

شبیه سازی کامپیوتری لهیدگی موضعی میوه سیب رقم رد دلشیز

حسن صدرنیا^{۱*}، باقر عمادی^۲، علی رجبی پور^۳ و جوس دی بیارد میکر^۴^{۱، ۲} استادیاران، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد^۳، دانشیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاهتهران^۴، استاد، دانشکده مهندسی علوم زیستی، دانشگاه کاتولیک لوون بلژیک.

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۱/۲۵)

چکیده

سالانه مقادیر زیادی از میوه‌ها در اثر لهیدگی و سایر آسیب‌های مکانیکی هنگام برداشت، حمل و نقل، انبار کردن و بسته‌بندی از بین می‌روند یا دچار افت کیفیت می‌شوند. این در حالی است که تاکنون بیشتر پژوهش‌های انجام شده برای تحلیل عملیات مذکور با آزمون‌های عملی همراه بوده است و نتایج آن فقط در شرایط خاص می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. هدف از این تحقیق توسعه مدل‌های شبیه سازی کامپیوتری جهت بهینه سازی و طراحی عملیات پس از برداشت است، به نحوی که میزان آسیب دیدگی میوه به کمترین مقدار ممکن برسد. برای این منظور دو سری آزمایش بر روی سیب رقم رد دلشیز انجام شد. سری نخست آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری ابعاد، شعاع انحنای سطح، خواص مکانیکی بافت و سایر پارامترهای مورد نیاز جهت ایجاد مدل‌های دقیق اجزای محدود بود. سری دوم آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری توزیع فشار در سطح تماس بارگذاری و تهیه نمودارهای نیرو - تغییر شکل جهت ارزیابی و مقایسه مدل‌های شبیه سازی انجام شد. میانگین انحنای در قسمت میانی میوه ۶۱/۴۳ میلی‌متر به دست آمد که بیش از ۳/۷ برابر انحنای در قسمت فوقانی و تحتانی آن است. همچنین در آزمایش تعیین خواص مکانیکی، میانگین تنش و کرنش شکست بافت سیب رقم رد دلشیز به ترتیب ۲۸۲ کیلوپاسکال و ۰/۷۱ حاصل شد. نتایج بررسی‌های انجام شده روی مدل‌های شبیه سازی نشان داد بین نتایج مدل الاستیک و آزمایش اختلاف معنی‌دار وجود دارد، لیکن بین نتایج مدل الاستوپلاستیک و آزمایش اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد مشاهده نشد. حداکثر بارگذاری مجاز برای رقم رد دلشیز به کمک مدل شبیه سازی شده با خواص مادی الاستوپلاستیک ۳۲ نیوتن به دست آمد که با گزارشات سایر محققین مطابقت بسیار خوبی دارد. مدل شبیه سازی شده در این تحقیق می‌تواند لهیدگی میوه را در بارگذاری شبه استاتیکی با دقت قابل قبولی تعیین کند.

واژه های کلیدی: آسیب مکانیکی، مدل الاستوپلاستیک، فشار تماسی، تنش شکست بافت، اجزای محدود

مقدمه

میوه پاره شده و مواد درون سلولی با هم آمیخته می‌گردند. این عمل موجب می‌گردد تا بافت میوه در این ناحیه تغییر رنگ داده و قهوه‌ای شود (Rahemi, 2005).

از طرف دیگر اندازه‌گیری تنش‌های ایجاد شده در داخل سیب حین بارگذاری‌های مختلف بسیار مشکل است. روش جایگزین مناسب استفاده از تحلیل اجزای محدود^۱ (FEA) جهت تخمین تنش‌های داخلی است. به کمک روش اجزای محدود می‌توان اجسام با شکل غیر منظم و ناهمگن (با مدول الاستیسیته متفاوت) را مدل نمود. همچنین روش اجزای محدود توانایی حل مسائل غیرخطی از قبیل تغییر شکل هندسی جسم و چگونگی تماس اجسام را دارد.

مطالعات گسترده‌ای در زمینه لهیدگی موضعی میوه‌ها حین عملیات پس از برداشت، به ویژه بر روی سیب، صورت گرفته است که بیشتر آنان بر پایه آزمایش‌های تجربی بوده

بیش از ۳۰ درصد سیب‌ها طی عملیات چیدن، جابه‌جایی و نگهداری صدمه می‌بینند (Kupferman, 2006). دلیل این امر وجود هر دو نوع بارگذاری دینامیکی و استاتیکی در مراحل مختلف پس از برداشت است که می‌تواند موجب آسیب دیدگی جزئی و کلی در میوه شود. البته مقررات سختی در استانداردهای درجه بندی میوه برای حجم ناحیه آسیب دیده تدوین شده است. براساس استاندارد درجه بندی آمریکا، وجود ناحیه آسیب دیده به قطر ۱۶ میلی‌متر و عمق ۱/۶ میلی‌متر موجب خارج شدن میوه سیب از شاخص‌های درجه عالی خواهد شد (USDA, 2002). آنچه که باعث آسیب دیدگی می‌گردد افزایش تنش حاصل از نیروهای خارجی به مقداری بیش از تنش شکست بافت است. در این شرایط دیواره سلول‌های بافت

* نویسنده مسئول: hassan.sadrnia@yahoo.com

تشدید و فرکانس‌های طبیعی میوه مد نظر باشد این فرض خطای زیادی را در نتایج به وجود نمی‌آورد. همچنین در کتب مرجع رفتار مکانیکی محصولات کشاورزی را در طبقه مواد ویسکوالاستیک در نظر می‌گیرند و مدل‌هایی از قبیل مدل ماکسول و کلونین را برای بیان تغییر شکل میوه حین بارگذاری ارائه داده‌اند (Mohsenin, 1986; Sitkei, 1986). استفاده از این مدل‌ها در تعیین رفتار مکانیکی میوه بارگذاری شده تا قبل از نقطه شکست می‌تواند مفید باشد. همچنین Lewis et al. (2007) با استفاده از مدل خطی اجزای محدود و با فرض همگن و الاستیسیته بودن سیب به بررسی تنش تماسی در محدوده بارگذاری صفر تا ۱۰۰ نیوتن پرداختند. با توجه به فرضیات تحقیقات گذشته کاربرد مدل‌های ساده به دست آمده نیز محدود است. هدف از این تحقیق استفاده از اندازه‌گیری‌های دقیق خواص مکانیکی بافت و شکل هندسی میوه سیب به منظور توسعه مدل کامپیوتری سه بعدی بهبود یافته تعیین لهدیگی جهت استفاده در بهینه‌سازی مکانیزم‌های پس از برداشت و حمل و نقل است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های عملی

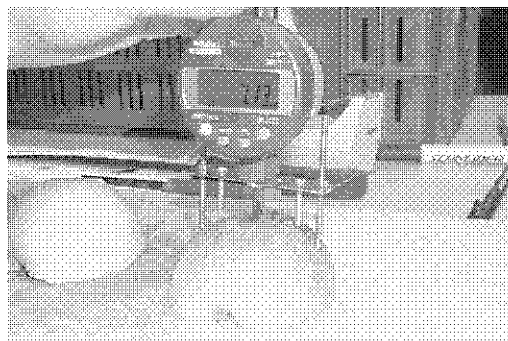
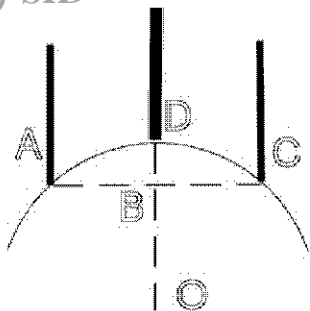
دو سری آزمایش عملی در این تحقیق بر روی سیب رقم رد دلشیز^۱ انجام شد. سری اول آزمایش‌ها به منظور جمع‌آوری داده‌ها برای ایجاد مدل اجزای محدود انجام گرفت. این آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری ابعاد (سه قطر عمود بر هم: قطر بزرگ، قطر میانی و قطر کوچک)، شعاع انحنای سطح (ناحیه فوقانی، ناحیه میانی و ناحیه تحتانی) و خواص مکانیکی بافت (مدول الاستیسیته، تنش شکست و کرنش شکست) هستند. طبق استاندارد آزمون مواد غذایی انجمن مهندسان کشاورزی آمریکا (ASAE, 2003) ۲۰ تکرار برای هر آزمایش در نظر گرفته شد. ابعاد به کمک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. شعاع انحنای سطح در هر موقعیت با استفاده از انحناسنج به دست آمد. به علت در دسترس نبودن انحناسنج تجاری، دستگاه مذکور به کمک یک ساعت دیجیتالی مدل میتوتویو (Mitutoyo Belgium NV, Kruibeke) ساخته شد (شکل ۱). شعاع انحنای سطح به کمک رابطه (۱) می‌تواند محاسبه شود (Mohsenine, 1986):

$$\text{شعاع انحنای سطح} = \frac{(AC)^2}{8(BD)} + \frac{(BD)}{2} \quad (1)$$

است. Brown & Segerlind (1975) گزارش دادند اندازه لهدیگی‌ها در قسمت‌های فوقانی و تحتانی میوه کمتر از سایر قسمت‌های میوه است. دلیل تفاوت در اندازه لهدیگی‌ها، تغییر در شعاع انحنای میوه بیان شده است. در تحقیق مشابه دیگری Siyami et al. (1988) گزارش دادند که شعاع انحنای میوه سیب بر حجم و قطر لهدیگی اثر معنی‌داری دارد به طوری که با افزایش شعاع انحنای میوه، حجم و قطر لهدیگی کاهش می‌یابد. Johnson & Dover (1990) نشان دادند سیب‌های بزرگتر دارای سلول‌های بزرگتر و دیواره سلولی نازک‌تر هستند. این امر باعث ضعیف و سست شدن بافت می‌شود که در نتیجه تنش شکست بافت را کاهش داده، آسانتر دچار لهدیگی می‌شود. Van Lancker (1979)، Hyde et al. (2001) نشان دادند که میزان آسیب دیدگی سیب با افزایش دما کاهش می‌یابد. علت این تغییر در نتیجه کاهش مدول الاستیسیته با افزایش دما است. Afkari Sayyah, et al. (2008) تاثیر بارهای مکانیکی بر آسیب‌های وارده بر دو رقم سیب گلدن دلشیز (لبنانی زرد) و رد دلشیز (لبنانی قرمز) را پس از مرحله انبارداری بررسی نمودند و گزارش نمودند که با افزایش مدت انبارداری در هر دو رقم قابلیت کوفتگی (حساسیت به لهدیگی) کاهش می‌یابد. Van Zeebroeck et al. (2007) فاکتورهای موثر بر لهدیگی میوه سیب را مورد مطالعه قرار دادند و گزارش نمودند زمان برداشت بر لهدیگی ایجاد شده در سیب موثر است. به طور خلاصه نتایج به دست آمده از تاثیر فاکتورهای مختلف بر لهدیگی را می‌توان در دو دسته اصلی هندسه میوه و خواص بافت (شامل کلیه خواص فیزیکی، مکانیکی و ... طبقه بندی نمود.

ضعف عمده روش‌های تجربی، پرهزینه و زمان بر بودن آنها است. همچنین ثابت نگه داشتن شرایط آزمایشگاه جهت بررسی اثر یک پارامتر، مشکل و گاهی غیر قابل دسترسی است. بنابراین برخی محققین اقدام به انجام مدل سازی میوه در شرایط بارگذاری مختلف نموده‌اند که در سال‌های اخیر این شیوه از تحقیقات رو به افزایش است. Mohsenin (1986) با استفاده از معادلات هرتز تنش‌های ایجاد شده در ناحیه تماس را بررسی نمود. باید توجه داشت که به کارگیری معادلات هرتز نیاز به فرضیاتی برای ساده نمودن مسئله دارد که ممکن است دقت نتایج به دست آمده را مخدوش کند. روش المان‌های محدود برای بررسی و تعیین مدهای ارتعاشی و پاسخ گذرای میوه سیب توسط Lu & Abbott (1997) استفاده شد. در بسیاری از تحقیقات گذشته رفتار مادی بافت میوه به صورت ساده شده خطی و ایزوتروپیک مدل شده است (Cardenas-Weber et al., 1991; Wang & Jiao, 2004; Nourain et al., 2005; Chen, et al. 1996). البته در مواردی که بررسی وضعیت

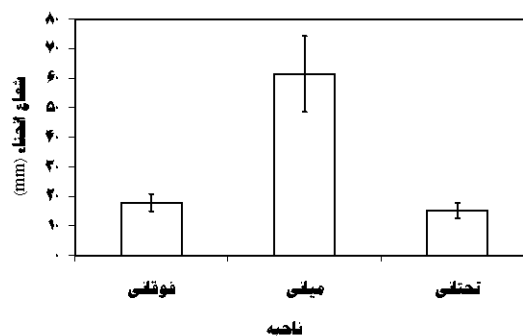
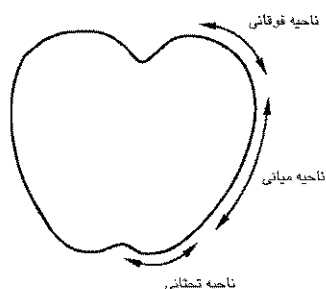
Archive of SID



شکل ۱- دستگاه انحناسنج سطح با استفاده از ساعت دیجیتالی و نحوه محاسبه شعاع انحنای میوه در موقعیت مورد نظر (Van Zeebroeck, 2005)

که اختلاف قسمت میانی با دو قسمت فوقانی و تحتانی نسبتاً زیاد و در حدود ۳/۷ برابر است (شکل ۲). بررسی مقادیر مشخصات هندسی نشان می‌دهد با وجود آن که اختلاف میانگین بین سه قطر اصلی بسیار کم است لیکن به دلیل وجود اختلاف زیاد در مقادیر انحنای سطح نمی‌توان سیب را به صورت یک جسم کروی در مدل‌های شبیه‌سازی در نظر گرفت.

مقادیر جرم و مشخصات هندسی اندازه‌گیری شده میوه سیب رقم رد دلشیز در جدول (۱) نشان داده شده است. میانگین قطر بزرگ (a) ۹۲/۴۸، قطر میانی (b) ۸۸/۳۴ و قطر کوچک (c) ۸۷/۱۹ میلی‌متر به دست آمد که نشان می‌دهد اختلاف کمی بین قطرهای اصلی میوه سیب وجود دارد. از طرف دیگر مقادیر میانگین انحنای قسمت فوقانی ۱۷/۸۳، قسمت میانی ۶۱/۴۳ و قسمت تحتانی ۱۵/۱۸ میلی‌متر اندازه‌گیری شد



شکل ۲- انحنای قسمت‌های مختلف میوه سیب

نمونه از ناحیه الاستیک خارج شده و وارد مرحله پلاستیک (بدون بازگشت) می‌شود. به عبارت دیگر در نقطه تسلیم بیولوژیکی به علت پاره شدن دیواره سلول‌های بافت، نمونه قادر به تحمل بار بیشتر نمی‌باشد و در نتیجه کرنش بدون افزایشی در تنش به روند صعودی خود ادامه می‌دهد. با به دست آوردن این نقطه می‌توان مقدار تنش شکست و کرنش شکست را برای هر نمونه محاسبه نمود. جدول (۱) مقادیر تنش شکست، کرنش شکست و مدول الاستیسیته بافت میوه سیب رقم رد دلشیز را نشان می‌دهد. مدول الاستیسیته با فرض خطی بودن تنش و کرنش در ناحیه الاستیک با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2)$$

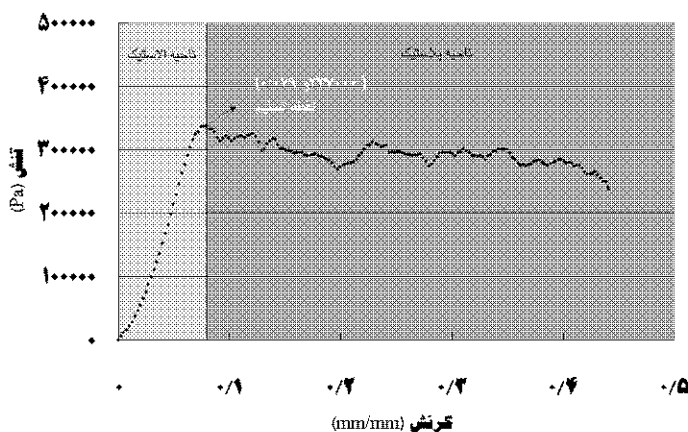
که در آن E مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)، σ تنش (مگاپاسکال) و ϵ کرنش بدون بعد است.

آزمایش تعیین خواص مکانیکی بافت با استفاده از دستگاه تست یونیورسال (مدل یوتی‌اس ساخت کشور آلمان)^۱ مجهز به تجهیزات بارگذاری فشاری انجام گردید. آزمایش‌ها به صورت بارگذاری تک محوری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۲ میلی‌متر و ارتفاع ۲۲ میلی‌متر انجام گردید. نمونه‌های استوانه‌ای به کمک یک نمونه‌گیر که به همین منظور ساخته شده بود، از قسمت استوایی میوه تهیه شدند. سرعت بارگذاری نمونه‌ها بر اساس استاندارد آزمون مواد غذایی انجمن مهندسان کشاورزی آمریکا (ASAE, 2003)، ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه و تغییر مکان نهایی ۸ میلی‌متر انتخاب گردید. شکل (۳) نمودار تنش و کرنش به دست آمده از یک نمونه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشخص است در نقطه تسلیم بیولوژیکی^۲

1. Universal Testing Machine (UTS, testsysteme GmbH, Ulm, Germany)
2. Biolyield point

جدول ۱- جرم، مشخصات هندسی و خواص مکانیکی بافت میوه سیب رقم رد دلشیز

خواص مکانیکی بافت			انحنای سطح (mm)			ابعاد (mm)			جرم (g)	
مدول الاستیسیته (MPa)	تنش شکست (kPa)	کرنش شکست	تحتانی	میانی	فوقانی	c	b	a		
۴/۱	۲۸۲	۰/۰۷۱	۱۵/۱۸	۶۱/۴۳	۱۷/۸۳	۸۷/۱۹	۸۸/۳۴	۹۲/۴۸	۳۴۱	میانگین
۰/۹۳	۴۰	۰/۰۱۲	۲/۶۳	۱۲/۸۸	۲/۹۱	۳/۰۳	۲/۸۵	۲/۳۲	۳۰	انحراف معیار
۵/۲	۳۵۷	۰/۰۹۴	۲۱/۷۱	۹۲/۲۲	۲۴/۳۴	۹۱/۰۳	۹۰/۱۲	۹۵/۱۹	۳۷۰	بیشینه
۲/۴	۲۲۹	۰/۰۸۵	۱۲/۳۹	۴۳/۱۹	۱۲/۹۶	۸۴/۱۱	۸۴/۱۰	۸۹/۵۷	۳۱۲	کمینه
۲۲/۶۷	۱۴/۲	۱۶/۴۱	۱۷/۳۱	۲۰/۹۶	۱۶/۳۳	۳/۴۷	۳/۲۲	۲/۵۱	۹	ضریب تغییرات (CV%)

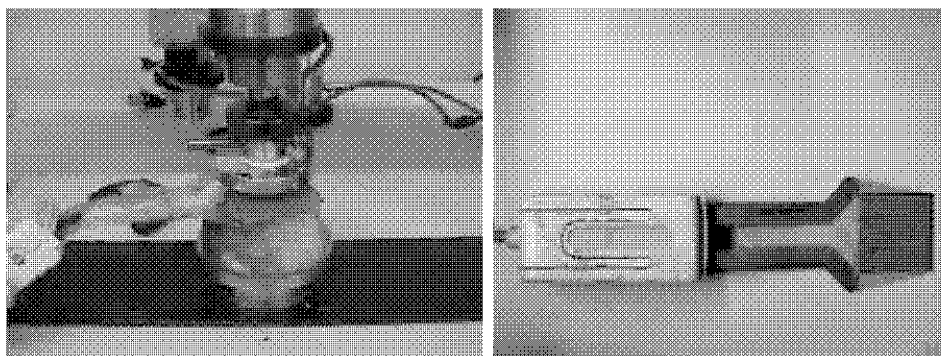


شکل ۳- نمونه ای از منحنی تنش-کرنش در بار گذاری تک محوری بر روی بافت میوه سیب

نرم افزار مربوط به تک اسکن، فشار در حین بارگذاری به صورت آنلاین بر روی صفحه نمایش قابل مشاهده و ذخیره سازی است. در این آزمایش بارگذاری با سرعت ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه بر روی نصف میوه سیب انجام و به ازای هر ۰/۵ ثانیه، داده‌های توزیع فشار به دست آمد (شکل ۵). در هنگام انجام آزمایش فوق دومین مجموعه داده‌ها یعنی مقادیر نیرو-تغییر شکل میوه سیب با استفاده از دستگاه تست یونیورسال حاصل شد (شکل ۶). شماره‌های مشخص شده در شکل (۵) و شکل (۶) موقعیت‌های یکسان بارگذاری را نشان می‌دهد.

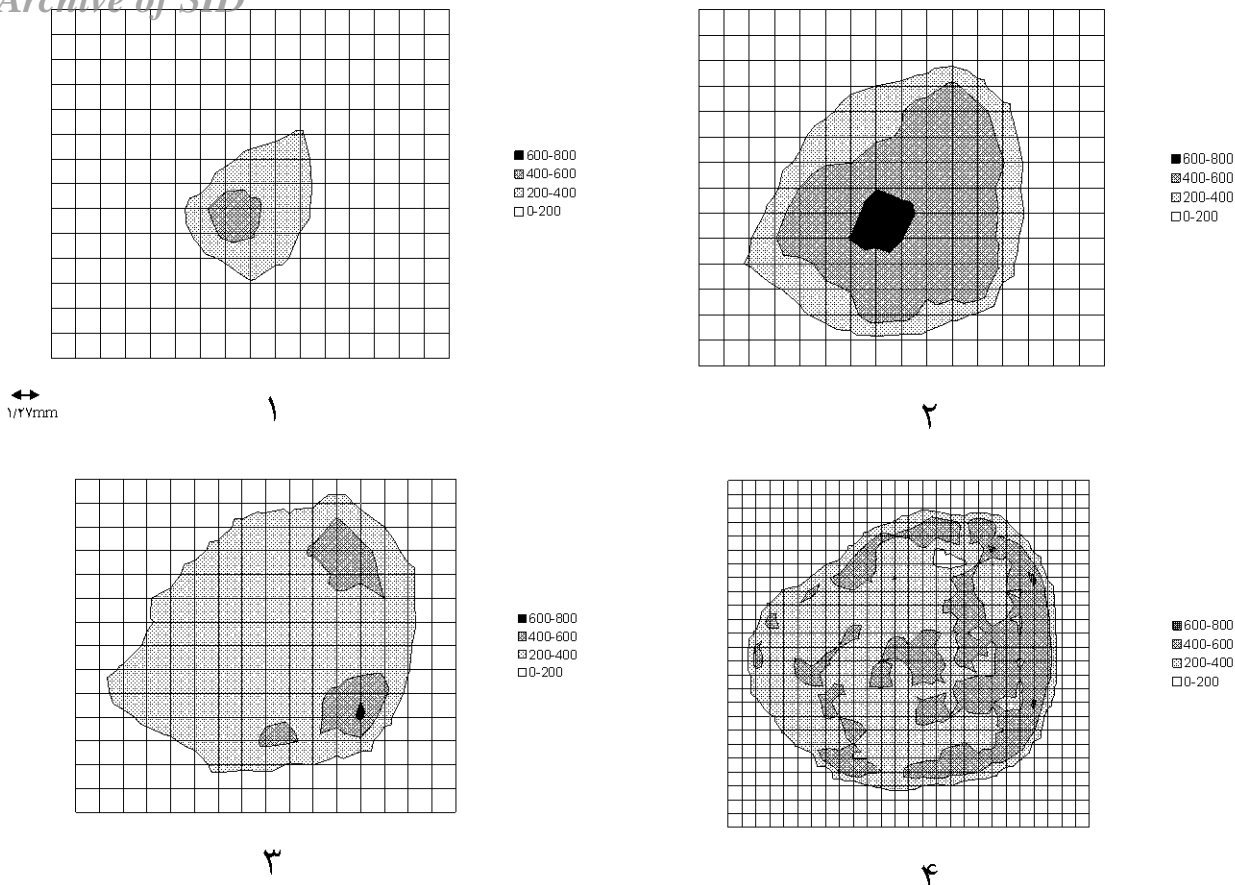
سری دوم آزمایش‌ها با هدف جمع‌آوری داده‌هایی برای ارزیابی مدل المان محدود در دو آزمایش انجام شد. آزمایش نخست، تعیین توزیع فشار بین سطح تماس میوه با سطح بارگذاری است. این آزمایش با استفاده از قرار دادن فیلم فشارسنج (مدل تک‌اسکن ۵۰۵۱^۱ ساخت کشور ایالات متحده آمریکا) در بین صفحه بارگذاری و میوه، به صورت نشان داده شده در شکل ۴ انجام گرفت. این حسگر انعطاف پذیر، دارای ۴۴ ردیف و ۴۴ ستون با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر است. با استفاده از

1. Tactile Sensor, Type Tekscan No. 5051, USA.



شکل ۴- سمت راست فیلم فشارسنج، سمت چپ موقعیت فیلم هنگام آزمایش بارگذاری فشاری

Archive of SID



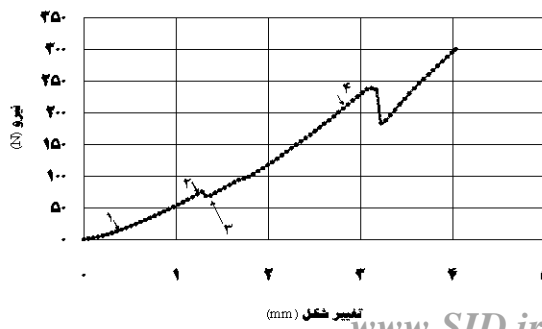
شکل ۵- توزیع فشار (بر حسب کیلو پاسکال) در سطح تماس میوه با صفحه بارگذاری به ترتیب شماره در بار ۱۵، ۷۵ (قبل از نقطه شکست اول)، ۷۰ (بعد از شکست اول) و ۲۱۰ نیوتن.

مدل اجزای محدود

نرم افزار شبیه سازی مهندسی انسیس (نسخه ۸/۰) جهت مدل سازی و انجام تحلیل اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفت. در میان قابلیت‌های نرم افزار مذکور در تحلیل اجزای محدود، شاخص‌ترین آنها با توجه به اهداف این تحقیق توانایی انجام تحلیل‌های غیر خطی است. مسائلی مانند بارگذاری میوه شامل سه عامل غیر خطی مادی، غیر خطی هندسی (تغییر شکل بزرگ) و غیر خطی شرایط مرزی (تماس) هستند. لذا جهت انجام تحلیل‌های غیرخطی باید بارگذاری به صورت نموی بر روی میوه صورت گرفته و سپس شرایط تعادل در هر نمو لحاظ گردد.

از ابعاد و انحنای میوه که قبلاً اندازه‌گیری شد برای ایجاد مدل هندسی استفاده گردید (جدول ۱). علاوه بر آن میوه سیب با برشی طولی (سر-دم) نصف گردید و سطح مقطع حاصل اسکن شد. سپس تصویر سطح مقطع پردازش شده و موقعیت بخش‌های مختلف مثل شکل بافت مرکزی (هسته) به طور دقیق مشخص گردید. ابعاد اصلی سیب مدل شده عبارتند از: قطر ۹۰ میلی‌متر، ضخامت پوست ۵۰۰ میکرومتر، قطر کوچک هسته (در جهت عمود بر محور سر-دم) ۱۰ میلی‌متر، قطر

همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش بار، فشار در سطح تماس افزایش می‌یابد. در نقاط ۱ و ۲ بیشینه فشار در مرکز سطح تماس مشاهده می‌شود که مقدار فشار تماسی به تدریج به سمت لبه‌ها کاهش می‌یابد. در نقطه ۳ به دلیل شکست بافت، ناحیه سیاه رنگ از مرکز فاصله گرفته و به سمت لبه تمایل پیدا می‌کند. سپس با افزایش بار در نقطه ۴ فشار مجدداً در مرکز سطح افزایش می‌یابد ولی همچنان نسبت به نقطه دو در مقدار پایین تری است. بالعکس متوسط فشار در لبه بیشتر از متوسط فشار در مرکز سطح تماس است. دلیل این موضوع آسیب دیدگی بافت در مرکز سطح تماس است.



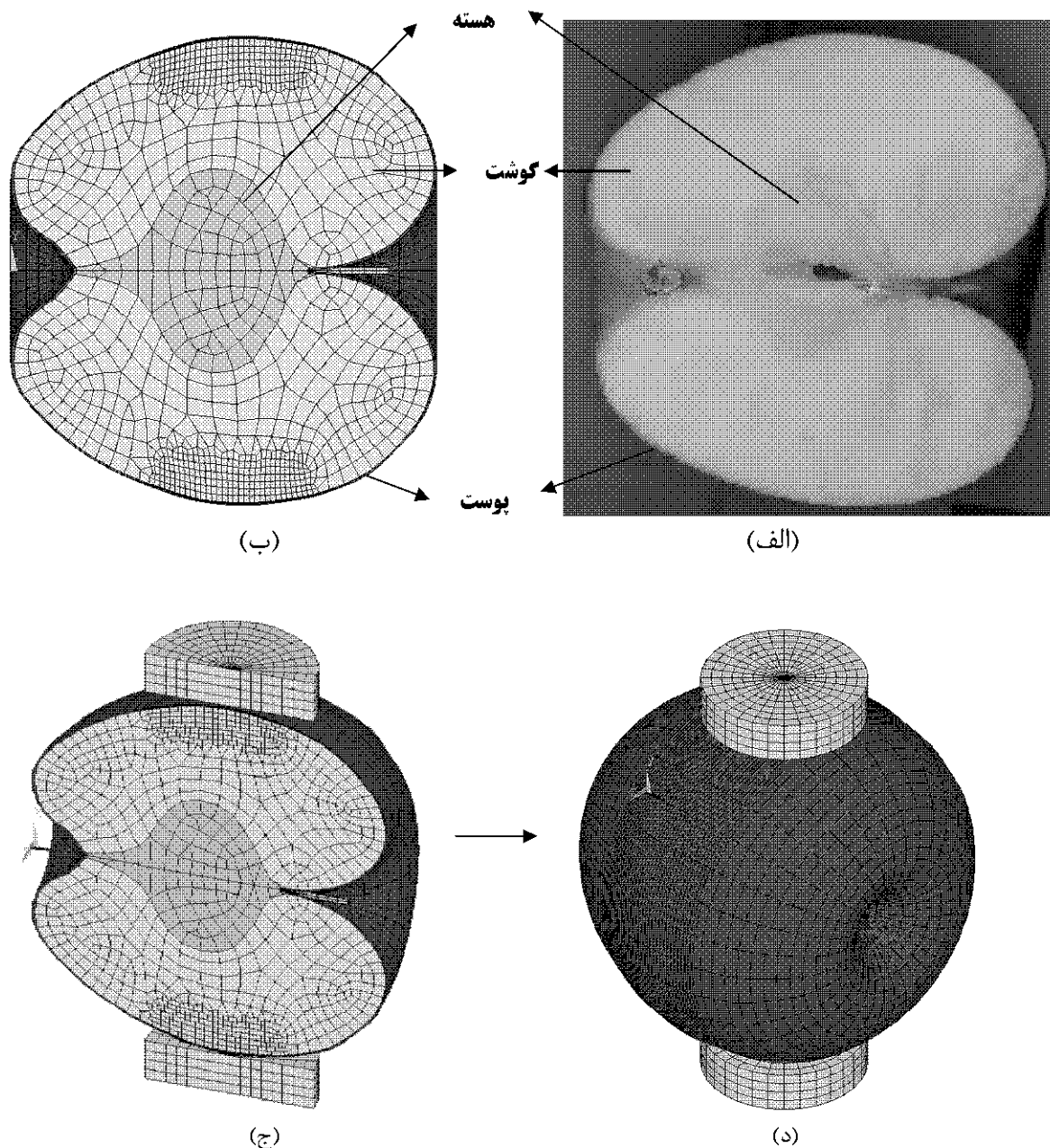
شکل ۶- نمودار نیرو- تغییر شکل بارگذاری بر روی نصف نمونه میوه سیب با استفاده از دستگاه تست یونیورسال

بارگذاری، مدل سه بعدی با لحاظ نمودن صفحه تقارن به صورت نصف میوه کامل ایجاد گردید (شکل ۷). المان‌های مورد استفاده شامل المان سه‌بعدی سالید^۲ ۴۵ و المان تماسی^۳ ۴۹ است (ANSYS, 2004).

2. SOLID45
3. CONTAC49

بزرگ هسته (درجهت محور سر-دم) ۲۸/۵ میلی‌متر و ارتفاع سیب ۸۷ میلی‌متر. سپس با استفاده از گزینه ترسیم انحنا اسپین لاین^۱ خطوط مرزی، بسیار نزدیک به میوه واقعی حاصل شد. در مرحله بعد مدل هندسی دو بعدی گسترش داده شد و در نهایت با توجه به عدم وجود تقارن محوری در راستای

1. Spline



۷- مراحل مدل کردن میوه سیب (الف) سطح مقطع اسکن شده میوه حقیقی، (ب) ایجاد مدل اجزای محدود میوه با بخش‌های مجزا برای هر قسمت میوه، (ج) ایجاد صفحات بارگذاری در مدل، (د) مدل اجزای محدود میوه کامل

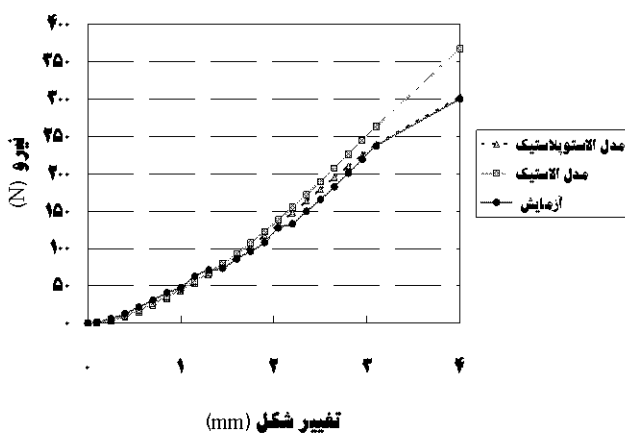
گوشت میوه سیب از پلاستیسیته غیر وابسته به زمان مدل دوخطی ایزوتروپیک با معیار شکست ون مایز و در سایر قسمت‌ها از الاستیک خطی استفاده گردید. در این تحقیق با

مرحله بعد تعریف خواص مادی (خواص فیزیکی، مکانیکی و ...^۱) المان‌های مختلف مدل است که با توجه به هدف این تحقیق برای تعیین و بررسی گسترش ناحیه لهیدگی در قسمت

نمونه‌های دوتایی مدل الاستیک با داده‌های آزمایشگاهی در سطح یک در صد معنی دار بوده درحالی که اختلاف نمونه‌های دوتایی مدل الاستوپلاستیک با داده‌های آزمایشگاهی در سطح یک درصد معنی‌دار نیست. بنابراین با توجه به کمتر بودن میانگین اختلاف نتایج مدل الاستوپلاستیک با داده‌های آزمایشگاهی نسبت به مدل الاستیک می‌توان نتیجه گرفت مدل الاستوپلاستیک به کار گرفته شده در این تحقیق رفتار مکانیکی میوه سیب را در بارگذاری استاتیکی بهتر پیش بینی می‌کند. علت این امر در نظر گرفتن ناحیه لهیدگی و شکست بافت میوه حین بارگذاری در مدل الاستوپلاستیک است که منجر به بهبود جواب‌های مدل می‌شود (شکل ۸).

جدول ۲- تجزیه واریانس مقایسه نمونه‌های دوتایی نیرو در تغییر شکل یکسان صفحات بارگذاری

نمونه دوتایی	میانگین اختلاف	انحراف معیار اختلاف	میانگین انحراف معیار خطا	درجه آزادی	مقدار P
آزمایش- مدل الاستیک	۲۲/۶۶	۳۴/۸۸	۶/۵۹	۲۷	۰/۰۰۲
آزمایش- مدل الاستوپلاستیک	۳/۳۴	۸/۲۲	۱/۵۵	۲۷	۰/۰۲



شکل ۸- مقایسه نتایج رفتار مکانیکی مدل الاستوپلاستیک، مدل الاستیک و آزمایش عملی روی میوه سیب در بارگذاری‌های مختلف

به منظور ارزیابی بیشتر مدل‌های شبیه‌سازی، دومین مقایسه بر روی نتایج حاصل از فشار بیشینه در سطح تماس میوه با صفحات بارگذاری انجام شد. جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس مقایسه نمونه‌های دوتایی فشار بیشینه در سطح تماس حاصل از پیش بینی مدل الاستیک و مدل الاستوپلاستیک با سنسور فیلم فشارسنج را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد میانگین اختلاف در مدل الاستیک بیش از دو برابر میانگین اختلاف در مدل الاستوپلاستیک است. اختلاف نمونه‌های دوتایی فشار بیشینه پیش بینی شده در مدل الاستیک و داده‌های آزمایشگاهی در سطح یک درصد معنی دار است اما این اختلاف

توجه به نمودار به دست آمده از آزمون تک محوری (شکل ۳) و مقایسه آن با مدل‌های پلاستیسیته مهندسی، مدل پلاستیسیته مناسب به صورت دو خطی انتخاب گردید. در مدل الاستوپلاستیک دو خطی رفتار تنش- کرنش ماده تا قبل از نقطه تسلیم به صورت خطی با شیب معادل مدول الاستیسیته یا مدول یانگ (E_p) می‌باشد و پس از آن منحنی تنش-کرنش با شیب معادل مدول تانژانت (E_t) ادامه خواهد یافت. در مدل‌های پلاستیسیته، ماده با رسیدن به یک سطح معلوم تنش (تنش تسلیم) دچار کرنش بدون بازگشت یا به عبارت دیگر تغییر شکل دائمی می‌شود. ولی مدل الاستیک خطی رفتار ماده‌ای را نشان می‌دهد که در آن تغییرات تنش نسبت به کرنش به صورت خطی است و در آن پس از بار برداری تغییر شکل‌ها و کرنش‌های ماده صفر می‌شود (Beer et al. 2005). بنابراین براساس اطلاعات آزمون‌های انجام شده، نتایج تحقیقات سایر محققین و هدف این پژوهش، خواص مادی مدل در سه قسمت گوشت، پوست و هسته بدین صورت تعریف می‌گردند: الف- گوشت: مدول الاستیسیته ۴/۲۵ مگا پاسکال، تنش تسلیم ۳۳۷ کیلو پاسکال، کرنش تسلیم ۰/۰۷۹ و مدول تانژانت صفر (از نتایج تحقیق حاضر)، نسبت پواسون ۰/۳ (Mohsenine, 1986). ب- پوست: مدول الاستیسیته ۱۲ مگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳۵ (Van Zeebroeck, 2005) و ج- هسته: مدول الاستیسیته ۷ مگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳۵ (Dintwa et al, 2008). علاوه بر عامل غیر خطی مادی دو عامل غیر خطی تغییر شکل هندسی و تغییر شرایط مرزی در مسئله بارگذاری میوه وجود دارد که در تحلیل حاضر لحاظ شده‌اند.

نتایج و بحث

به منظور ارزیابی مدل‌های اجزای محدود، بررسی‌هایی بین نتایج پیش بینی شده حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی با نتایج آزمایش‌های عملی صورت گرفت. اولین مقایسه روی نیروهای وارد شده بر صفحات بارگذاری در تغییر شکل یکسان با استفاده از مقایسه میانگین آزمون t نمونه‌های دوتایی انجام شد. جدول (۲) تجزیه واریانس مقایسه نمونه‌های دوتایی نیرو در صفحات بارگذاری مدل الاستیک و مدل الاستوپلاستیک با آزمایش را نشان می‌دهد. با وجود آنکه در تحلیل هر دو مدل، عوامل غیر خطی هندسی و شرایط مرزی به طور یکسان لحاظ گردید لیکن میانگین اختلاف نتایج در مدل الاستیک بسیار بیشتر از مدل الاستوپلاستیک مشاهده می‌شود. اختلاف

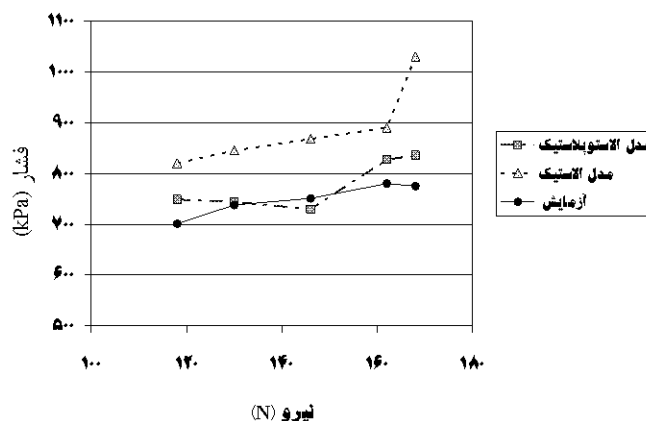
ولی پس از عبور از ناحیه الاستیک به دلیل شکست مکانیکی بافت در زیر پوست به مقدار ثابت رسیده و یا دچار افت فشار می‌گردد (شکل ۹). این نکته شایان ذکر است که مدل الاستیک نیز می‌تواند نتایج قابل قبولی را قبل از اولین نقطه شکست مکانیکی میوه (نقطه شماره ۲ در شکل ۶) ارائه دهد (شکل ۱۰).

جدول ۳- تجزیه واریانس مقایسه نمونه های دوتایی فشار بیشینه در سطح تماس

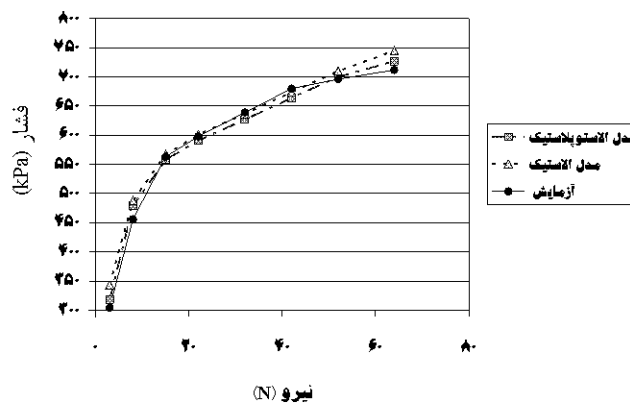
مقدار p	درجه آزادی	میانگین معیار خطا	انحراف معیار اختلاف	میانگین اختلاف	نمونه دوتایی
۰/۰۰۶	۱۷	۳۷/۳۱	۱۵۸/۳۱	۱۱۶/۱۱	سنسور- مدل الاستیک
۰/۰۲۲	۱۷	۲۲/۶۵	۹۶/۱۰	۵۷/۳۳	سنسور- مدل الاستوپلاستیک

الاستیک بوده و دچار لهیدگی نمی‌گردد. لیکن در بارگذاری ۱۵ نیوتن کرنش معادل به بیش از کرنش شکست رسیده و ناحیه به قطر ۶ میلی‌متر و عمق ۰/۸ میلی‌متر را دچار لهیدگی خواهد نمود. با افزایش نیروی بارگذاری ابعاد ناحیه لهیدگی افزایش می‌یابد به طوری که این ناحیه در نیروی ۳۲ نیوتن، قطر ۱۱ میلی‌متر و عمق ۱/۶ میلی‌متر خواهد داشت. بنابراین بارگذاری با نیروی بیشتر از ۳۲ نیوتن موجب افزایش عمق ناحیه لهیدگی به بیش از ۱/۶ میلی‌متر خواهد شد به طوری که در شکل ۱۱-د ابعاد ناحیه لهیدگی در بار ۴۲ نیوتنی به بیش از ۱۲ میلی‌متر قطر و ۲ میلی‌متر عمق می‌رسد. بنابراین با توجه به شاخص‌های استاندارد درجه بندی آمریکا که عمق بیش از ۱/۶ میلی‌متر را در درجه عالی نمی‌پذیرد (USDA, 2002)، مقدار مجاز بارگذاری استاتیکی برای رقم رد دلشیز ۳۲ نیوتن به دست می‌آید. این نتیجه با نتایج سایر محققین تطابق خوبی نشان می‌دهد. Lewis et al. (2007) که از تجهیزات اندازه‌گیری فشار تماسی مافوق صوت برای تعیین سطح ناحیه لهیدگی استفاده نمودند، مقدار مجاز بار استاتیکی را برای سیب ۳۵ نیوتن بیان کردند. Toivonen et al. (2007) فاکتورهای موثر بر لهیدگی سیب را مورد بررسی قرار دادند و گزارش نمودند نیروهای فشاری ۲۲/۲، ۴۴/۵ و ۶۶/۷ نیوتن بر روی سیب می‌تواند به ترتیب موجب آسیب دیدگی جزئی، متوسط و شدید در این میوه گردد. این محققین مقدار بار فشاری مجاز را به طور مشخص در گزارشات خود ذکر نکرده‌اند با این وجود نتایج تحقیقات Toivonen et al. نشان داد ۷۰ درصد سیب‌ها در بار ۲۲/۲ نیوتن دچار لهیدگی قابل تشخیص نمی‌شوند. بنابراین می‌توان بر اساس تحقیقات Toivonen et al. محدود بار مجاز را بین ۲۲/۲ تا ۴۴/۵ نیوتن در نظر گرفت که با نتایج مدل شبیه سازی شده سیب در این تحقیق تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهد.

در مدل الاستوپلاستیک در سطح یک درصد معنی دار نیست. در مدل الاستیک با افزایش نیروی بارگذاری، فشار بیشینه در سطح تماس بدون تغییر به روند صعودی خود ادامه می‌دهد در حالی که در مدل الاستوپلاستیک همانند مشاهدات آزمایش‌های عملی فشار بیشینه ابتدا با افزایش بارگذاری روند صعودی دارد



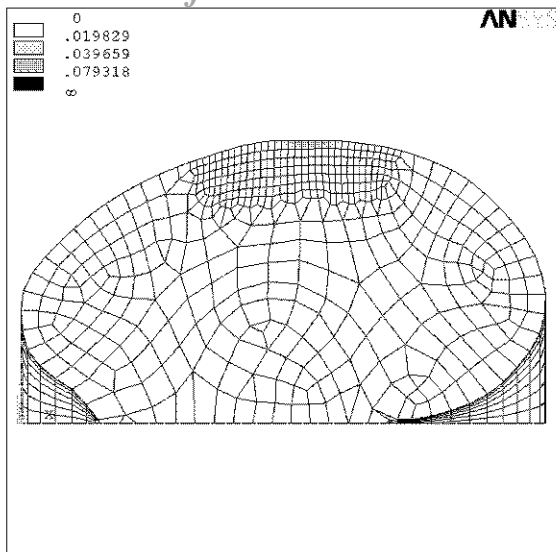
شکل ۹- مقایسه نتایج فشار بیشینه پیش بینی شده توسط مدل‌های اجزای محدود و سنسور فیلم فشار سنج پس از شکست بافت



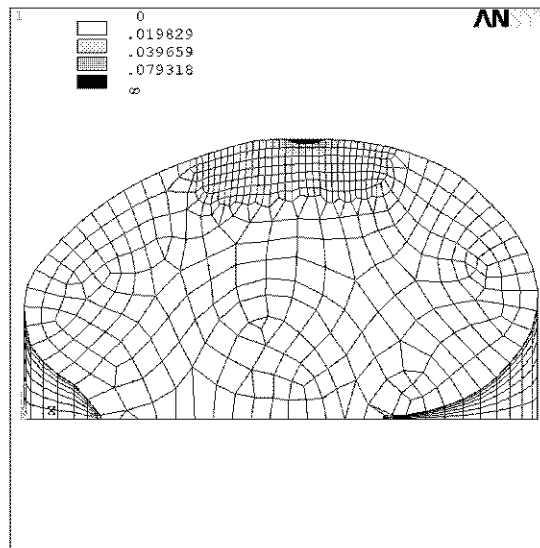
شکل ۱۰- مقایسه نتایج فشار بیشینه پیش بینی شده توسط مدل‌های اجزای محدود و سنسور فیلم فشار سنج در ناحیه الاستیک

با توجه به نتایج به دست آمده از جداول تجزیه واریانس (۳ و ۲) مدل الاستوپلاستیک برای بررسی و پیش بینی ناحیه لهیدگی در بارگذاری‌های استاتیکی حین عملیات پس از برداشت استفاده شد. شکل (۱۱) کرنش ون مایز معادل را در بارگذاری‌های ۸، ۱۵، ۳۲ و ۴۲ نیوتن نشان می‌دهد. در بارگذاری با نیروی ۸ نیوتن کرنش معادل کمتر از کرنش شکست یعنی ۰/۰۷۹۳۷۸ در تمام قسمت‌های گوشت میوه مشاهده می‌شود. لذا در این نیرو سیب دارای تغییر شکل

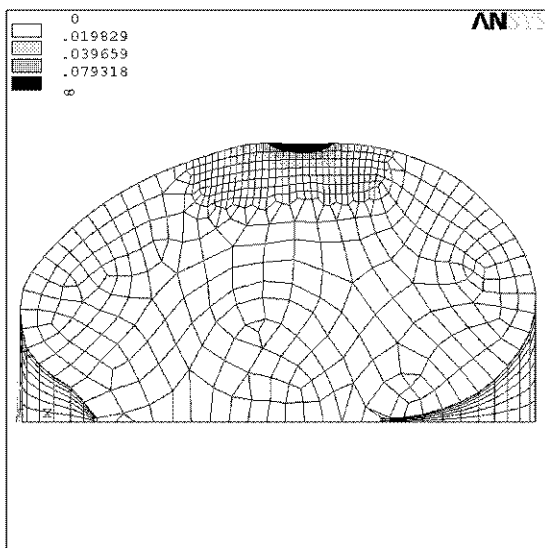
Archive of SID



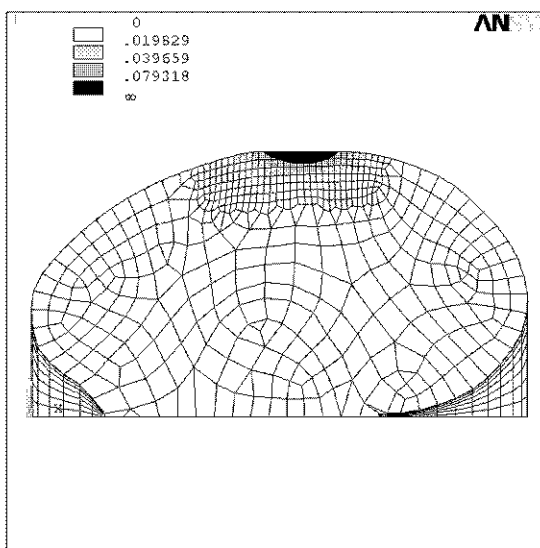
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۱- کرنش معادل ون مایرز در بارگذاری شبه استاتیکی سیب به ترتیب حروف در نیروهای ۸، ۱۵، ۳۲ و ۴۲ نیوتن. ناحیه سیاه رنگ کرنش پلاستیک یا ناحیه لهیدگی را نشان می‌دهد.

مرکز تماس است درحالی که بعد از نقطه شکست بیشینه فشار تماسی در ناحیه کناری سطح تماس قرار دارد.
 ۴- نتایج مدل اجزای محدود الاستیک با داده‌های آزمایشگاهی دارای اختلاف معنی‌دار است در حالی که نتایج مدل اجزای محدود الاستوپلاستیک با داده‌های آزمایشگاهی اختلاف معنی‌داری را نشان نمی‌دهد.
 ۵- مقدار بار مجاز استاتیکی بر روی میوه سیب رقم رد دلشز با استفاده از مدل شبیه‌سازی الاستوپلاستیک ۳۲ نیوتن به دست آمد که با نتایج آزمایش‌های سایر محققان تطابق خوبی دارد.

نتیجه‌گیری کلی

۱- با وجود آنکه تفاوت قطرهای اصلی میوه سیب رقم رد دلشز ناچیز است ولی انحنای سطح در قسمت‌های مختلف آن دارای اختلاف نسبتاً شدید است، لذا در نظر گرفتن کره به جای شکل میوه واقعی می‌تواند خطای شبیه‌سازی را افزایش دهد.
 ۲- مدل دوخطی ایزوتروپیک با معیار شکست ون مایرز برای تعریف رفتار غیرخطی و لهیدگی گوشت میوه سیب مناسب تشخیص داده شد.
 ۳- نتایج توزیع فشار در سطح تماس میوه با صفحه بارگذاری نشان داد که بیشینه فشار تماسی قبل از نقطه شکست در

مالی این پژوهش را توسط طرح پژوهشی به شماره تصویب نامه ۲۵۹ پ مورخ ۸۷/۳/۲۵ تامین نموده‌اند، سیاسگزاری می‌نمایند.

بدین وسیله نگارندگان از حوزه معاونت محترم پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد که بخشی از منابع

REFERENCES

- Afkari Sayyah, A.H., Esmailian, M., Minaei, S. & Pirayesh, A. (2008). The Effect of Mechanical Loads on Apple Damage after Storage. *JFST*, 5(2), 37-44. (In Farsi)
- American Society of Agricultural Engineering (ASAE). (2003). ASAE standard, Compression Test of Food Material of Convex Shape. *ASAE S368.4 DEC00*.
- ANSYS Help System., (2004) Analysis Guide and Theory Reference. Ver 8.
- Beer, F., Johnston, R. & DeWolf, J. (2005). *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill Science.
- Brown, G. K., & Segerlind, L. J. (1975). Location probabilities of surface injuries for some mechanical harvested apples. *Transactions of the ASAE*, 18, 57-61.
- Cardenas-Weber, M., R. L. Stroshine, K. Haghghi, & Y. Edan. (1991). Melon Material Properties and Finite Element Analysis of Melon Compression with Application to Robot Gripping. *Transactions of the ASAE*, 34 (3), 920-929
- Chen, H., De Baerdemacker, J., Bellon, V. (1996). Finite Element Study of The Melon For Nondestructive Sensing of Firmness. *Transactions of The ASAE*, 39(3), 1057-1065.
- Dintwa, E., Van Zeebroeck, M., Ramon, H., & Tijskens, E. (2008). Finite element analysis of the dynamic collision of apple fruit. *Postharvest Biology & Technology*, 49, 260-276.
- Hyde, G.M., Baritelle, A.L., & Varith, J., (2001). Fruit and vegetable conditioning to improve impact bruise threshold. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*, Potsdam, Germany, September 11-14.
- Johnson, D.S., & Dover, C. J., (1990). Factors influencing the bruise susceptibility of Bramley's seedling apples. In: *Proceedings of the European Workshop on Impact Damage of Fruits and Vegetables, Zaragoza*, Spain, pp. 87- 93.
- Kupferman, E. (2006). Minimizing bruising in apples, Postharvest Information Network, Washington State University, Tree Fruit Research and Extension Center.
- Lewis, R., Yoxall, A., Marsall, M. B., & Canty, L. A. (2007) Characterising pressure and bruising in apple fruit., *Wear*, 264(1-2), 37-46. .
- Lu, R., & Abbott, J. A. (1997). "Finite element modeling of transient responses of apples to impulse excitation, *Transactions of the ASAE*., 40, 395-409.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical Properties of Food and Agricultural Materials*, 2nd Revised and Update Edition, Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- Nourain J. , Ying Yi-bin, Wang Jian-ping , Rao Xiu-qin, & YU Chao-gang. (2005). Firmness Evaluation of Melon Using Its Vibration Characteristic and Finite Element Analysis. *Journal of Zhejiang University Science*, 6B(6), 483-490
- Rahemi, M. (2005). *Postharvest An Introduction to the Physiology and Handling of Fruit, Vegetables and Ornamentals*. Shiraz University Press. (In Farsi)
- Sitkei, G. (1986). *Mechanics of Agricultural Materials*. Elsevier, Amsterdam.
- Siyami, S., Brown, G. K., Burgess, G. J., Gerrish, J. B., Tennes, B. R., Burton, C.L., & Zapp, R.H. (1988). Apple impact bruise prediction models. *Transactions of the ASAE*, 31, 1038-1046.
- 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.
- United States Department of Agriculture (USDA). (2002). United States Standards for Grades of Apples, Washington, D. C.
- Van Lancker, J. (1979). Bruising of unpeeled apples and potatoes in relation with temperature and elasticity. *Lebensmittel Wissenschaft Technologie*, 12, 157-161.
- Van Zeebroeck M., Van Linden, V., Darius, P., De Ketelaere, Ramon, H., & Tijskens, E. (2007). The effect of fruit factors on the bruise susceptibility of apples. *Postharvest Biology and Technology*, 46, 10-19.
- Van Zeebroeck, M. (2005). The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling. PhD thesis No. 643. Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven.
- Wang R. Jiao Quying & Wei Deqiang. (2004). on the Mechanical Damage of Grape Using Finite Element Analysis. *ASAE/CSAE Annual International Meeting*. Canada