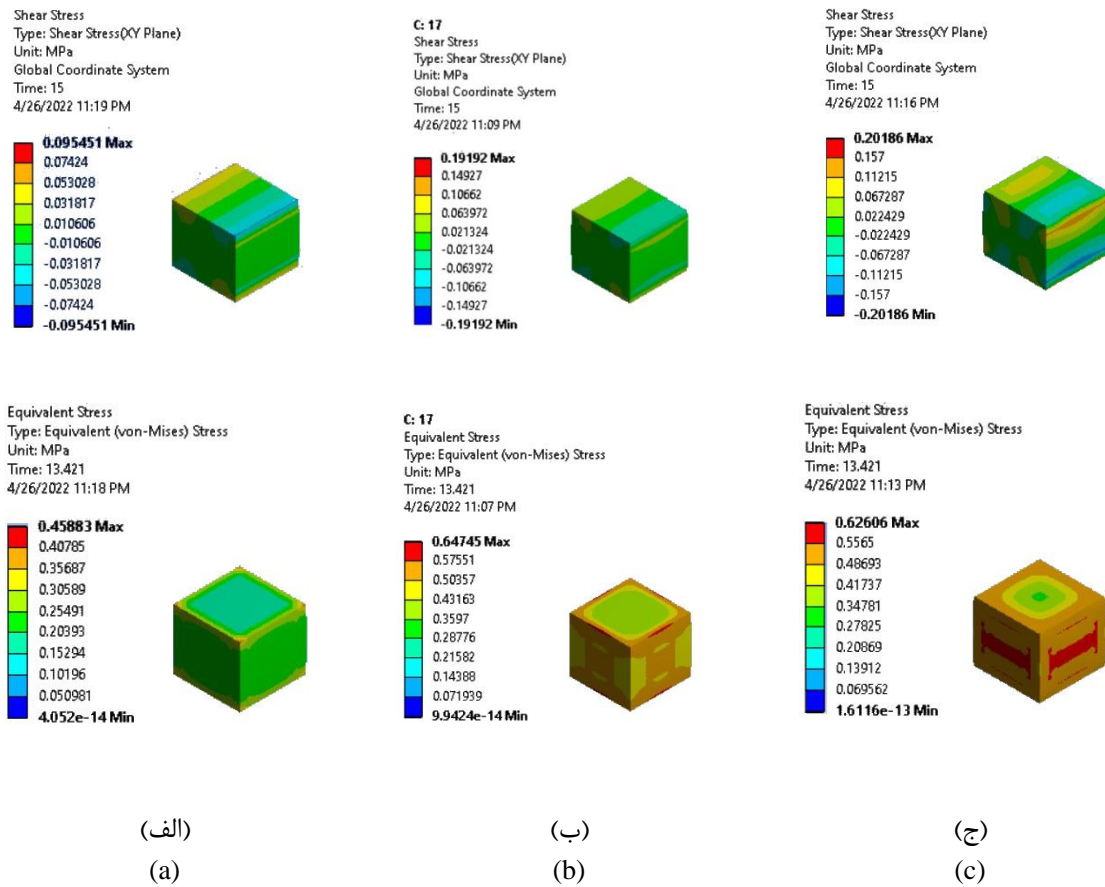


شکل ۵- منحنی تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش تجربی و مدل شبیه سازی شده در نرم افزار ANSYS R 18.2

Fig. 5- The stress-strain curve obtained from the experimental test and the simulated model in ANSYS R 18.2 software

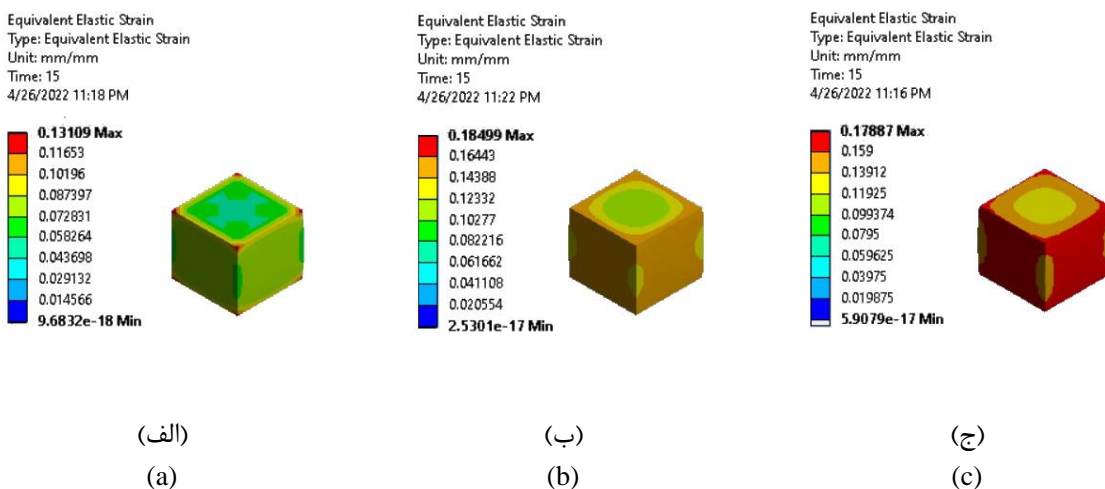
مشخص گردد. نتایج تحقیق نشان می دهد در سرعت های ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی متر بر دقیقه، مقدار کرنش به ترتیب برابر با ۰/۱۳۱، ۰/۱۶۴ و ۰/۱۷۹ میلی متر بر میلی متر است که با توجه به نتایج تنش، نشان دهنده نقطه شکست بالاتر برای نمونه میوه "به" است. نتایج به دست آمده از محاسبه کرنش در سرعت های مختلف در شکل (۷) قابل مشاهده است. ساختار درونی میوه "به" را می توان به شکل اسفنج تشبیه کرد از این رو به دلیل وجود منافذ درون آن و ویژگی های ویسکوالاستیک در سرعت های کمتر در هنگام بارگذاری فرصت خروج آب از منافذ را دارد، از این رو تنش کمتری وارد خواهد شد اما در سرعت های بیشتر به علت خروج سریع تر آب از بافت میوه تنش وارد شده به آن بیشتر است (Stroshine, 2004). از سویی دیگر، در سرعت های بالاتر با توجه به نتایج حاصل از بارگذاری در شکل (۸) تغییرات طول بیشتر است. زمان بارگذاری در سرعت های مختلف اعمال شده یکسان است، با توجه به ارتباط مستقیم تغییرات طول و سرعت بارگذاری، افزایش سرعت منجر به افزایش تغییرات طول شده است. بنابراین، با توجه نکته بیان شده و نیز با توجه به رابطه مستقیم تغییرات طول و کرنش، مقدار کرنش وارد شده نیز افزایش پیدا کرده است.

با توجه به نتایج قابل قبول منحنی تنش-کرنش در سرعت ۱۰ میلی متر بر دقیقه که میزان خطا ۷ درصد بود، و دلیل آن خاصیت بیولوژیک بودن میوه است، نمونه میوه "به" در سرعت های ۵ و ۲۰ میلی متر بر دقیقه نیز شبیه سازی گردید. در این دو سرعت، مقدار تنش عمودی بیشینه وارد به نمونه به ترتیب برابر با ۰/۴۵ و ۰/۶۲ مگا پاسکال و مقدار تنش برشی بیشینه به ترتیب ۰/۰۹۵ و ۰/۲۰۱ مگا پاسکال به دست آمد. نتایج بررسی ها نشان می دهد که در سرعت ۲۰ میلی متر بر دقیقه، در میانه های نمونه بیشینه تنش عمودی و در نزدیک محل تماس نمونه با صفحه بالایی بیشینه تنش برشی وارد می شود و شکست نیز در این نقطه رخ می دهد و بیشترین آسیب وارد به میوه نیز در این سرعت اتفاق می افتد. در سرعت ۵ میلی متر بر دقیقه، بیشینه تنش عمودی و تنش برشی به محل تماس نمونه و صفحه بارگذاری وارد می شود. توزیع تنش های عمودی و برشی در سرعت های گفته شده در شکل (۶) قابل مشاهده است که در سرعت ۲۰ میلی متر بر دقیقه شاهد افزایش تنش معادل وارد به میوه و همچنین در سرعت ۵ میلی متر بر دقیقه شاهد کاهش آن بوده ایم. کرنش نیز در سرعت های یاد شده مورد بررسی قرار گرفت تا نقطه شکست در هر نمونه



شکل ۶- توزیع تنش عمودی و برشی نمونه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ANSYS R 18.2 در سرعت‌های (الف) ۵ میلی‌متر بر دقیقه (ب) ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه (ج) ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه

Fig. 6- Vertical and shear stress distribution of the sample simulated in ANSYS R 18.2 software at speeds a) 5 mm/min b) 10 mm/min c) 20 mm/min



شکل ۸- توزیع کرنش در سرعت‌های (الف) ۵ میلی‌متر بر دقیقه (ب) ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه (ج) ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه در نرم‌افزار

ANSYS R 18.2

Fig. 8- Strain distribution at speeds a) 5 mm/min b) 10 mm/min c) 20 mm/min in the software

می‌گیرد، شکست معمولاً در راستای صفحهٔ بیشینه تنش برشی اتفاق می‌افتد. این الگوی شکست بیانگر آن است که گسیختگی بافت میوه به دلیل تنش‌های برشی اتفاق افتاده است (Diehl *et al.*, 1980).

نتیجه‌گیری

مدل‌سازی فرآیندهای تجربی با توجه به فواید آن بسیار مورد توجه است. شناخت ویژگی‌های مکانیکی محصولات کشاورزی بهبود بخش بسیاری از فعالیت‌های پس از برداشت است که منجر به افزایش کیفیت محصول و کاهش هزینه در اموری از جمله جداسازی، بسته‌بندی و انبارداری می‌شود. پژوهش حاضر به منظور ارائه یک مدل به روش اجزای محدود برای کاهش هزینه و زمان بررسی خواص مکانیکی میوه "به" به انجام رسید. میوه "به" با هدف شناخت ویژگی‌های مکانیکی ابتدا به کمک دستگاه آزمون مواد بررسی شد و پس از آن نمودار تنش-کرنش و نقطهٔ شکست مشخص گردید. به کمک روش اجزای محدود، نتایج شبیه‌سازی در سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه توسط نمودار تنش-کرنش مستخرج از مدل شبیه‌سازی شده با داده‌های تجربی مطابقت داده شد. پس از آن، با استناد به نتایج، دو سرعت ۵ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه نیز به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی گردید. نتایج مدل اجزای محدود نشان داد که تنش عمودی بیشینه برای سرعت‌های مذکور به ترتیب برابر با ۰/۴۵ و ۰/۶۲ مگاپاسکال است، تنش برشی نیز برابر با ۰/۹۵ و ۰/۲۰۱ مگا پاسکال به دست آمد. از سویی دیگر، توزیع کرنش در نمونه‌های مختلف برابر با ۰/۱۳۱ و ۰/۱۷۹ میلی‌متر بر میلی‌متر محاسبه گردید. نتایج به دست آمده و تطابق با داده‌های تجربی با خطای اندک (کمتر از ۷ درصد) نشان داد که مدل‌سازی به روش اجزای محدود می‌تواند در شناخت و بررسی ویژگی‌های مکانیکی میوه "به" در حین بارگذاری طی فرآیندهای مختلف (برداشت، حمل و نقل، بسته‌بندی و انبار کردن این محصولات) مفید باشد و پژوهشگران در این حوزه می‌توانند از نتایج آن استفاده کنند.

قاسمی باغبادرانی و همکاران (Ghasemi *et al.*, 2015) در پژوهشی نتیجه گرفتند که مدل‌سازی اجزای محدود برای میوه "سیب" قابل استناد است و نمودار تنش-کرنش دستگاه آزمون مواد در آزمایشگاه با نتایج شبیه‌سازی ۵ درصد اختلاف دارد و قابل قبول است. این محققان با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه با نتایج روش اجزای محدود، این روش را پیشنهاد و تنش برشی بیشینه را برای میوه "سیب" تعیین کردند. صدنیا و همکاران (Sadrmnia *et al.*, 2008) با مطالعهٔ خواص مکانیکی هندوانه نشان دادند که میوه تحت بارگذاری فشاری در امتداد محورهای طولی و عرضی با اعمال ۱۰ درصد نیروی شکست، به ترتیب ۹۲ نیوتن و ۱۵۲ نیوتن، کوفتگی در میوه رخ می‌دهد. در مطالعه‌ای دیگر، سیدآبادی و همکاران (Seyedabadi *et al.*, 2015) تنش‌های وارد شده به پوست و بافت طالبی را تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند که بافت داخلی با اعمال ۲۰ درصد جابه‌جایی شکست (محور طولی) یا نیروی ۹۰ نیوتن به نقطهٔ تسلیم می‌رسد که این نیرو معادل وزن ۷ طالبی روی یکدیگر است (Sadrmnia *et al.*, 2008). در تحقیق دیگری، تیان و همکاران (Tian *et al.*, 2017) از روش اجزای محدود و دستگاه آزمون مواد برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی میوه "کیوی" استفاده کردند و نشان دادند که نمودار تنش-کرنش دستگاه آزمون مواد و شبیه‌سازی مطابقت دارند و این روش را پیشنهاد دادند. در پژوهشی دیگر شاهقلی و همکاران (Shahgholi *et al.*, 2020) ویژگی‌های مکانیکی غده "سیب‌زمینی" را برای انبارداری بررسی کردند و تست کشش و خزش را روی یک نمونه غده "سیب‌زمینی" اجرا و نتایج را با شبیه‌سازی به روش اجزای محدود مقایسه کردند و نتایج قابل قبولی به دست آوردند. تحقیقات متعددی برای انتخاب معیارهای شکست انواع میوه‌ها و سبزی‌ها صورت گرفته است. به طور کلی نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که شکست در بافت میوه، عمدتاً ناشی از تنش برشی بیشینه است (Chen & Sun, 1984). در آزمایش‌های اجرا شده روی نمونه‌های میوه "به"، نحوهٔ شکست با سرعت بارگذاری در ارتباط مستقیم است و با افزایش سرعت، تنش برشی نیز افزایش یافته است. هنگامی که نمونهٔ میوه تحت فشار تک محوری قرار

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافع تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Ahmadi, E., Barikloo, H., and Kashfi, M. 2016. Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers. *Computers and Electronics in Agriculture*. 121, 1-11 .
- Celik, H. K., Rennie, A. E., and Akinci, I. 2011. Deformation behavior simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering*. 104(2): 293-298 .
- Celik, H. K. 2016. Non-linear FEM based compression simulation of pecan fruit kernels. *Akademik Gıda*. 14(1): 1-7 .
- Chen, P., and Sun, Z. 1984. Critical strain failure criterion: Pros and cons. *Transactions of the ASAE*. 27(1): 278-0281 .
- Chen, P. Y., McKittrick, J., and Meyers, M. A. 2012. Biological materials: Functional adaptations and bio-inspired designs. *Progress in Materials Science*. 57(8): 1492-1704 .
- Diehl, K. C., Hamann, D. D., and Whitfield, J. K. 1980. Structural failure in selected raw fruits and vegetables 1. *Journal of Texture Studies*. 10(4): 371-400.
- Ghasemi, B., Hammet, A., Ghasemi, A., and Rad. A. H. 2015. Viscoelastic modeling of apple under quasi-static loading using the finite element method in order to investigate the causes of bruising. *Journal of Agricultural Machinery* .۳۰۲-۳۱۲ : (۲)۵ .(In Persian).
- Gyasi, S., Fridley, R. B., and Chen, P. 1981. Elastic and viscoelastic Poisson's ratio determination for selected citrus fruits. *Transactions of the ASAE*. 24(3): 747-0750.
- Kabas, O., Celik, H. K., Ozmerzi, A., and Akinci, I. 2008. Drop test simulation of a sample tomato with finite element method. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 88(9): 1537-1541 .
- Li, Z., Li, P., Yang, H., Liu, J., and Xu, Y. 2012. Mechanical properties of tomato exocarp, mesocarp and locular gel tissues. *Journal of Food Engineering*. 111(1): 82-91.
- Mohsenin, N. N. 2020 (eBook published). *Physical Properties of Plant and Animal Materials: V. 1: Physical Characteristics and Mechanical Properties*. Routledge.
- Petrů, M., Novák, O., Herák, D., Mašín, I., Lepšík, P., and Hrabě, P. 2014. Finite element method model of the mechanical behaviour of *Jatropha curcas* L. bulk seeds under compression loading: Study and 2D modelling of the damage to seeds. *Biosystems Engineering*. 127, 50-66.
- Sadrnia, H., Rajabipour, A., Jafari, A., Javadi, A., Mostofi, Y., Kafashan, J., Dintwa, E., and De Baerdemaeker, J. 2008. Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models. *Journal of Food Engineering*. 86(2): 272-280 .

- Seyedabadi, E., Khojastehpour, M., and Sadrnia, H. 2015. Predicting cantaloupe bruising using non-linear finite element method. *International Journal of Food Properties*. 18(9): 2015-2025 .
- Stroshine, R. L. 2004. *Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products*. R. Stroshine.
- Shahgholi, G., Latifi, M., and Jahanbakhshi, A. 2020. Potato creep analysis during storage using experimental measurement and finite element method (FEM). *Journal of Food Process Engineering*. 43(11): e13522.
- Tian, K., Shen, C., Li, X., Huang, J., Chen, Q., and Zhang, B. 2017. Mechanical properties and compression damage simulation by finite element for kiwifruit. *International Agricultural Engineering Journal*. 26(4): 191-201 .
- Topakci, M., Celik, H. K., Canakci, M., Rennie, A., Akinci, I., and Karayel, D. 2010. Deep tillage tool optimization by means of finite element method: Case study for a subsoiler tine. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 8(2): 531-536 .
- Xu, H., Yan, S., Wang, Y., and Liu, M. 2012. Study on the walnut mechanical characteristics and shucking technology based on finite element analysis. In *Computer and Computing Technologies in Agriculture V: 5th IFIP TC 5/SIG 5.1 Conference, CCTA 2011, Beijing, China, October 29-31, 2011, Proceedings, Part II 5* (pp. 577-586). Springer Berlin Heidelberg .
- Yildiz, G., Izli, G., and Aadil, R. M. 2020. Comparison of chemical, physical, and ultrasound treatments on the shelf life of fresh-cut quince fruit (*Cydonia oblonga* Mill.). *Journal of Food Processing and Preservation*. 44(3): e14366.
- Yousefi, S., Farsi, H., and Kheiralipour, K. 2016. Drop test of pear fruit: Experimental measurement and finite element modelling. *Biosystems Engineering*. 147, 17-25.

Original Research

Mechanical Properties of *Quince* Fruit (*Cydonia oblonga*) under Quasi-static Loading using Finite Element Method

Shoaib Gholami, Saeid Minaei*, Alireza Mahdavian, Shafie Rahmati

Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran. Email : minaee@modares.ac.ir

Received: 5 February 2022 Accepted: 10 June 2023
[http://doi: 10.22092/FOODER.2023.357728.1329](http://doi:10.22092/FOODER.2023.357728.1329)

Abstract

Packaging, transportation, and separation of agricultural products are among the processes that cause potential damage, losses, and increased waste, depending on the type of product. Therefore, determining the mechanical strength properties is one of the most important approaches to prevent mechanical damage. Using mechanical tests, such as compression tests, is a common approach to obtain information, but simulation methods can help determine a wider range of information, such as stress and strain distribution patterns in the fruit, at lower cost and higher speed. Quince (*Cydonia oblonga*), which like other fruits is susceptible to mechanical damage, is rich in various compounds such as flavonoids and phenolic acid, which contribute to anti-cancer, anti-inflammatory, anti-allergic, and antimicrobial properties. In this study, to determine the mechanical properties of quince, compression tests were performed on fruit specimens at a rate of 10 mm/min using a materials testing machine and supplemented by simulation using ANSYS software FEM. The results of the experiments and simulations showed that a viscoelastic model adequately describes the behavior of the fruit under quasi-static loading. The simulation results for loading rates of 5 and 20 mm/min showed that the specimen is subjected to higher shear and normal stresses at a rate of 20 mm/min. The minimum of shear and normal stresses is associated with the rate of 5 mm/min. According to the evaluation results, it is better to perform harvesting and post-harvesting of quinces in such a way that lower loading rates (5 mm/min) are applied to avoid losses as much as possible.

Key words: ANSYS, Normal stress, Shear stress, *Cydonia oblonga*, Mechanical properties