

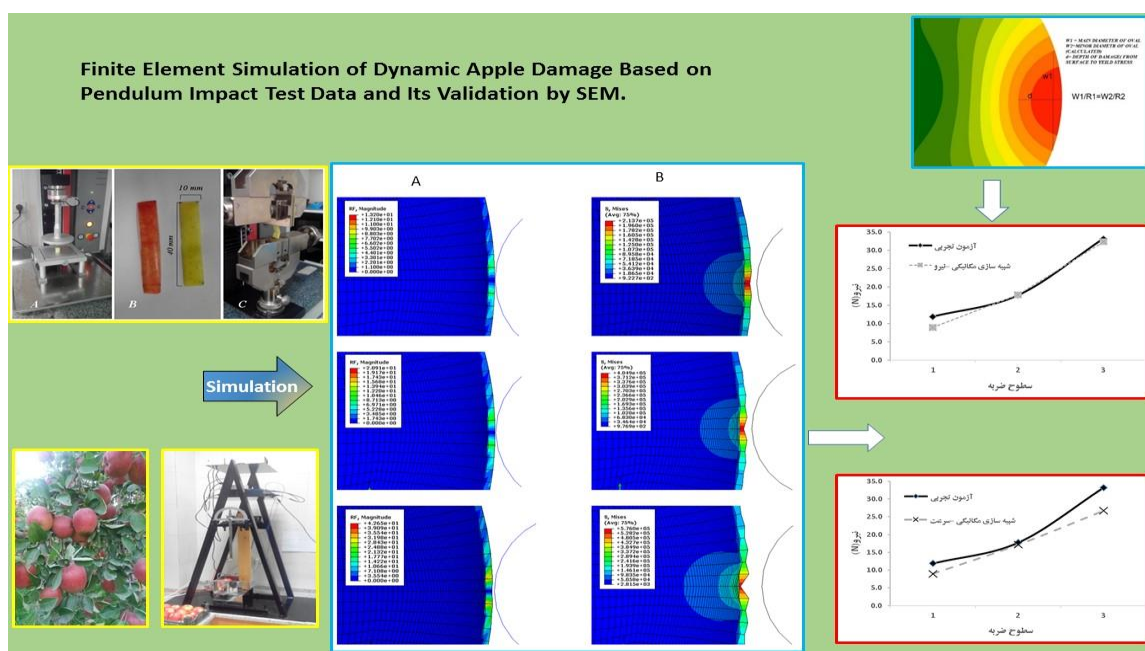
Finite Element Simulation of Dynamic Apple Damage Based on Pendulum Impact Test Data and Its Validation by Scanning Electron Microscopy

Ebrahim Chavoshi¹, Ebrahim Ahmadi^{1*}, Ali Alavi Nia² Rahman Seifi²

1. Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

(Received: March 5, 2022- Revised: Dec. 1, 2022- Accepted: Dec. 19, 2022)



Abstract: Apple fruit is subjected to multiple impact loads during postharvest processes, which leads to injury and bruising. The aim of this study was to simulate the forces and analyze the damage caused to the Red Delicious apple cultivar due to the impact loads, in order to provide solutions for designing appropriate processes and machines. To achieve this goal, the physical and mechanical properties of apples in three parts of skin, flesh and core were determined. In the finite element simulation was defined for the two parts of the flesh and core of the viscoelastic material model and for the skin part of the elastoplastic material model in ABAQUS software. In the loading section of the simulation, the required parameters were defined dynamically and the results of the pendulum impact test were entered into the software in two methods of force-time and velocity-time in 3 impact levels. The results of the two simulation methods were compared. Damage volume was determined using electron microscope images. The results showed that the maximum allowable force in dynamic loading is equal to 20 N and in the simulation method based on force-time data, the bruise volume was 5.9% different from the results of the experimental test and the amount of software output force was 4.76% different from the pendulum test. In the simulation method based on velocity-time data, the bruise volume is 15.97% and the impact force is 13.63% different from the pendulum test. Therefore, the simulation method based on force-time data provides a better estimate than the simulation based on speed-time data.

Keywords: Red Delicious, Viscoelastic, Bruise Volume, Finite Element Simulation, Pendulum Impact Test.

شبیه‌سازی المان محدود صدمات دینامیکی سیب بر اساس داده‌های آزمون ضربه پاندول و اعتبارسنجی آن با میکروسکوپ الکترونی روبشی

ابراهیم چاوشی^۱، ابراهیم احمدی^{۱*}، علی علوی نیا^۲، رحمن سیفی^۲

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان،

ایران.

۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۹/۲۸)

چکیده: میوه سیب در طی فرآیندهای پس از برداشت تحت تاثیر بارهای ضربه‌ای متعددی قرار می‌گیرد که منجر به آسیب و کوفتگی می‌گردد. این مطالعه با هدف شبیه‌سازی نیروها و تحلیل صدمات ایجاد شده در سیب رقم رد دلشز بر اثر اعمال بارهای ضربه‌ای، به منظور ارائه راهکارهایی برای طراحی فرآیندها و تجهیزات مناسب انجام شد. برای رسیدن به این هدف خواص فیزیکی و مکانیکی سیب در سه بخش پوست، گوشت و هسته تعیین گردید. در شبیه‌سازی المان محدود برای دو بخش گوشت و هسته مدل ماده ویسکوالاستیک و برای بخش پوست مدل ماده الاستیک-پلاستیک، در نرم افزار آباکوس تعریف شد. در بخش بارگذاری شبیه‌سازی، پارامترهای مورد نیاز به صورت دینامیکی تعریف شد و نتایج آزمون ضربه پاندول به دو روش نیرو-زمان و سرعت-زمان در ۳ سطح ضربه وارد نرم افزار شد و نتایج دو روش شبیه‌سازی با هم مقایسه شد. حجم آسیب با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی تعیین شد. نتایج نشان داد، حداکثر نیروی مجاز در بارگذاری دینامیکی معادل ۲۰ نیوتن می‌باشد و در روش شبیه‌سازی بر اساس داده‌های نیرو-زمان، حجم کوفتگی ۵/۹ درصد با نتایج آزمون تجربی و مقدار نیروی برخورد خروجی نرم افزار ۴/۷۶ درصد نسبت به آزمون پاندول اختلاف دارد. در روش شبیه‌سازی بر اساس داده‌های سرعت-زمان، حجم کوفتگی ۱۵/۹۷ درصد و مقدار نیروی برخورد ۱۳/۶۳ درصد نسبت به آزمون پاندول اختلاف دارد. بنابراین، روش شبیه‌سازی بر اساس داده‌های نیرو-زمان بر آورد بهتری نسبت به شبیه‌سازی بر اساس داده‌های سرعت-زمان ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: سیب رد دلشز، ویسکوالاستیک، شبیه‌سازی المان محدود، آزمون ضربه پاندول، حجم کوفتگی

مقدمه

سیب یکی از مهمترین محصولات باغی ایران محسوب می‌شود که پس از مرکبات مقام دوم را از نظر میزان تولید در کشور به خود اختصاص داده است. ایران با دارا بودن مقام چهارم جهانی تولید سیب، سهم عمده‌ای در صادرات این محصول داشته و لازم است با افزایش کمیت و کیفیت میوه سیب، جایگاه خود را بین کشورهای تولید و صادرکننده این محصول حفظ نموده و ارتقاء دهد. از مهمترین عوامل مؤثر بر افزایش کمی و کیفی میوه سیب، نگهداری در حین و پس از برداشت به‌منظور کاهش صدمات آن می‌باشد. این محصول در مسیری که از باغ به مراکز فروش طی می‌کند تحت تاثیر عملیاتی چون برداشت، بسته‌بندی، درجه‌بندی، انبار کردن و حمل‌ونقل قرار می‌گیرد. طی این مراحل بارهای استاتیکی و دینامیکی متعددی بر تک‌تک سیب‌ها وارد می‌شود که منجر به آسیب و کوفتگی^۱ می‌گردد (Opara et al., 2014). به اذعان باغداران عمده محلی یکی از دلایل عدم استقبال از محصول صادراتی سیب کشور از طرف مشتریان خارجی، صدمات کوفتگی وارد شده به آنها در طی فرآیندهای پس از برداشت می‌باشد به طوری که علیرغم کیفیت بالای محصول ایرانی از مشتری‌پسندی کمی در بازارهای جهانی برخوردار است. کوفتگی، آسیب وارد شده به بافت سیب است که باعث تغییر رنگ آن می‌شود و معمولاً بدون ایجاد گسیختگی در پوست روی می‌دهد. هنگامی که غشاء سلول‌های بخش بافت دچار صدمه فیزیکی می‌گردد، آسیب وارده سبب مخلوط شدن آنزیم‌ها از سیتوپلاسم با ترکیبات فنلی از واکوئل خواهد شد، این واکنش منجر به قهوه‌ای شدن بافت و به اصطلاح کوفتگی می‌شود (Lewis et al., 2008).

بارگذاری‌های دینامیکی مسبب بیشترین صدمات کوفتگی هستند، زیرا نیروهای دینامیکی مانند ارتعاش

در حین حمل و نقل، از نظر اندازه بزرگتر از نیروهای استاتیکی بوده و میزان فراوانی بروز آنها نیز بیشتر از نیروهای استاتیکی است (Van Zeebroeck, 2006). ضربه یکی از بارهای دینامیکی است که در اثر سقوط بر روی سطوح متفاوت و برخورد با سیب‌های دیگر روی می‌دهد (Lewis et al., 2007). در بسیاری از این موارد آسیب دیدگی به‌واسطه اعمال بارهای ضربه‌ای رخ می‌دهد. یکی از راه‌های اصولی جلوگیری و کاهش صدمات مکانیکی، شناخت دقیق خواص ضربه‌ای محصول تحت شرایط مختلف است که از طریق آزمون‌های ضربه حاصل می‌شود.

به کمک تحلیل رفتار مکانیکی محصولات کشاورزی می‌توان بار مجاز را تعیین کرد و در طراحی ماشین‌های مرتبط با فرایندهای پس از برداشت، آن را مورد استفاده قرار داد. از طرفی تحلیل بارگذاری محصولات کشاورزی و میوه‌ها مسئله نسبتاً پیچیده‌ای است زیرا اولاً بافت‌های متفاوتی در قسمت‌های گوناگون دارند و ثانیاً در بارگذاری‌ها دچار تغییرشکل‌های بزرگ می‌شوند و این باعث می‌شود که مدل هندسی آنها هنگام بارگذاری در حال تغییر باشد. از طرف دیگر طی بارگذاری میوه شرایط مرزی از قبیل سطح تماس میوه مدام در حال تغییر است. همچنین، اگر تنش‌های وارد شده به مواد از حدود استحکام تسلیم آنها بیشتر باشند، تغییرشکل‌ها وارد فاز پلاستیک می‌شوند و در این صورت برگشت‌پذیر نخواهند بود. در حالت کلی نمی‌توان این نوع مسائل را به روش‌های معمول خطی مدل‌سازی کرد و برای حل آنها باید از روش‌های غیرخطی استفاده کرد (Seyedabadi et al., 2015). از طرف دیگر اندازه-گیری تنش‌های ایجاد شده در داخل سیب حین بارگذاری‌های مختلف بسیار مشکل است. روش جایگزین مناسب استفاده از شبیه‌سازی نرم افزاری جهت تخمین تنش‌های داخلی است. شبیه‌سازی نرم

تعیین کرده و این نتایج را در شبیه‌سازی مکانیکی به کار بردند. مقایسه نتایج تجربی و مدل‌سازی شده سیب نشان داد، مدل ویسکوالاستیک رفتار سیب را حین بارگذاری به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. همچنین محل ظهور کوفتگی در بافت سیب آزمایش شده با محل ظهور تنش برشی بیشینه در شبیه‌سازی هم‌خوانی داشت. بنابراین، معیار تنش برشی بیشینه را برای برآورد حساسیت گوشت ارقام سیب به کوفتگی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی پیشنهاد داده شد (Qasemi et al., 2015). در مطالعه‌ای که محققان به منظور پیش‌بینی مدل مناسب برای تخمین کوفتگی سیب انجام دادند، تاثیر پارامترهای سفتی اکوستیک، دما و شعاع انحناء را به عنوان متغیرهای مستقل روی میزان کوفتگی سیب بررسی نمودند. نتایج نشان داد که میزان کوفتگی با متغیرهای دما و شعاع انحناء رابطه مستقیم و با متغیر سفتی اکوستیک رابطه عکس دارد (Ahmadi et al., 2010). همچنین در مطالعه دیگری، تغییر شکل سیب رقم رد دلشیز با آزمون سقوط به روش المان محدود شبیه‌سازی شد و نتایج حاصل همبستگی مناسبی با مدل ارائه شده نشان داد (Celik et al., 2011). در مطالعه‌ای که تحقیق روی شبیه‌سازی لهیدگی موضعی سیب رد دلشیز در اثر اعمال بارهای استاتیکی صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد، تعیین مدل ماده الاستیک در شبیه‌سازی سیب در نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی اختلاف زیادی ایجاد می‌شود ولی با انتخاب مدل ماده الاستوپلاستیک نتایج شبیه‌سازی با آزمون‌های تجربی اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد نخواهد داشت (Sardrnia et al., 2011). در تحقیق دیگری آزمون ضربه پاندول با انتخاب سطوح ضربه ۰/۰۱۱، ۰/۰۴۲ و ۰/۰۹۴ ژول جهت بررسی سطح و حجم کوفتگی سیب انجام شد (Fu et al., 2023).

افزایی توانایی حل مسائل غیرخطی از قبیل تغییر شکل هندسی جسم و چگونگی تماس اجسام را دارد (Sadrnia et al., 2008). روش المان محدود^۱ روشی عددی است که می‌توان آن را برای حل مسائل پیچیده مهندسی و تحلیل تنش‌های وارد به جسم بارگذاری شده استفاده کرد. این روش مورد توجه بسیاری از محققان برای پیش‌بینی رفتار محصولات کشاورزی در مقابل بارهای مکانیکی قرار گرفته است. تحلیل اجزای محدود روشی مناسب برای کاهش اثرات منفی بر محصولات کشاورزی ناشی از ماشین‌های برداشت و پس از برداشت است (Rashvand et al., 2022). در تحقیق دیگری پژوهشگران یک مدل المان محدود قابل اعتماد از سیستم شاخه-ساقه-میوه را برای مطالعات آتی در مورد برداشت سیب از طریق تکان دادن درخت یا برداشت‌کننده‌های خودکار سیب ارائه نمودند (Lingxin Bu et al., 2021). محققانی با این روش تنش‌های وارد شده بر میوه سیب را در حین تحمل نیروی فشاری بین دو صفحه موازی مدل‌سازی کردند (Kim et al., 2008). در یک تحقیق محققان تنش‌های وارد بر گوجه فرنگی در اثر سقوط از ارتفاع مشخص را با روش المان محدود محاسبه کردند (Kabas et al., 2008). در مطالعه دیگری که نتایج شبیه‌سازی المان محدود با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ اعتبارسنجی شد، مشخص گردید حجم آسیب ضربه در شبیه‌سازی حداکثر ۳۲/۲۸ درصد خطا را نشان می‌دهد و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روش قابل اطمینانی برای محاسبه حجم آسیب ضربه را فراهم می‌کند (Nikara et al., 2018).

در پژوهش دیگری محققانی با مدل‌سازی ویسکوالاستیک^۳ سیب به بررسی علل کوفتگی در آن پرداختند. آنها با استفاده از آزمایش‌های تجربی، خواص الاستیک، ویسکوالاستیک و مقاومت برشی سیب را

رد دلشیز^۳ از باغ‌های شهر مهاباد (طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۷ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه) به عنوان قطب تولید و صادرات سیب کشور انتخاب و برداشت سیب به صورت دستی انجام شد. محصول برداشت شده در ظروف مخصوص فوم‌دار در یک طبقه بسته بندی شده و با رعایت شرایط مناسب به آزمایشگاه رئولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی-سینا منتقل گردید. پس از انتقال محصول در سردخانه با دمای ۳ درجه سلسیوس و رطوبت ۸۵ درصد نگهداری شد و کلیه آزمایشات در مدت ۱۰ روز انجام شدند. تعداد نمونه سیب مورد استفاده در تحقیق حاضر در مجموع ۱۲۰ نمونه بود که ۶۰ نمونه در بخش آزمون ضربه، ۲۰ نمونه جهت تعیین سطح انرژی بحرانی، ۲۰ نمونه در تعیین خواص فیزیکی (چگالی و رطوبت)، ۱۰ نمونه در آزمون مکانیکی و ۱۰ نمونه در آزمون رئولوژی به کار گرفته شد.

خواص فیزیکی

مشخصات هندسی و خواص فیزیکی اولیه محصول شامل وزن، ابعاد هندسی، شعاع انحناء، رطوبت و چگالی سیب رقم رد دلشیز در شرایط محیطی آزمایشگاه شد. برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها از ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۱ گرم و برای اندازه‌گیری قطرهای بزرگ، کوچک و متوسط از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. برای اندازه‌گیری شعاع انحنای محصول از دستگاه شعاع‌سنج دیجیتال و روابط (۱) و (۲) استفاده شد. در رابطه (۱) اندازه AC فاصله افقی بین دو فک و BD میزان متغیر می‌باشد. با توجه به اینکه محصول سیب معمولاً کروی کامل نیست، شعاع انحناء در دو جهت قطبی و استوایی در محل ضربه روی میوه تعیین شد و مطابق رابطه (۲) شعاع انحنای معادل به دست آمد (Abedi and Ahmadi, 2014).

میکروسکوپ الکترونی روبشی یک ابزار بسیار بادقت برای بررسی سطوح بافت گیاهی می باشد (Pathan *et al.*, 2010). نمونه بافت طی مراحل تثبیت کردن شیمیایی و خشک کردن بدون آسیب دیدگی ریز ساختار برای مشاهده با میکروسکوپ الکترونی آماده می‌شوند (Karcz *et al.*, 2012). پژوهشگرانی نیز برای آماده‌سازی نمونه نوعی قارچ از روش تثبیت کردن در گلو تار آلدهید^۱ ۲/۵ درصد با بافر فسفات سدیم^۲ ۰/۱ مولار به مدت یک ساعت، آب‌گیری در اتانول و سپس خشک کردن در هگزامتیل‌دی‌سیلازان استفاده نمودند (Berger *et al.*, 2016).

با توجه به موارد مذکور، بررسی صدمات مکانیکی وارد شده به محصولات در طی فرآیندهای پس از برداشت و آگاهی از تغییرات رفتار مکانیکی آنها با استفاده از شبیه‌سازی‌های نرم افزاری و اعتبارسنجی آن با تجهیزات دقیق، منجر به ارائه راهکارهایی برای طراحی فرآیندها و تجهیزات مناسب می‌شود و افزایش کیفیت محصولات کشاورزی را به دنبال خواهد داشت. در این مطالعه از اسید هگزا متیل دی سیلازان (HMDS) در آماده‌سازی نمونه‌های سیب برای تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی استفاده شد و شبیه‌سازی بر اساس ضربه‌های دینامیکی صورت گرفت. هدف از این تحقیق شبیه‌سازی المان محدود دینامیکی سیب رقم رد دلشیز، بر اساس داده‌های مستخرج از آزمون ضربه پاندول و اعتبارسنجی آن با نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌باشد. برای افزایش دقت تحقیق در شبیه‌سازی، خواص سیب در سه بخش پوست، گوشت و هسته به طور جداگانه تعیین و در نرم افزار وارد شده است.

مواد و روش‌ها

تهیه محصول

برای انجام این پژوهش سیب سالم و بدون آسیب رقم

این دستگاه شامل بازویی به طول ۰/۵۸ متر بوده و دارای یک محفظه آلومینیومی شکاف دار برای قرارگیری حسگرها و یک ضربه زن کروی شکل از جنس تفلون (با شعاع انحنای ۱۲/۵ میلی متر) می باشد. یک حسگر نیرو (PCB 208c02, PCB Piezotronics, USA,) و یک حسگر شتاب (PCB 320c33, PCB Piezotronics, USA,) (sensitivity: 10.97 mV/N) و یک حسگر شتاب (sensitivity: 105.2 mV/g) به ضربه زن متصل شده است. به وسیله دستگاه پردازشگر سیگنال (ECON,) (AVANT Lite, model: MI-6004) نیروی برخورد، جابجایی و نرخ جابجایی ضربه زن در طول زمان آزمون ضربه ثبت شد (Abedi and Ahmadi, 2014). به منظور تعیین سطوح ضربه ابتدا انرژی ضربه بحرانی (انرژی ضربه ای که آغاز تغییر شکل پلاستیک است) سیب مورد آزمون مشخص شد. برای مشخص کردن انرژی ضربه بحرانی از روش چند ضربه در یک سطح انرژی (CHMI^۱) در منحنی نیرو- زمان استفاده شد (Barikloo and Ahmadi, 2013). بر این اساس عدم تغییر در منحنی نیرو- زمان در یک انرژی ثابت با تکرارهای ضربه متوالی در یک نقطه روی محصول، بیانگر عدم شروع تغییر شکل پلاستیک یا مشخص نبودن انرژی ضربه بحرانی می باشد. جهت تعیین نقطه تسلیم بیولوژی ابتدا ۲۰ عدد سیب رقم رد دلشیز با اندازه تقریباً یکسان انتخاب شد و پس از انجام آزمون مقدماتی ضربه پاندول، انرژی ضربه بحرانی آن ۰/۰۲۲ ژول به دست آمد. در تحقیقی که روی تحلیل ضربات وارد شده به سیب انجام شد، انرژی ضربه بحرانی برای سیب، ۰/۰۲۴ ژول گزارش شده است (Van Zeebroeck et al., 2006).

در مطالعه اخیر آزمون ضربه در سه سطح ضربه (۰/۰۱۳، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۷۲ ژول) انجام شد. هر سطح ضربه در ۲۰ تکرار و در مجموع ۶۰ آزمون ضربه انجام شد، این سطوح بر اساس نقطه تسلیم بیولوژیکی سیب

$$RADIUS = \frac{(AC)^2}{8(BD)} + \frac{(BD)}{2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$R = \frac{(2R_1R_2)}{(R_1+R_2)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

R : شعاع انحنای معادل (mm) ، R_1 : شعاع انحنای در جهت قطبی (mm) و R_2 : شعاع انحنای در جهت استوایی (mm)

برای اندازه گیری چگالی هر سه بخش سیب (پوست، گوشت و هسته) از روش جابجایی آب و اختلاف جرم نمونه در هوا و داخل آب مطابق رابطه (۳) استفاده شد (Nikara et al., 2020)

(رابطه ۳)

$$\rho = \frac{m_{air}}{(m_{water}) - (m_{container+water})} \times SG_{water}$$

ρ : چگالی نمونه (gr/cm^3)، m_{air} : جرم نمونه (gr)، m_{water} : جرم نمونه در حال غوطه وری در ظرف همراه آب (gr)، $m_{container+water}$: جرم ظرف با آب (gr) و SG_{water} : چگالی آب

برای اندازه گیری رطوبت تر پس از نمونه برداری از محصول سیب و اندازه گیری جرم نمونه در حالت تر و خشک، مطابق رابطه (۴) به دست آمد (Nikara et al., 2020).

$$MC = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100 \quad (\text{رابطه ۴})$$

MC : محتوای رطوبت بر پایه تر، m_w : جرم نمونه تر (gr) و m_d : جرم نمونه خشک (gr)

آزمون ضربه پاندول

آزمون ضربه با استفاده از دستگاه پاندول ضربه انجام شد.

۰/۰۵ نیوتن و سرعت ۲۵ میلی متر بر دقیقه انجام شد، به طوری که فک متحرک در ۲۵ درصد نیروی بیشینه متوقف گردید (ASTM Standards, Alamar, 2008; 2015). داده‌های به دست آمده از این آزمون‌ها به عنوان ورودی‌های لازم در بخش تعریف خواص مکانیکی در شبیه‌سازی المان محدود استفاده شد.

خواص ویسکوالاستیک

برای به دست آوردن خواص ویسکوالاستیک سیب، آزمون رئولوژی نوسانی با استفاده از دستگاه رئومتر فیزیکا Anton Paar مدل MCR 300 مستقر در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، مطابق استاندارد انجام شد (ASTM D4440 Standard, 2015). در این آزمون ۱۰ عدد سیب سالم انتخاب و از هر کدام نمونه‌هایی به شکل مکعب مستطیل به ابعاد $15 \times 15 \times 10$ میلی متر از بخش هسته و گوشت سیب بوسیله کاتر و قالب پلاستیکی مخصوص تهیه شد و نمونه‌ها بوسیله فک مخصوص شیاردار مژرس (مدل PP25/P2) در محدوده فرکانس ۱ تا ۳۰ هرتز مورد آزمون قرار گرفت. مطابق شکل (۱) نتایج این آزمون شامل مدول برشی افت^۳ و ذخیره^۴ قسمت هسته و گوشت سیب در فرکانس‌های مختلف به دست آمد و نمودار حاصل از میانگین نتایج ۱۰ نمونه ترسیم شد. یافته‌های این بخش در تعریف مدل ماده ویسکوالاستیک در نرم افزار شبیه‌سازی المان محدود تعریف شد. بخش پوست به دلیل عدم امکان تهیه نمونه مکعبی قابل آزمون با این روش نیست بنابراین، برای مدل‌سازی بخش پوست مدل الاستوپلاستیک در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی المان محدود

برای انجام شبیه‌سازی المان محدود ضربه، از نرم افزار آباکوس نسخه (ABAQUS, Simulia, 2019) استفاده

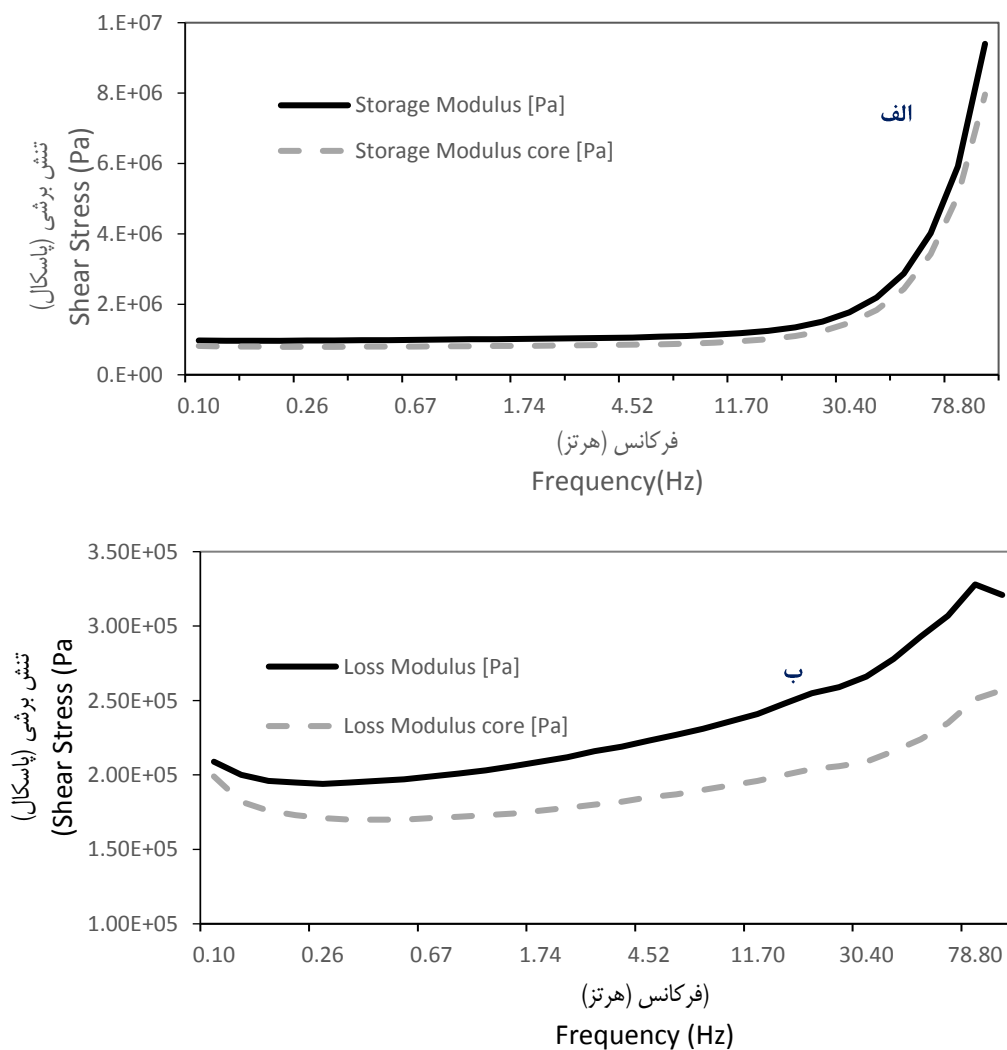
و محدوده انرژی برخورد در مراحل مختلف پس از برداشت انتخاب شدند. به طوری که سطح ضربه اول زیر نقطه تسلیم، سطح دوم در محدوده نقطه تسلیم و سطح سوم بالای نقطه تسلیم بیولوژی هستند. با توجه به مجهز بودن دستگاه پاندول ضربه به نیروسنج، شتاب سنج و انکودر نوری داده‌های آزمون پاندول در قالب دو جدول نیرو-زمان و جدول سرعت-زمان (با استفاده از انکودر نوری) استخراج شدند و به صورت جداگانه در نرم افزار شبیه‌سازی وارد و نتایج شبیه‌سازی در دو حالت ورود داده با هم مقایسه شدند.

خواص مکانیکی

برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی، از دستگاه آزمون مواد بیولوژیکی Zwick/Roell مدل BT1_FR0.5TH.D14 ساخت کشور آلمان، واقع در آزمایشگاه رئولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی استفاده شد. این دستگاه دارای نیروسنج مدل Xforce HP با ظرفیت ۵۰۰ نیوتن با مشخصه ۲ میلی ولت بر ولت می‌باشد. برای به دست آوردن مدول الاستیسیته و تنش تسلیم سه بخش پوست، گوشت و هسته سیب، ۱۰ نمونه سیب سالم انتخاب و از هر سیب نمونه‌هایی از هر سه بخش (پوست، گوشت و هسته) تهیه شد. برای دو بخش هسته و گوشت سیب نمونه مکعب مستطیل به ابعاد $15 \times 10 \times 10$ میلی متری تهیه شد و آزمون فشاری^۱ با مقدار پیش‌نیروی ۰/۱ نیوتن و سرعت ۵۰ میلی متر بر دقیقه انجام شد، به طوری که فک متحرک در ۳۰ درصد نیروی بیشینه متوقف گردد (ASAE standard, 2012). برای تعیین خواص مکانیکی بخش پوست سیب از آزمون کشش^۲ استفاده شد، برای این منظور نمونه‌ای نواری از پوست سیب به طول ۴۰، عرض ۱۰ و ضخامت ۱ میلی متر توسط کاتر مخصوص ۳۰ درجه تهیه شد. آزمون کشش با تنظیمات دستگاه با مقدار پیش‌نیروی

قطر ۱۲/۵ میلی‌متر به صورت صلب ایجاد شد. در ادامه بوسیله پارتیشن بندی (Partitioning) قطعه ایجاد شده برای سیب به سه بخش پوست، گوشت و هسته تقسیم بندی شد تا قابلیت تعریف مدل ماده متفاوت برای سه بخش سیب وجود داشته باشد. مزیت پارتیشن بندی نسبت به تعریف سه قطعه متفاوت برای محصول این است که نیازی به تعریف تماس بین سه قسمت سیب وجود ندارد و تمام سه بخش یک نوع تماس باهم خواهند داشت.

شد. این نرم‌افزار قابلیت انجام شبیه‌سازی دینامیکی به صورت صریح (Explicit) و ضمنی (Implicit) دارد که در این تحقیق شبیه‌سازی دینامیکی بر اساس تئوری مسئله به صورت صریح انجام شد. در مرحله اول شبیه‌سازی سه قطعه اصلی شامل سیب، ضربه‌زن و تکیه‌گاه بر اساس ابعاد تجربی در محیط پارت (Part) آباکوس ایجاد شد، در این مرحله برای شبیه‌سازی سیب از متوسط ابعاد و شعاع انحنای اندازه‌گیری شده ۶۰ عدد سیب استفاده شد و ابعاد تکیه‌گاه به صورت L شکل به اندازه ۱۲۰ میلی‌متر و ضربه‌زن به صورت یک نیم‌دایره به



شکل ۱. الف) نمودار تغییرات مدول ذخیره گوشت و هسته سیب در فرکانس‌های مختلف (منبع: یافته‌های تحقیق)

Figure 1. (A) Storage modulus of flesh and core of apple at different frequencies, (B) Loss modulus of flesh and core of apple at different frequencies

زمانی حل مسئله با انجام تکرارهای مختلف با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه به تعداد ۲۰ گام با نمو^۲ یک، برای حل مسئله در نظر گرفته شد. در مرحله تعریف برهم کنش^۳ تماسها بین ضربه زن با سیب بدون اصطکاک و تماس بین سیب و تکیه گاه به صورت اصطکاکی با ضریب اصطکاک ۰/۲ در نظر گرفته شد. برای تعیین ضریب اصطکاک، آزمایش سطح شیب دار با ۲۰ تکرار سیب روی سطح آلومینیومی (تکیه گاه) شیب دار مطابق استاندارد انجام شد و در نتیجه آن مقدار ضریب اصطکاک سیب با سطح تکیه گاه حدود ۰/۲ به دست آمد. در مرحله ی مش بندی نوع مش مدل CPS4R با تعداد ۹۹۹۶ المان برای سه بخش پوست، گوشت و هسته سیب تعیین شد. در گام نهایی شبیه سازی، تنش بیشینه معیار وان میسرز، نیروی بیشینه عکس العمل و حجم آسیب به عنوان نتایج خروجی مورد نظر تعیین شد.

برای محاسبه حجم آسیب در شبیه سازی از معیار تنش تسلیم به عنوان مبنای مشخص کردن ابعاد آسیب استفاده شد. برای این منظور مطابق شکل ۲ با استفاده از نرم افزار Image J مقادیر W1 (قطر اصلی بیضی) و d (عمق آسیب) در دو جهت عمود برهم اندازه گیری شد. مقدار W2 (قطر فرعی بیضی) نیز با داشتن شعاع انحنای دو جهت استوایی و قطبی با تناسب تعیین شد و در نهایت حجم آسیب با (رابطه ۵) محاسبه شد (Nikara et al., 2020).

میکروسکوپ الکترونیکی روبشی

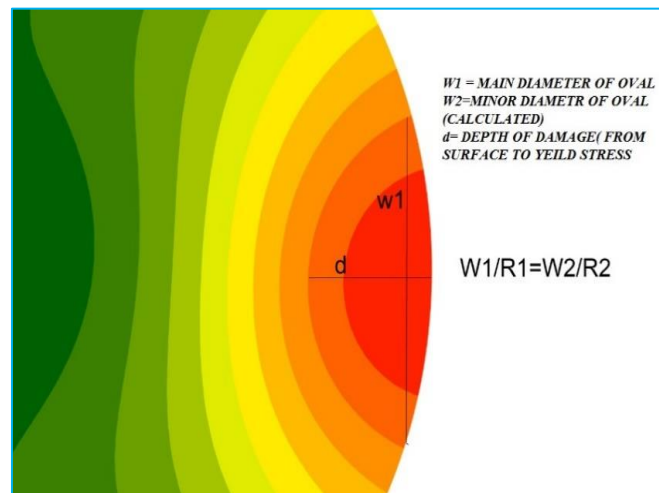
برای بررسی تغییرات ساختار سلول های سالم و آسیب دیده سیب در اثر ضربه و مشخص کردن حجم آسیب از دستگاه میکروسکوپ الکترونیکی Tescan-Vegall ساخت جمهوری چک، مستقر در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، با ولتاژ ۲۰ کیلو ولت و محدوده بزرگنمایی ۲۰ تا ۵۰۰ برابر استفاده شد. نمونه های مورد نیاز در این بخش، از ۳ سطح ضربه (آسیب دیده) و یک

در مرحله بعد مدل و جنس ماده هر کدام از بخش ها انتخاب شد به این ترتیب جنس دو قطعه ضربه زن و تکیه گاه صلب در نظر گرفته شد. مدل ماده سیب در سه بخش مجزا تعریف شد به طوری که خواص مکانیکی پوست سیب مدل ماده الاستوپلاستیک تعریف شد و از داده های چگالی، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، تنش و کرنش تسلیم استفاده شد (Qasemi, 2015). بخش گوشت و هسته سیب، مدل ماده ویسکوالاستیک تعریف شد و از داده های چگالی، مدول الاستیسیته، مدول پواسون و نتایج آزمون رئولوژی شامل مدول افت و مدول ذخیره و مدول بالک افت و مدول بالک ذخیره در فرکانس های مختلف استفاده شد.

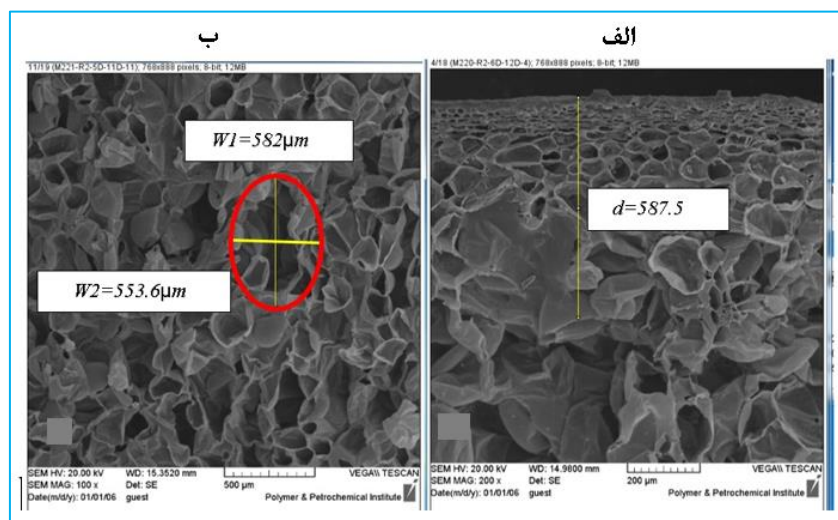
در مرحله چهارم شرایط اولیه، شرایط مرزی و قیدها برای هر سه قطعه تعریف شد؛ بطوریکه تکیه گاه کاملاً ثابت و فاقد جابجایی و چرخش در راستای هر سه محور باشد و نمونه سیب فقط دارای امکان جابجایی در راستای محور X به صورت محوری بوده و دارای محدودیت در چرخش و حرکت در راستای دو محور دیگر باشد. برای تعریف شرایط بارگذاری ضربه در شبیه سازی، از دو حالت مجزا استفاده شد، روش اول شبیه سازی بر اساس داده های نیرو-زمان و روش دوم بر اساس داده های سرعت-زمان تعریف شد. در شبیه سازی بر اساس نیروی برخورد از خروجی نتایج دستگاه پاندول شامل جدول نیرو و زمان به صورت نرمال شده با تعریف حداکثر نیروی برخورد استفاده شد و در روش شبیه سازی بر اساس سرعت برخورد از نتایج خروجی دستگاه پاندول شامل جدول سرعت و زمان استفاده شد و در پایان نتایج آنها با هم مقایسه شدند. لازم به ذکر است در روش شبیه سازی بر اساس سرعت برخورد، سرعت به صورت غیر اجباری^۱ با فاصله ۲۰ میلی متری ضربه زن از نمونه در بخش شرایط اولیه تعریف شد. در مرحله بعد گام های

سوم خشک کردن که در تحقیق حاضر، برای اولین بار از اسید هگزامتیل دی سیلانان برای خشک کردن نمونه‌های سیب استفاده شد. محققان دیگری از اسید HMDS برای خشک کردن بافت محصولات دیگری استفاده کرده‌اند از جمله در پژوهشی برای خشک کردن بافت سیب‌زمینی از اسید HMDS استفاده شد (Nikara et al., 2018). مرحله چهارم رسانایی با طلاکوبی روی همه ۲۴ نمونه انجام شد (Singh et al., 2014). مطابق شکل (۳) تصاویر حاصل توسط نرم افزار Image J مورد بررسی قرار گرفت.

سطح شاهد (نمونه سالم) و هر کدام در ۳ تکرار برش سطحی و ۳ تکرار برش عمقی، در مجموع شامل ۲۴ نمونه تهیه شد. برای این منظور نمونه‌هایی از سیب‌های سالم و آسیب دیده سیب به ابعاد $10 \times 10 \times 1$ میلی‌متر دقیقاً در محل ضربه در زیر پوست به صورت عمقی و سطحی بوسیله کاتر تهیه شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت تصویربرداری میکروسکوپی از روش استاندارد آماده‌سازی نمونه‌های زیستی استفاده شد. بر اساس این استاندارد مراحل آماده‌سازی نمونه شامل مرحله اول تثبیت با گلو تار آلدهید، مرحله دوم آبگیری با درصدهای مختلف اتانول (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۱۰۰ درصد)، مرحله



شکل ۲. اندازه‌گیری قطر اصلی، قطر فرعی و عمق ناحیه آسیب در شبیه‌سازی المان محدود به منظور محاسبه حجم کوفتگی سیب رقم رد دلشیز
Figure 2. Measuring the main diameter, minor diameter and depth of the damage area in FEM simulation in order to calculate the bruise volume of Red Delicious apple



شکل ۳. اندازه‌گیری ابعاد محل آسیب ضربه از روی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای محاسبه حجم آسیب: (الف) تصویر عمقی، (ب) تصویر سطحی
Figure 3. Measuring the dimensions of the impact bruise site from SEM images to calculate the bruise volume: (A) depth image, (B) surface image

انرژی کل ضربه سه سطح نیز به ترتیب، ۱۲/۹ ، ۲۵/۲ و ۷۳/۲ میلی ژول محاسبه شد. بر اساس داده‌های سرعت برگشتی بوسیله انکودر نوری درصد انرژی جذب شده در همه سطوح ضربه محاسبه شد که تقریباً معادل دو سوم انرژی کل بود و حدود یک سوم انرژی کل نیز به صورت انرژی الاستیک در ریپاند قابل مشاهده بود.

نتایج آزمون ضربه پاندول در جدول نیرو-زمان نشان داد، نیروی برخورد در ابتدا با کمترین مقدار شروع شده و روند صعودی با نرخ تغییرات متفاوت دارد. دلیل تغییرات این منحنی نیرو-زمان متفاوت بودن ساختار عمقی سیب از پوست تا گوشت سیب می‌باشد، به طوری که در تمام سطوح ضربه در ابتدای ضربه به دلیل وجود پوست مقدار نیرو به سرعت افزایش یافته و پس از آن نیرو کاهش می‌یابد. نتایج آزمون ضربه پاندول در جدول سرعت-زمان نشان داد، مقادیر سرعت در لحظه آغاز برخورد بیشترین مقدار را داشته و تا انتهای زمان برخورد روند کاهشی دارد.

از داده‌های جدول نیرو-زمان و سرعت-زمان آزمون ضربه پاندول به‌عنوان ورودی بارگذاری ضربه‌ای در شبیه‌سازی المان محدود استفاده شد. به این صورت که مقدار نیروی ثبت شده بوسیله حسگر نیروسنج در طی آزمون ضربه پاندول از صفر تا حداکثر نیرو و سرعت ثبت شده بوسیله انکودر نوری در مرحله رفت آزمون ضربه، در هر یک از سطوح ضربه در مرحله بارگذاری نرم افزار وارد شد.

نتایج خواص مکانیکی

نتایج آزمون‌های مکانیکی انجام شده روی سه بخش پوست، گوشت و هسته سیب رد دلشیز در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد، بیشترین مقدار مدول الاستیسیته سیب رد دلشیز در بخش پوست بوده و معادل ۵/۰۵ مگاپاسکال است. مدول الاستیسیته بخش گوشت سیب معادل ۱/۵۹ مگاپاسکال و بخش هسته سیب برابر با ۱/۶۲ مگاپاسکال است. مقدار تنش

حجم آسیب ضربه با استفاده از ابعاد اندازه‌گیری از تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از نمونه‌های سطحی و عمقی، تعیین شد. آسیب ضربه به صورت حجم ساختار سلول‌های آسیب دیده در محل ضربه روی سیب، بر اساس روش به‌کار رفته توسط محققین (Lu, et al., 2010) و مطابق رابطه (۵) محاسبه شد.

$$VD = \frac{\pi d}{24} (3w_1w_2 + 4d^2) \quad (\text{رابطه ۵})$$

d : عمق آسیب (μm) ، w_1 : عرض اصلی آسیب (μm) ، w_2 : عرض فرعی آسیب (μm) و VD : آسیب ضربه (μm^3)

نتایج و بحث

نتایج خواص فیزیکی

چگالی پوست، گوشت و هسته سیب رد دلشیز به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۸۴ و ۰/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمد. برای محاسبه چگالی کل سیب از میانگین وزنی اجزای سیب و درصد وزن هر جزء استفاده شد و مقدار آن ۰/۸۷ گرم بر سانتی‌متر محاسبه شد. جرم متوسط نمونه‌های سیب ۱۴۰/۴ گرم، حجم متوسط ۱۵۶/۲۵ سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد و میانگین قطر بزرگ، متوسط و کوچک سیب به ترتیب ۶۷/۶۲، ۶۶/۳۶ و ۶۲/۷۱ میلی‌متر به‌دست آمد.

نتایج آزمون ضربه پاندول

نتایج آزمون ضربه پاندول در سه سطح ضربه شامل زیر نقطه تسلیم بیولوژی سیب، در محدوده نقطه تسلیم بیولوژی و بالای نقطه تسلیم بیولوژی به‌دست آمد. آزمون ضربه در هر سطح، روی ۲۰ نمونه تکرار و به طور میانگین برای سطح اول ضربه نیرویی معادل ۱۳/۵۹ نیوتن، سطح دوم ۲۰/۵۴ نیوتن و سطح سوم معادل ۳۸/۹۱ نیوتن ثبت شد. حداکثر سرعت در لحظه برخورد ضربه‌زن بوسیله دستگاه انکودر نوری برای سه سطح، به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۳۵ و ۰/۵۹ متر بر ثانیه به‌دست آمد.

سه الی چهار برابر بیشتر از گوشت سیب مقاومت کرده و از گسیختگی پوست سیب جلوگیری نماید، این موضوع می‌تواند عامل کوفتگی زیر پوستی سیب را بدون آسیب دیدن پوست در برابر بارهای دینامیکی توجیه نماید. تنش تسلیم سیب در نتایج یک تحقیق به روش آزمون سقوط معادل ۰/۳۹ مگاپاسکال گزارش شد (Celik et al., 2021).

تسلیم سه بخش سیب مشابه مدول الاستیسیته است به طوری که، بیشترین مقدار تنش تسلیم در پوست سیب معادل ۰/۸۵ مگاپاسکال و کمترین مقدار تنش تسلیم در گوشت سیب معادل ۰/۲۱ مگاپاسکال است. نکته قابل ملاحظه در بالا بودن تنش تسلیم پوست سیب نسبت به گوشت سیب است، که باعث می‌شود پوست سیب در مقابل بارهای استاتیکی و دینامیکی تا حدود

جدول ۱. خواص مکانیکی پوست، گوشت و هسته سیب رقم رد دلشیز (در رطوبت اولیه ۸۵ درصد)

Table 1. Mechanical properties of skin, flesh and apple core of Red Delicious cultivar (in 85% initial moisture)

بخش	تنش تسلیم (MPa)	نسبت پواسون*	مدول الاستیسیته (MPa)
پوست	۰/۸۵	۰/۳۵	۵/۰۵
گوشت	۰/۲۱	۰/۳۵	۱/۵۹
هسته	۰/۲۵	۰/۳۵	۱/۶۲

* (Dintwa et al., 2008)

برخورد (عکس العمل) نمونه مدل شده در مقابل ضربه بودند که با پارامترهای معادل در آزمون تجربی شامل حجم آسیب و حداکثر نیروی برخورد ضربه مقایسه شدند.

نتایج شبیه‌سازی بر اساس داده‌های نیرو-زمان (روش اول) در جدول (۲) مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی آمده است. پارامترهای خروجی شبیه‌سازی شامل حداکثر تنش وان میسز، حجم آسیب و حداکثر نیروی

جدول ۲. مقایسه نتایج آزمون تجربی ضربه پاندول با نتایج شبیه‌سازی المان محدود بر اساس داده‌های نیرو-زمان

Table 2. Comparison results of the experimental pendulum impact test with the results of the FEM simulation based on force-time data.

درصد اختلاف	نتایج شبیه‌سازی			نتایج تجربی			
	نیروی حجم آسیب (%)	حجم آسیب در شبیه‌سازی (mm ³)	حداکثر تنش وان میسز (MPa)	حداکثر نیروی برخورد خروجی (N)	حداکثر نیروی ورودی (N)	حجم آسیب بر اساس تصاویر sem (mm ³)	سطوح ضربه
۰	۲/۸۷	۰	۰/۲۱	۱۳/۲۰	۱۳/۵۹	۰	سطح اول
۳/۵۵	۱/۸	۴۸/۳۴	۰/۴۱	۲۰/۹۱	۲۰/۵۴	۴۶/۶۸	سطح دوم
۸/۲۵	۹/۶۱	۲۱۸/۶۱	۰/۵۸	۴۲/۶۵	۳۸/۹۱	۲۰۱/۹۵	سطح سوم

بارگذاری استاتیکی در تحقیقی که روی سیب رقم رد دلشیز ۳۲ نیوتن گزارش شده بود (Sardrnia et al., 2011). در مطالعه دیگری که محققین با استفاده از تجهیزات فشار تماسی مافوق صوت، مقدار مجاز بار استاتیکی وارد شده به سیب را ۳۵ نیوتن گزارش کردند (Lewis et al., 2008). در تحقیق دیگری محققین به بررسی پارامترهای موثر بر کوفتگی سیب پرداختند و

براساس نتایج جدول (۲) مشخص می‌شود مقدار نیروی برخورد در خروجی نرم‌افزار شبیه‌سازی نسبت به آزمون تجربی، در سطح اول ضربه ۲/۸۷ درصد، سطح دوم ضربه ۱/۸ درصد و سطح سوم ضربه ۹/۶۱ درصد و به طور متوسط ۴/۷۶ درصد اختلاف دارد. در این مطالعه مقدار حداکثر نیروی مجاز در بارگذاری دینامیکی ۲۰/۵۴ نیوتن بدست آمد. مقدار حداکثر نیروی مجاز در

نیرو-زمان نشان می‌دهد، بیشینه تنش وان میسر ایجاد شده در سطوح سه‌گانه ضربه به ترتیب، ۰/۲۱، ۰/۴۱ و ۰/۵۸ مگاپاسکال بدست آمد. با مقایسه این مقادیر با تنش تسلیم آزمون مکانیکی سیب (جدول ۱) مشخص می‌شود، تنش ایجاد شده در شبیه‌سازی در سطح ضربه اول کمتر از تنش تسلیم، در سطح ضربه دوم در محدوده تنش تسلیم و در سطح ضربه سوم کاملاً باعث عبور از حد تنش تسلیم سیب رد دلشز شده است که این نتایج با سطوح ضربه تعریف شده در آزمون تجربی مطابقت دارد. لازم به ذکر است با توجه به اینکه تنش تسلیم پوست سیب ۰/۸۵ مگاپاسکال است، تنش ایجاد شده در سطح ضربه سوم (۰/۵۸ مگاپاسکال) پوست سیب را تسلیم نکرده است ولی بافت گوشت سیب کاملاً تسلیم شده است، این موضوع با تصاویر SEM مطابقت داشته و آسیب وارد شده به بافت گوشت سیب در سطح ضربه سوم در این تصاویر قابل مشاهده بود. این نتیجه کوفتگی زیر پوستی سیب (بدون گسیختگی پوست) را کاملاً قابل توجیه می‌کند.

در شکل (۴-ب) حداکثر نیروی برخورد شبیه-سازی در بخش خروجی نرم افزار (با عنوان نیروی عکس العمل) در روش اول به ترتیب ۱۳/۲۰، ۲۰/۹۱ و ۴۲/۶۵ نیوتن به دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد، انتخاب مدل ماده ویسکو الاستیک، شرایط اولیه، شرایط مرزی و بارگذاری تعریف شده در نرم‌افزار به طور مناسبی انجام شده و داده‌ها یا آزمون تجربی همبستگی بالایی ($r^2=0/99$) دارد.

نتایج شبیه‌سازی بر اساس داده‌های سرعت-زمان (روش دوم) در جدول (۳) نتایج مقادیر حداکثر نیروی برخورد و حجم کوفتگی در آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی بر اساس داده‌های سرعت-زمان آورده شده است.

نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد مقدار حداکثر نیروی برخورد در خروجی نرم افزار شبیه‌سازی با مقدار نیروی آزمون تجربی در سطح ضربه اول ۹/۵۶ درصد،

گزارش کردند نیروهای فشاری ۲۲/۲، ۴۴/۵ و ۶۶/۷ نیوتن، به ترتیب باعث ایجاد آسیب دیدگی جزئی، متوسط و شدید در سیب می‌گردد (Toivonen et al., 2007). در تحقیق دیگری نیروی ضربه بحرانی آسیب هویج در شبیه سازی و آزمون تجربی ضربه پاندول به ترتیب ۴۵/۲ و ۴۳/۱ نیوتن گزارش شد (Xudong et al., 2021). با مقایسه نتایج سایر محققان با تحقیق اخیر، مشخص می‌شود در صورت وارد شدن نیرو به شکل دینامیکی (به دلیل ضربه‌ای بودن) باعث ایجاد کوفتگی بیشتری در سیب می‌شود، بنابراین مقدار مجاز نیروی وارد شده در بارگذاری دینامیکی تا حدودی کمتر از بارگذاری استاتیکی است.

در ادامه با مقایسه نتایج حجم آسیب کوفتگی ایجاد شده در شبیه‌سازی، نسبت به آزمون تجربی در سطوح اول، دوم و سوم ضربه به ترتیب صفر درصد، ۳/۵۵ درصد و ۸/۲۵ درصد اختلاف مشاهده شد. برای محاسبه اختلاف حجم آسیب در شبیه‌سازی نسبت به حجم آسیب تجربی از رابطه (۶) استفاده شد و متوسط اختلاف بین حجم آسیب محاسبه شده در شبیه‌سازی بر اساس داده‌های نیرو-زمان و آزمون تجربی ۵/۹ درصد به دست آمد.

$$e = \frac{|V_{exp} - V_{FEM}|}{|V_{exp}|} \times 100 \quad (\text{رابطه ۶})$$

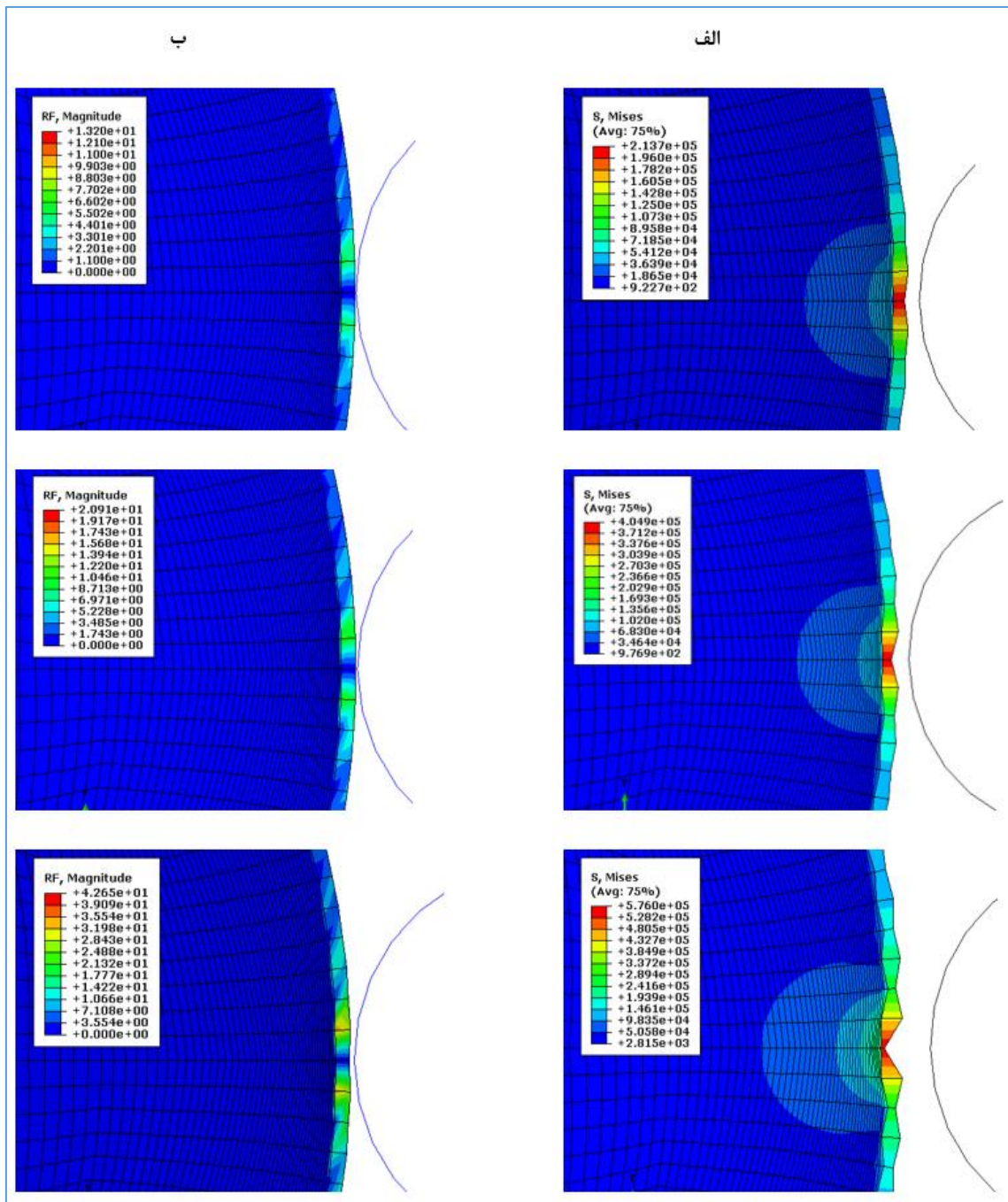
V_{exp} : نیروی برخورد به دست آمده از آزمون تجربی (mm)

V_{FEM} : نیروی برخورد به دست آمده از شبیه‌سازی (mm) در مطالعه‌ای که در آن نتایج شبیه‌سازی المان محدود با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اعتبارسنجی شد، مشخص گردید حجم آسیب ضربه در شبیه‌سازی ۳۲/۲۸ درصد خطا را نشان می‌دهد (Nikara et al., 2018).

در شکل (۴) نتایج خروجی شبیه‌سازی در روش

در شکل (۵) به‌طور کلی مراحل برخورد در شبیه‌سازی بر اساس داده‌های سرعت-زمان نمایش داده شده است. شکل (۵-ج) مرحله پس از برخورد نشان می‌دهد، نکته قابل توجه در این شکل عکس‌العمل تکیه‌گاه مقابل محل ضربه است که تقریباً معادل نصف حداکثر تنش ایجاد شده در محل ضربه است.

در سطح ضربه دوم ۱۴/۹۹ درصد و در سطح ضربه سوم ۱۶/۳۵ درصد اختلاف دارد و به‌طور متوسط اختلاف نیروی شبیه‌سازی و آزمون ضربه پاندول معادل ۱۳/۶۳ درصد است. همچنین مقایسه مقادیر حجم آسیب در آزمون تجربی و نتایج شبیه‌سازی در روش دوم معادل ۱۵/۹۷ درصد اختلاف را نشان می‌دهد.



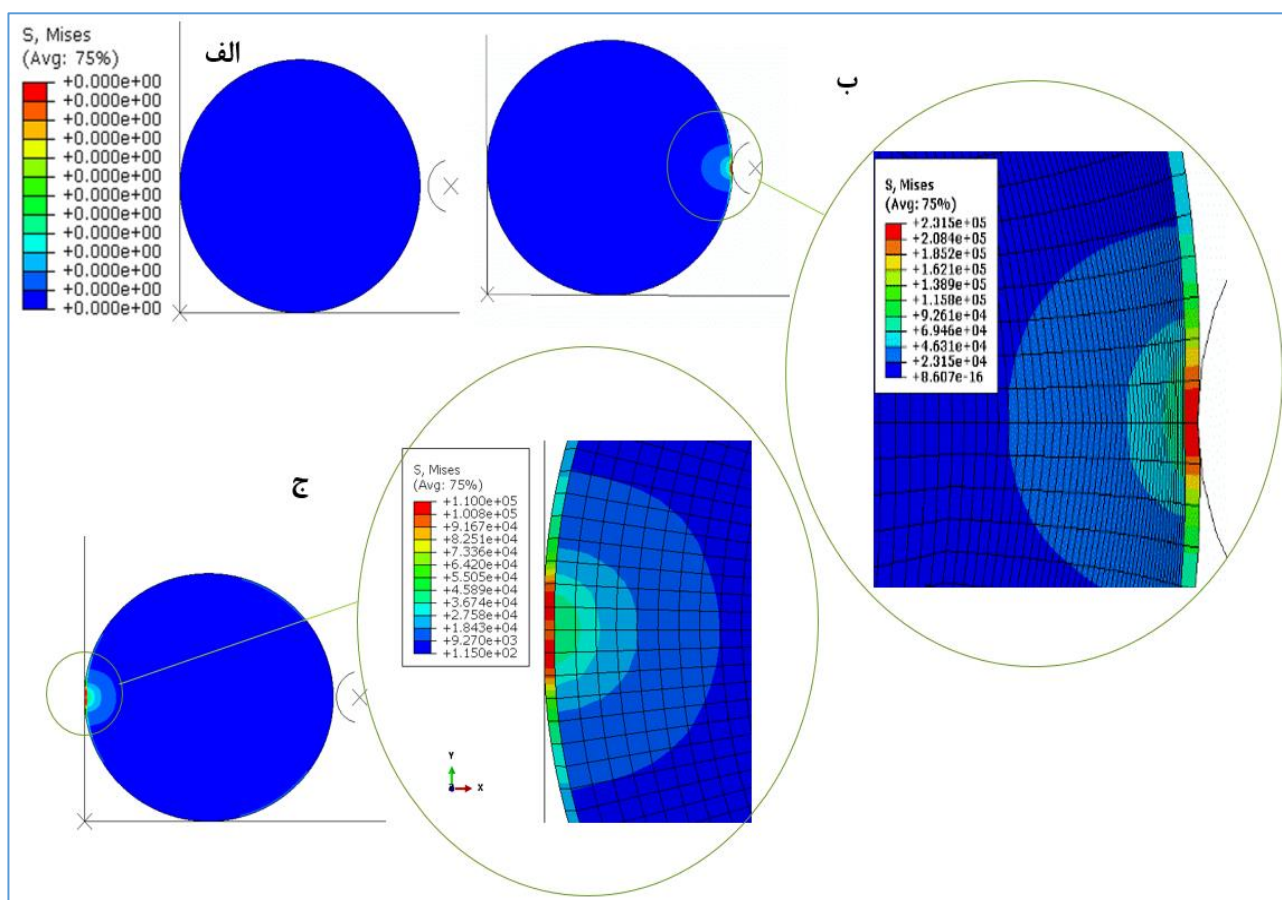
شکل ۴. نتایج شبیه‌سازی المان محدود سیب رقم رد دلشیز بر اساس داده‌های نیرو-زمان در ۳ سطح ضربه، الف) تنش بیشینه بر مبنای معیار وان‌میسز (MPa) و ب) نیروی برخورد (N) (منبع: یافته‌های تحقیق)

Figure 4. The results of FEM simulation of Red Delicious apple based on force-time data in 3 impact levels, A) Maximum stress based on von Mises criterion (MPa) and B) Impact force (N)

جدول ۳. مقایسه نتایج آزمون تجربی ضربه پاندول با نتایج شبیه سازی المان محدود انجام شده بر اساس داده های سرعت-زمان

Table 3. Comparison results of the experimental pendulum impact test with the results of the FEM simulation based on velocity-time data

درصد اختلاف		نتایج شبیه سازی			نتایج تجربی		سطوح ضربه
حجم آسیب	نیرو	حجم آسیب در شبیه سازی (mm ³)	حداکثر تنش وان میسز (MPa)	حداکثر نیروی برخورد خروجی (N)	حجم آسیب بر اساس تصاویر sem (mm ³)	حداکثر نیروی ورودی (N)	
۰	۹/۵۶	۰	۰/۱۸	۱۴/۸۹	۰	۱۳/۵۹	سطح اول
۱۵/۵۴	۱۴/۹۹	۵۳/۹۴	۰/۳۵	۲۳/۶۲	۴۶/۶۸	۲۰/۵۴	سطح دوم
۱۶/۳۹	۱۶/۳۵	۱۶۸/۸۳	۰/۵۱	۳۲/۵۵	۲۰۱/۹۵	۳۸/۹۱	سطح سوم

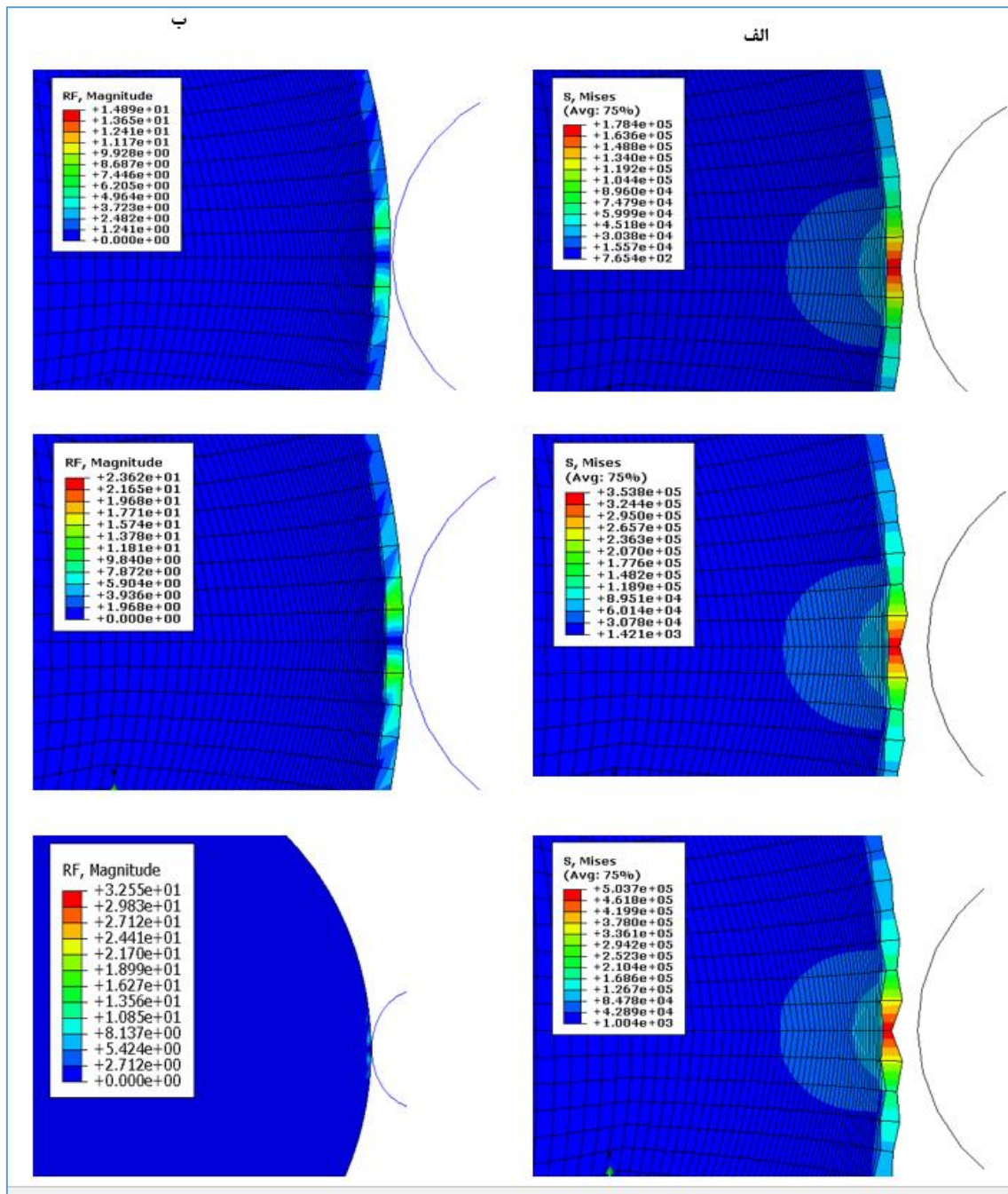


شکل ۵. مراحل شبیه سازی المان محدود سیب رقم رد دلشیز بر اساس داده های سرعت-زمان الف) قبل از برخورد ، ب) لحظه برخورد و ج) بعد از برخورد (منبع: یافته های تحقیق)

Figure 5. FEM simulation steps of Red Delicious apple based on velocity-time data (A) before Impact, (B) Impact moment and (C) after Impact

در شکل (۶-الف) نشان می دهد، حداکثر تنش وان میسز در سطوح ضربه اول، دوم و سوم به ترتیب ۰/۰۴ مگاپاسکال (۱۶ درصد)، ۰/۵۱ مگاپاسکال (۱۲/۶ درصد) و ۰/۰۷ مگاپاسکال (۱۲/۷ درصد) در دو روش با هم اختلاف دارند.

در شکل (۶-الف و ب) به ترتیب نتایج تنش بیشینه بر اساس معیار وان میسز و نیروی برخورد در شبیه سازی مکانیکی بر اساس داده های سرعت-زمان ارائه شده است. مقایسه نتایج تنش بیشینه وان میسز در شبیه سازی بر اساس داده های نیرو-زمان (شکل ۵-الف) و سرعت-زمان

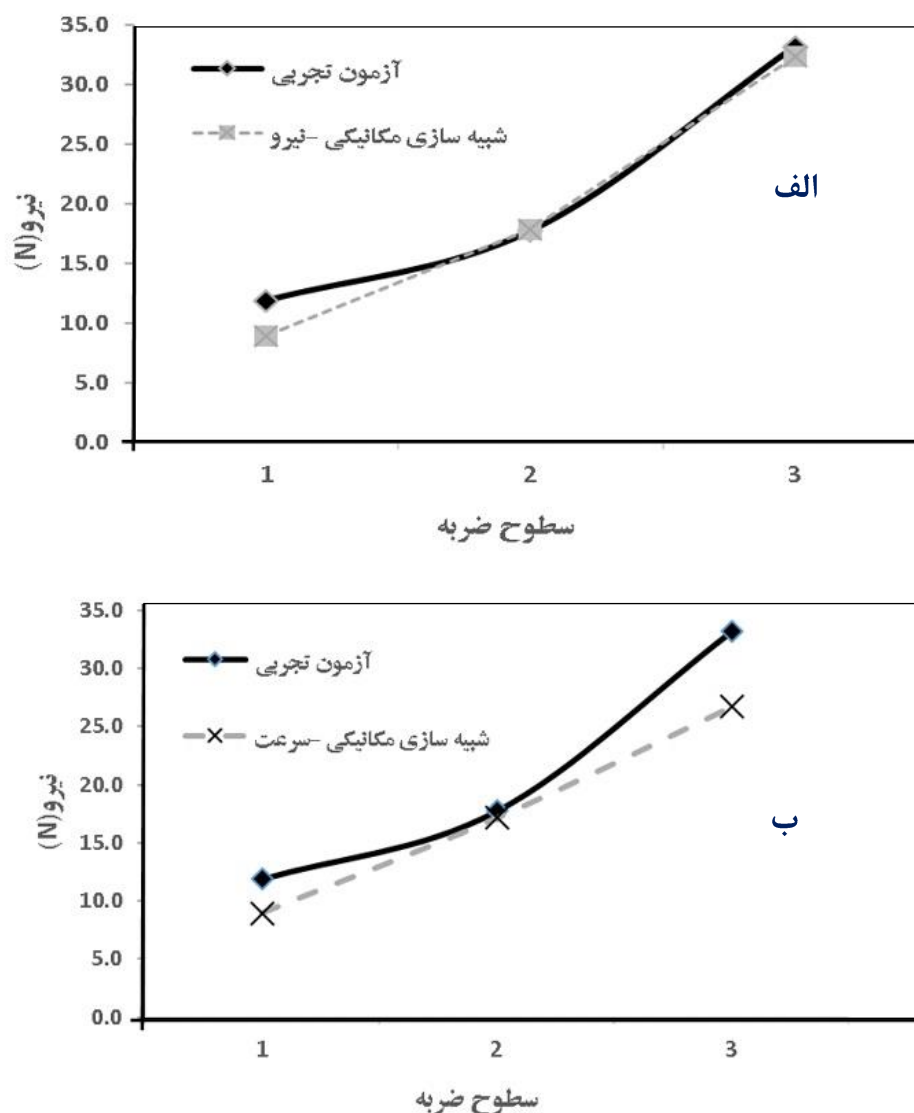


شکل ۴. نتایج شبیه‌سازی المان محدود سیب رقم رد دلشیز بر اساس داده‌های سرعت-زمان در ۳ سطح ضربه، الف) تنش بیشینه بر مبنای معیار وان‌میسز (MPa) و ب) نیروی برخورد (N) (منبع: یافته‌های تحقیق)

Figure 4. The results of FEM simulation of Red Delicious apple based on velocity-time data in 3 impact levels, A) Maximum stress based on von Mises criterion (MPa) and B) Impact force (N)

داده‌های نیرو-زمان (شکل ۷-الف) و داده‌های سرعت-زمان (شکل ۷-ب) نشان داده شده است. بررسی نتایج این نمودارها نشان داد نتایج شبیه‌سازی بر اساس داده‌های نیرو-زمان در این بخش نیز با نتایج آزمون تجربی همبستگی بیشتری دارد.

در همه سطوح نتایج حجم آسیب، نیروی عکس‌العمل و تنش بیشینه در شبیه‌سازی با روش داده‌های نیرو-زمان به داده‌های آزمون‌های تجربی نزدیکتر است. نمودار مقایسه مقادیر نیروی ثبت شده در آزمون تجربی ضربه پاندول و شبیه‌سازی مکانیکی بر اساس



شکل ۷. نمودار مقایسه مقادیر نیرو در آزمون تجربی و شبیه سازی مکانیکی (الف) شبیه سازی بر اساس داده های نیرو-زمان (روش اول).

(ب) شبیه سازی بر اساس داده های سرعت-زمان (روش دوم) (منبع: یافته های تحقیق)

Figure 7. Comparison diagram of force values in experimental test and mechanical simulation, (A) Simulation based on force-time data (first method) and B) Simulation based on Velocity-time data (second method)

۴/۷۶ درصد نسبت به آزمون پاندول اختلاف دارد. همچنین مشخص شد در روش شبیه سازی بر اساس داده های سرعت-زمان، حجم کوفتگی ۱۵/۹۷ درصد با حجم کوفتگی در نتایج آزمون تجربی (SEM) و مقدار نیروی برخورد ۱۳/۶۳ درصد نسبت به نیروی آزمون پاندول اختلاف دارد. روش شبیه سازی بر اساس داده های نیرو-زمان بر آورد بهتری نسبت به روش شبیه سازی بر اساس داده های سرعت-زمان ارائه می دهد.

نتیجه گیری نهایی

در این تحقیق که با هدف شبیه سازی المان محدود صدمات دینامیکی سیب رقم رد دلشیز به دو روش ورود داده انجام شد نتایج مهم تحقیق نشان داد، حداکثر نیروی مجاز در بارگذاری دینامیکی معادل ۲۰ نیوتن می باشد. در روش شبیه سازی بر اساس داده های نیرو-زمان، حجم آسیب کوفتگی ۵/۹ درصد با حجم کوفتگی در نتایج آزمون تجربی (SEM) و مقدار نیروی برخورد

REFERENCES

- Abedi, Gh., & Ahmadi, E. (2014). Impact and fruit properties affect 'red delicious' apple susceptibility to bruising, *International Journal of Fruit Science*, 5: 1-17. <https://doi.org/10.1017/S0021859613000038>
- Ahmadi, E., Ghassemzadeh, H.R., Sadeghi, M., Moghaddam, M. & Zarifneshat, S. (2010). The effect of impact and fruit properties on the bruising of peach. *Journal of Food Engineering*, 97: 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.09.024>.
- Alamar, M.C., Vanstreels, E., Oey, M.L., Molto, E. & Nicolai, B.M. (2008). Micromechanical behavior of apple tissue in tensile and compression tests: storage conditions and cultivar effect. *Journal of Food Engineering*, 86: 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.012>.
- ASAE standard (2012). Compression Test of Food Materials of Convex Shape. *ASAE*, S368.4 DEC2000.
- ASTM D4440 (2015). Standard Test Method for Plastics: Dynamic Mechanical Properties Melt Rheology.
- ASTM Standard (2015). Standard Test Method for Wound Closure Strength of Tissue Adhesives and Sealants, *ASTM F2458- 05*.
- Barikloo, H., & Ahmadi, E. (2013). Dynamic Properties of Golden Delicious and Red Delicious Apple under Normal Contact Force Model. *Journal of Texture Studies*, 44. 409-417. 10.1111/jtxs.12028. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12028>.
- Berger, L.R.R., Stamford, N.P., Willadino, L.G., Laranjeira, D., De Lima, M.A.B., Malheiros, S.M.M., De Oliveira, W.J. & Stamford, T.C.M. (2016). Cowpea resistance induced against fusariumoxysporum f. sp. tracheiphilum by crustaceous chitosan and by biomass and chitosan obtained from cunninghamellaelegans. *Biology Control*, 92: 45-54. DOI: [10.1016/j.biocontrol.2015.09.006](https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.09.006).
- Celik, H. K., Rennie, A. E. W., & Akinci, I. (2011). Deformation behavior simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering*, 104(2): 293-298. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.020>.
- Celik, H. K., Ustun, H., Erkan, M., Rennie, A. & Akinci, I. (2021). Effects of bruising of 'Pink Lady' apple under impact loading in drop test on firmness, colour and gas exchange of fruit during long term storage, *Postharvest Biology and Technology*, 179, 2021, 111561, ISSN 0925-5214. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111561>.
- Dintwa, E., Van Zeebroeck, V., Ramon, H., Tijskens, E., (2008). Finite element analysis of the dynamic collision of apple fruit. *Postharvest Biol Technol*, 49, 260–276. DOI: [10.1016/j.postharvbio.2008.01.012](https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.01.012)
- Fu, H., Du, W., Yang, J., Weizu, Zhizhi Wu, Z. & Zhou Yang, Z. (2023). Bruise measurement of fresh market apples caused by repeated impacts using a pendulum method. *Postharvest Biology and Technology*, Volume 195, 2023, 112143. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112143>.
- Kabas, O., Celik, H., Ozmerzi, A., & 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. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3246>.
- Karcz, J., Bernas, T., Nowak, A., Talik, E., & Woznica, A. (2012). Application of lyophilization to prepare the nitrifying bacterial biofilm for imaging with scanning electron microscopy. *Scanning*, 34: 26-36. DOI: [10.1002/sca.20275](https://doi.org/10.1002/sca.20275).
- Kim, G. W., Do, G. S., Bae, Y., & Sagara, Y. (2008). Analysis of mechanical properties of whole apple using finite element method based on three dimensional real geometries. *Food Science and Technology Research*, 14(4): 329-341. Doi: [10.3136/fstr.14.329](https://doi.org/10.3136/fstr.14.329).
- Lewis, R., Yoxall, A., Marshall, M. B., & Canty, L. A. (2008). Characterizing pressure and bruising in apple fruit. *Wear*, 264: 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.038>.
- Lewis, R., Yoxall, A., Canty, L.A., & Reina Romo, E. (2007). Development of engineering design tools to help reduce apple bruising. *Journal of Food Engineering*, 83: 356-365. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.03.005>.

- Lingxin, B., Chengkun C., Guangrui H., Jianguo Z., Adilet S. & Jun C. (2021). Investigating the dynamic behavior of an apple branch-stem-fruit model using experimental and simulation analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 186, 2021, 106224. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106224>.
- Lu, F., Ishikawa, Y., Kitazawa, H. & Satake, T. (2010). Measurement of impact pressure and bruising of apple fruit using pressure-sensitive film technique. *Journal of Food Engineering*, 96: 614-620. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.09.009>.
- Nikara, S., Ahmadi, E., & Alavinia, A. (2018). Scanning electron microscopy study of microstructure damage and micromechanical behavior of potato tissue by impact during storage. *Journal of Food Process Engineering*, 41 (6): 1-12. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12831>.
- Nikara, S., Ahmadi, E., & Alavinia, A. (2020). Finite element simulation of the micromechanical changes of the tissue and cells of potato response to impact test during storage by scanning electron microscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 164: 111-153. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111153>.
- Opara, U. L., Pankaj B. Pathare, P. B. (2014). Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce—A review. *Postharvest Biology and Technology*, Volume 91, 2014, Pages 9-24, ISSN 0925-5214, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.12.009>.
- Pathan, A. K., Bond, J., & Gaskin, R. E. (2010). Sample preparation for SEM of plant surfaces. *Materials Today*, 12: 32-43. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70143-7](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70143-7).
- Qasemi baghbandrani, B., Qasemi, A., Hemmat, A., & Habibi Rad, A. (2015). Viscoelastic modeling of apples under quasi-static loading using finite element method to investigate the causes of bruising in it. *Journal of Agricultural Machinery*, 5 (2): 312-302. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v5i2.28262>.
- Rashvand, M., Altieri, G., Genovese, F., Li, Z. & Di Renzo, G. C. (2022). Numerical simulation as a tool for predicting mechanical damage in fresh fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 187, 2022, 111875. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111875>.
- Sadrnia, H., Rajabipour, A., Jafari, A., Javadi, A., Mostofi, Y., Kafashan, J., Dintwa, E., & Baerdemaeker, J. De. (2008). Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models. *Journal of Food Engineering*, 86: 272-280. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.007>.
- Sadrnia, H., Emadi, B., Rajabipour, A., & Baerdemaeker, J. De. (2011). Computer simulation of local bruising of apple fruit of Red Delicious cultivar. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 42: 69-78. (In Persian)
- Seyedabadi, E., Khojastehpour, M., & Sadrnia, H. (2015). Prediction of Internal Bruising in Cantaloupe by Nonlinear Fem Model Using Abaqus Software. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 46(1), 47-55. (In Persian). Doi: 10.22059/IJBSE.2015.54336.
- Singh, F., Katiyar, V.K., & Singh, B.P. (2014). Analytical study of turgor pressure in apple and potato tissues. *Postharvest Biology and Technology*, 89: 44-48. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.11.007>.
- Toivonen, P. M. A., Hampson, C., Stan, S., Mckenzie, D., & Hocking, R. (2007). Factors affecting severity of bruises and Degree of apparent bruise recovery in a yellow-skinned apple. *Postharvest Biology and Technology*, 45: 276-280. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.01.018>.
- Van Zeebroeck, M., (2006). The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling. PhD Thesis no. 643. Faculties Bio-ingenieurswetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.02.007>.
- Xudong, X., Zhanhong, x., Chennan, y., Qiaojun, z., & Jianneng c. (2021). Finite Element Analysis and Experiment of the Bruise Behavior of Carrot under Impact Loading. *Agriculture*, 11, 471-482. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060471>.