

پیش‌بینی لهیدگی داخلی طالبی با مدل غیرخطی المان محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس

اسماعیل سیدآبادی^۱، مهدی خجسته‌پور^{۲*}، حسن صدرنیا^۳

۱. مربی دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل

۲. دانشیار گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استادیار گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۰/۷)

چکیده

در میوه طالبی به دلیل پوست نسبتاً سخت و گوشت نرم آن، لهیدگی بافت‌های داخلی شایع‌ترین نوع آسیب مکانیکی است که در ظاهر قابل تشخیص نیست و پیش‌بینی آن به روش‌های تحلیلی سخت است. از حل غیرخطی مسئله بارگذاری استاتیکی میوه در جهت طولی بین دو صفحه موازی با روش المان محدود و با نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) برای پیش‌بینی لهیدگی داخلی طالبی استفاده شد. تغییر شکل‌های اعمال شده به مدل ۵/۵، ۱۱، و ۱۶/۵ میلی‌متر معادل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد تغییر شکل تخریب بود. تحلیل تنش‌های وارد بر پوست و گوشت میوه نشان داد که بافت داخلی میوه در ۲۰ درصد تغییر شکل تخریب یا نیروی معادل ۹۰ نیوتن به حد تسلیم رسیده است و گسیختگی داخلی آغاز می‌شود و این حالت در ظاهر میوه قابل رؤیت نیست. رابطه قوی بین نیروی پیش‌بینی شده توسط مدل المان محدود و نیروی FEM اعتبار مدل ($R^2=0.983$) واقعی را تصدیق کرد.

کلیدواژگان: آسیب مکانیکی، روش المان محدود، مدل‌سازی غیرخطی، میوه طالبی، نرم‌افزار آباکوس.

مقدمه

محصولات کشاورزی و از جمله طالبی در فرایند برداشت و پس از برداشت تحت تأثیر نیروهای متفاوتی قرار می‌گیرند. اگر مقدار این نیروها به حد مشخصی برسد، باعث ایجاد آسیب‌های مکانیکی و در نتیجه ضایعات محصول می‌شوند (FAO, 1989). با بررسی رفتار مکانیکی محصولات کشاورزی می‌توان بار مجاز را تعیین کرد و در طراحی ماشین‌های مرتبط در نظر گرفت. 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 تغییر شکل‌های 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 آن بیشتر باشند، تغییر شکل‌ها 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.

طالبی (رقم تیل مگسی خراسان) به دلیل داشتن انواع ویتامین‌های A، B، C و درصد بالای قند از پرتفردارترین میوه‌های تابستان است و محبوبیت خاصی بین مردم دارد (Seyedabadi *et al.*, 2011b). این میوه به دلیل گوشت نرم و پوست نسبتاً ضخیم و سفت میوه در فرایندهای برداشت و انتقال به بازار دچار لهیدگی داخلی می‌شود که در ظاهر میوه قابل تشخیص نیست. این نوع آسیب در بسیاری از میوه‌ها همچون سیب و گلابی به صورت تغییر رنگ در بافت‌های زیر پوست دیده می‌شود. برای ایمن‌ماندن میوه از لهیدگی داخلی باید تنش‌های وارد بر قسمت‌های داخلی از حد تسلیم آن تجاوز نکند. لکن تعیین تنش‌های داخلی با روش‌های معمول بسیار سخت است ولی می‌توان آن‌ها را با روش المان محدود (FEM) تخمین زد (Miranda *et al.*, 2008).

روش المان محدود (Finite element method) روشی عددی است که می‌توان آن را برای حل مسائل پیچیده مهندسی و تحلیل تنش‌های وارد به جسم بارگذاری شده استفاده کرد. مسائلی که با روش‌های معمولی تحلیلی قابل حل نیست و یا مستلزم انجام آزمایش‌های پرهزینه‌اند، با مدل‌سازی توسط این روش به حل قابل قبولی می‌رسند (Rao, 2005).

روش المان محدود مورد توجه بسیاری از محققان برای پیش‌بینی رفتار محصولات کشاورزی در مقابل بارهای مکانیکی

ارزیابی مدل المان محدود، نتایج پیش‌بینی مدل با آزمایش عملی بارگذاری میوه مقایسه شدند.

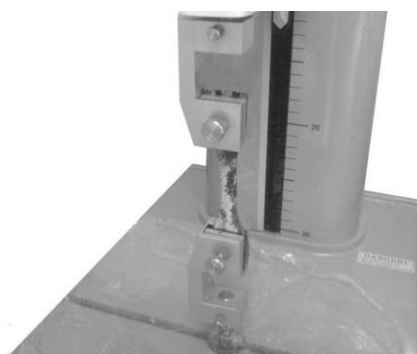
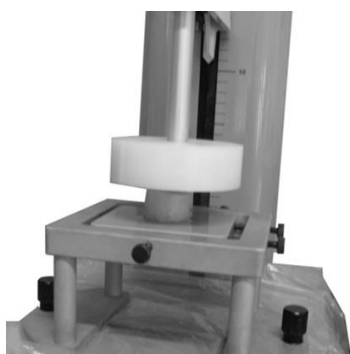
مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها و تعیین خواص مکانیکی

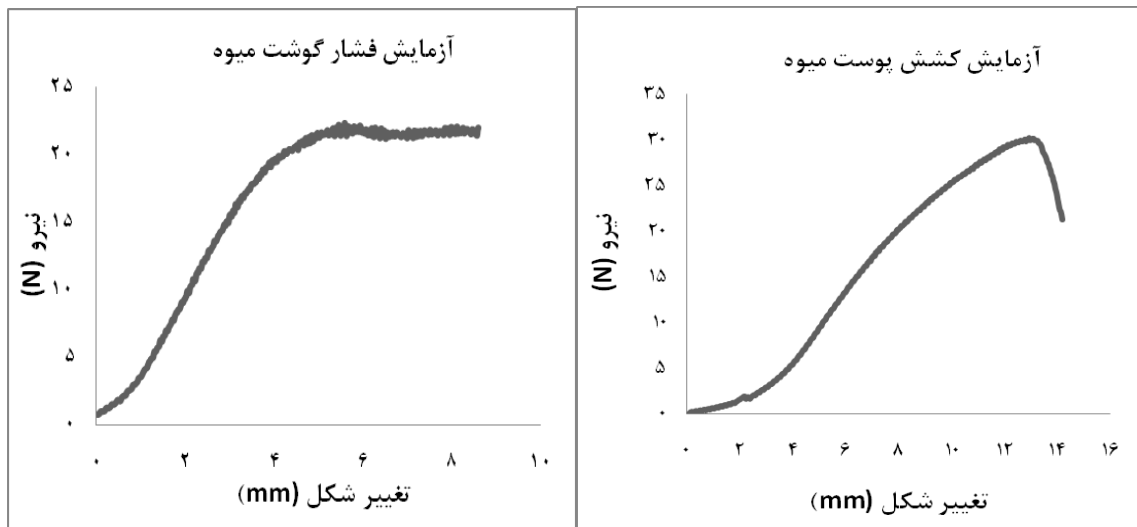
به‌منظور تعیین خواص مکانیکی پوست و گوشت رقم تیل مگسی طالبی تعداد ۳۰ نمونه از مزارع شهرستان نیشابور انتخاب شد و به مدت ۲۴ ساعت در سردخانه با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (Hurst, 1999). تنش تسلیم بیولوژیکی (Bioyield)، ضریب کشسانی، و نسبت پواسون به‌عنوان مهم‌ترین خواص مکانیکی برای مدل‌سازی پوست و گوشت میوه لازم است. در این تحقیق با آزمون فشار تک‌محوره برای گوشت میوه این خواص تخمین زده شد ولی در مورد پوست میوه به‌دلیل ضخامت کم نمونه‌ها از آزمون کشش تک‌محوره استفاده شد. نمونه‌های فشاری گوشت میوه به‌شکل استوانه‌ای با ارتفاع ۲۰ و قطر ۳۰ میلی‌متر با ابزار مخصوص تهیه شدند. برای هر میوه این نمونه‌ها از محل دم، گل، و دو نقطه روبرو روی بدنه به‌دست آمدند. نمونه‌های کششی پوست میوه از یک قطاع روی آن با ابزار مخصوص تهیه شدند. این نمونه‌ها به‌صورت I شکل است و قسمت میانی آن دارای طول ۲۵ میلی‌متر، عرض ۸ میلی‌متر، و ضخامت ۲ میلی‌متر است. نسبت پواسون با روش پردازش تصویر و از نسبت کرنش جانبی به کرنش طولی در محدوده الاستیک به‌دست آمد (Hassanpour et al., 2011; Kabas et al., 2008). برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه آزمون کشش-فشار اینسترون مدل QTS 25 مجهز به لودسل ۲۵ کیلوگرم با دقت ۰/۰۰۱ نیوتن در نیرو و ۰/۰۰۱ میلی‌متر در تغییر شکل استفاده شد. سرعت بارگذاری با توجه به استاندارد موجود برابر ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شد (ASAE, 2008). در شکل ۱ آزمایش کشش و فشار بر نمونه‌های پوست و گوشت میوه و در شکل ۲ منحنی‌های نیرو-تغییر شکل متناظر دیده می‌شوند.

قرار گرفته است. Kim et al. (2008) تنش‌های وارد بر میوه سیب در هنگام تحمل نیروی فشاری بین دو صفحه موازی را با این روش مدل‌سازی کردند. Hernandez & Belles (2007) رفتار مکانیکی دانه آفتابگردان را با روش المان محدود بررسی کردند. Kabas et al. (2008) تنش‌های وارد بر گوجه‌فرنگی در اثر سقوط از ارتفاع مشخص را با روش المان محدود محاسبه کردند. Sadrnia et al. (2008) لهیدگی داخلی هندوانه‌های رقم کریمسون سوئیت و چارلستون گری را با روش المان محدود پیش‌بینی کردند. برخی از محققان آسیب‌های داخلی گوجه‌فرنگی را که در معرض فشار باری قرار دارد با این روش پیش‌گویی کردند (Li et al., 2013). Petru et al. (2012) خواص مکانیکی نوعی دانه روغنی (Jatropha Curcas) را در سه مرحله از دوره رشد در بارگذاری فشاری با روش المان محدود مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که روش FEM در بهینه‌سازی و طراحی دستگاه روغن‌کشی می‌تواند مفید واقع شود. Khodabakhshian et al. (2015) با ارائه مدلی بر پایه FEM خواص مکانیکی بذر کدو در بارگذاری فشاری بین دو صفحه موازی را مطالعه کردند. آنها گزارش کردند که نتایج آزمون‌های تجربی با مدل المان محدود تطابق بالایی دارند. همچنین تغییر شکل رقم گلدن دلشیز سیب هنگام سقوط با روش المان محدود شبیه‌سازی شده است (Celik et al., 2011).

در این تحقیق بارگذاری استاتیکی طالبی بین دو صفحه موازی به روش المان محدود غیرخطی و با نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS)، مدل‌سازی و رفتار مکانیکی میوه تحلیل شد. در حالت کلی نرم‌افزار آباکوس برای حل معادلات تعادل غیرخطی از روش عددی نیوتن استفاده می‌کند (Dassault Systems Simulia corp, 2008). در مدل طالبی، پوست و گوشت میوه با ابعاد هندسی دقیق و خواص مکانیکی متفاوت در نظر گرفته شد. تغییر شرایط مرزی به‌صورت افزایش سطح تماس میوه با افزایش بار وارد شده تعریف شد. با تحلیل تنش‌ها در مراحل گوناگون بارگذاری حداکثر نیروی مجاز برای طالبی تعیین شد. به‌منظور



شکل ۱. سمت راست: آزمایش کشش پوست میوه، سمت چپ: آزمایش فشار گوشت میوه



شکل ۲. منحنی نیرو-تغییر شکل گوشت و پوست میوه

تغییر شکل به طول اولیه نمونه می‌توان نمودار تنش کرنش را برای پوست و گوشت میوه به دست آورد (Abbott & Lu, 1996; Mohsenin, 1970). تنش و کرنش در نقطه تسلیم بیولوژیکی از نمودارها به دست آمد و به ترتیب معادل تنش گسیختگی و کرنش گسیختگی فرض شد (Sadrmnia et al., 2008). در جدول ۱ بخشی از خواص مکانیکی گوشت و پوست طالبی آمده است. با توجه به آن می‌توان به اختلاف قابل توجه استحکام آن‌ها پی برد. این خواص به تفصیل در پژوهش دیگری از نویسنده منتشر شده است (Seyedabadi et al., 2011c).

از نمودارهای نیرو-تغییر شکل می‌توان مقدار ضریب کشسانی ظاهری را برای پوست و گوشت میوه با استفاده از نظریه هوک از رابطه ۱ تعیین کرد.

$$E = \frac{F.L}{A.\Delta L} \times 10^3 \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه E ضریب کشسانی ظاهری بر حسب KPa، F نیروی وارد به نمونه‌ها در حد کشسان بر حسب N، ΔL میزان تغییر طول نمونه در طی بارگذاری بر حسب mm، L طول اولیه نمونه‌ها بر حسب mm، و A سطح مقطع اولیه نمونه‌ها بر حسب mm^2 است. با تقسیم مقادیر نیرو به سطح مقطع نمونه و مقادیر

جدول ۱. میانگین و انحراف استاندارد خواص مکانیکی گوشت و پوست طالبی

نسبت پواسون	ضریب کشسانی (KPa)	کرنش تسلیم	تنش تسلیم (KPa)	
۰/۳۳۸±۰/۱۱	۱۶۶/۱۸±۱۴/۷	۰/۱۹۲±۰/۰۲	۲۹/۵۲±۳/۸	گوشت میوه
۰/۳۳۴±۰/۰۰۹	۱۱۹۸۵±۱۰۲/۶	۰/۱۵۳±۰/۰۱۹	۱۸۲۳±۶۴/۷	پوست میوه

منظور ۵ عدد طالبی سالم، بدون ترک سطحی، و با ابعاد تقریباً هم‌اندازه با ابعاد مدل انتخاب شد و بین دو فک موازی متصل به دستگاه اینسترون قرار گرفت. بارگذاری فشاری با سرعت ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه در راستای طولی میوه (امتداد گل-دم) انجام شد و تا شکافتن پوست خارجی میوه که به صورت ایجاد ترک آنی بود، ادامه می‌یافت (ASAE, 2008). نمودار نیرو-تغییر شکل به دست آمده برای ارزیابی مدل، مطالعه شد.

مدل‌سازی هندسی

اولین قدم در مدل‌سازی المان محدود ایجاد مدلی هندسی دقیق است. به دلیل اهمیت بالای این موضوع در تهیه ۳۰ عدد

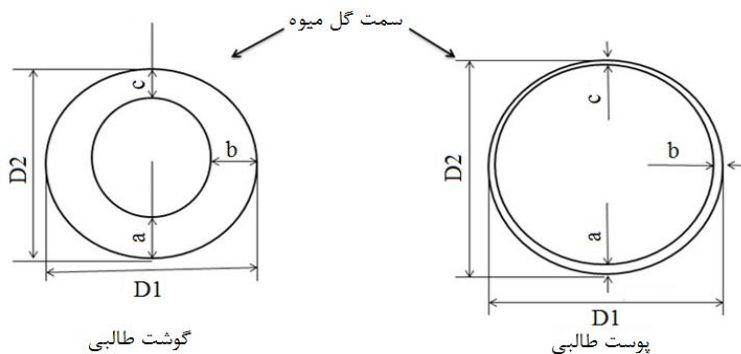
در مدل المان محدود بارگذاری میوه کامل، جنس پوست، و گوشت میوه به صورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته شد. خواص الاستیک خطی با وارد کردن ضریب کشسانی و نسبت پواسون تعریف می‌شود. برای تعریف خواص پلاستیک، از منحنی تنش-کرنش و در محدوده سخت‌شوندگی (Hardening) به صورت تصادفی نقاطی انتخاب، تنش و کرنش پلاستیک متناظر آن نقاط به نرم‌افزار وارد شد.

آزمایش تجربی بارگذاری میوه کامل

به منظور بررسی فرایند شکست میوه کامل و ارزیابی مدل المان محدود، آزمایش تجربی بارگذاری میوه کامل انجام شد. بدین

اندازه‌گیری شد تا در ساخت مدل هندسی استفاده شود (Seydabadi et al., 2011a). در شکل ۳ و جدول ۲ میانگین و انحراف استاندارد ابعاد میوه، ضخامت پوست، و گوشت میوه در محل دم، گل، و بدنه میوه نشان داده شده است. ضخامت گوشت و پوست در سمت گل کم‌ترین و در سمت دم بیش‌ترین است.

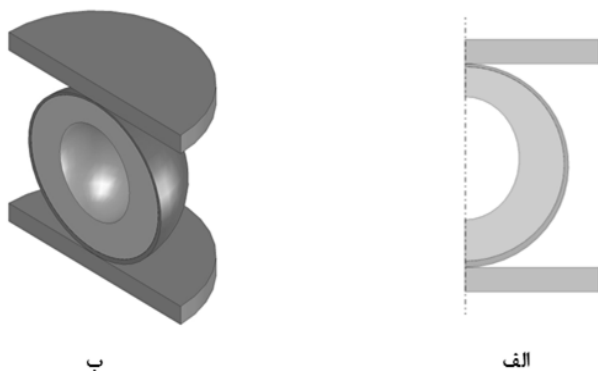
طالبی برای اندازه‌گیری خواص هندسی دقت شده است که از نمونه‌های هم‌شکل و تقریباً هم‌اندازه استفاده شود. نمونه‌ها به صورت کره دوسرپهن در نظر گرفته‌شد و ابعاد هندسی آن‌ها در سه جهت عمود بر هم به وسیله کولیس اندازه‌گیری شدند. ضخامت پوست و گوشت میوه در محل گل، دم، و دو نقطه روبرو بر بدنه آن با کولیس تعیین شدند. همچنین شعاع انحنا میوه در محل گل، دم، و چند نقطه روی بدنه آن با ابزار مخصوص



شکل ۳. دو قطر اصلی (D1 و D2) و ضخامت در سمت دم، بدنه، و گل (a، b، c) برای پوست و گوشت طالبی

جدول ۲. میانگین و انحراف استاندارد ابعاد تعریف شده برای گوشت و پوست طالبی (mm)

c	b	a	D2	D1	
18/6 ± 1/1	30/2 ± 2/6	23/6 ± 2/0	124 ± 11/9	133/6 ± 16/3	گوشت میوه
1/6 ± 0/1	2/6 ± 0/2	3/8 ± 0/4	129/4 ± 12/3	138/8 ± 16/6	پوست میوه



شکل ۴. الف) مدل متقارن محوری بارگذاری طالبی، ب) نمای برش خورده مدل سه‌بعدی

شبکه‌بندی (مش‌بندی)

چون مدل المان محدود در حالت تقارن محوری است باید از المان‌های مخصوص این حالت که دوبعدی هستند، استفاده شود. در مش‌بندی پوست و گوشت طالبی از المان‌های نوع CAX8R استفاده شده است. این المان‌ها مستطیلی هستند و از ۸ گره تشکیل شده‌اند. در واقع علاوه بر گره‌های گوشه، گره دیگری در وسط اضلاع وجود دارد که امکان استفاده از تابع شکل غیرخطی (درجه ۲) را برای درون‌یابی میسر می‌کند

با توجه به اینکه طالبی در امتداد گل-دم تقارن هندسی دارد می‌توان مدل‌سازی را به صورت تقارن محوری در نظر گرفت و بنابراین در محیط دوبعدی آن را ایجاد کرد، مشروط بر آنکه نیروی اعمال شده در همان امتداد باشد. در این صورت حجم محاسبات کاهش و دقت آن افزایش می‌یابد. برای بارگذاری در هر امتدادی غیر از راستای تقارن باید از مدل‌های سه‌بعدی استفاده شود. مدل‌سازی پوست و گوشت میوه در محیط پارت (Part) نرم‌افزار آباکوس و در حالت تقارن محوری انجام شد. همچنین دو صفحه صلب در بالا و پایین میوه برای اعمال نیروی فشاری ایجاد شد. تماس رویه داخلی پوست و رویه خارجی گوشت میوه با قید Tie انجام گرفت. با اعمال این قید گره‌های مجاور پوست و گوشت جابه‌جایی‌های یکسانی خواهند داشت. همچنین به منظور تعریف تماس صفحات فشار با میوه در همان محیط و از قید تماسی (Surface to surface contact) استفاده شد. با اعمال این قید، جابه‌جایی گره‌های مربوط به المان‌های تماسی با جابه‌جایی صفحه فشار برابر می‌شود و در طی بارگذاری با توجه به خواص مکانیکی میوه بر تعداد المان‌های تماسی افزوده می‌شود. در شکل ۴ مدل متقارن محوری و مدل سه‌بعدی معادل آن نشان داده شده است.

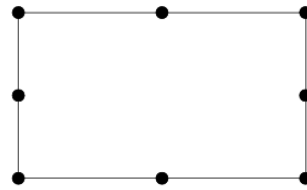
به میزان ۴/۵ میلی‌متر (۱۰ درصد تغییر شکل تخریب) صفحه بالایی در جهت Y- حرکت می‌کند. همچنین به منظور افزایش دقت، بارگذاری هر مرحله در ۵۰ نمو (Increment) صورت گرفت. در طی بارگذاری با افزایش نیرو، تغییرات سطح تماس میوه با صفحات موازی براساس خواص مکانیکی تعریف‌شده محاسبه و در نمو بعدی در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب در هر نمو یک بار و در طی بارگذاری مجموعاً ۳۰۰ بار مسئله حل و نتایج آن ذخیره می‌شود. نیروهای گره‌ای و تنش‌های واردشده به المان‌ها بخشی از نتایج حل مسئله هستند که در پیش‌بینی رفتار میوه در مقابل آسیب‌های مکانیکی استفاده می‌شوند.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های بارگذاری میوه کامل نشان می‌دهد که نیروی شکست میوه کامل و تغییر شکل متناظر آن به ترتیب $730 \pm 185 \text{ N}$ و $45 \pm 8 \text{ mm}$ هستند. در شکل ۷ منحنی نیرو-تغییر شکل مربوط به بارگذاری میوه کامل نشان داده شده است. با توجه به منحنی می‌توان نتیجه گرفت که در تغییر شکل 45 mm (۳۵ درصد طول میوه) و یا نیرویی معادل 730 N شکستن میوه (تخریب) اتفاق می‌افتد. در واقع اگر طالبی به اندازه 45 mm تغییر شکل یابد، تنش‌های ایجادشده در پوست میوه به حد گسیختگی می‌رسند. اما واقعیت این است که در تغییر شکل‌های خیلی کمتر از آن در بافت‌های داخلی میوه گسیختگی رخ داده است. مطابق شکل، ترک خوردن آبی پوست میوه همراه با خروج مقدار شایان توجهی آب از داخل میوه در هنگام شکست آن، این مسئله را تأیید می‌کند.

با روش المان محدود می‌توان تنش‌های وارد بر نقاط گوناگون میوه را در طی بارگذاری بررسی و آغاز گسیختگی داخلی را برآورد کرد. بدین منظور در بارگذاری‌های معادل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد تغییر شکل تخریب، تنش‌های ایجادشده در نقاط گوناگون میوه با تنش تسلیم به‌دست‌آمده برای پوست و گوشت میوه براساس معیار تسلیم فون مایزز (Von Mises) مقایسه شدند. این معیار تسلیم برای مواد کشاورزی پیشنهاد شده است (Liu, 1989; Cardenas-Weber, 1991). شکل‌های ۸ و ۹ توزیع تنش‌های وارد بر گوشت و پوست طالبی در بارگذاری‌های معادل ۱۰ و ۲۰ درصد تغییر شکل تخریب ($4/5 \text{ mm}$ و 9 mm) را نشان می‌دهد. حداکثر تنش در قسمت‌های قرمز رنگ بوده و به ترتیب $25/1 \text{ KPa}$ و $30/1 \text{ KPa}$ برای گوشت میوه و $763/4 \text{ KPa}$ و $857/3 \text{ KPa}$ برای پوست میوه است. حد تسلیم برای گوشت و پوست طالبی با توجه به جدول ۱ به ترتیب $29/52 \text{ KPa}$ و 11823 KPa است. با بررسی توزیع تنش در پوست و گوشت میوه و مقایسه آن با حد تسلیم ماده

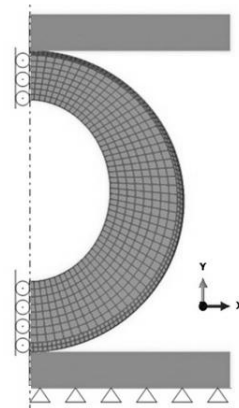
(شکل ۵). برای مش‌بندی پوست ۲۹۷ المان و ۱۰۹۶ گره و برای گوشت ۴۰۸ المان و ۱۳۴۳ گره تشکیل شد.



شکل ۵. المان CAX8R استفاده‌شده برای مش‌بندی

تعریف شرایط مرزی و بارگذاری

در روش المان محدود، شرایط مرزی می‌تواند نتایج را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار دهد. در واقع هرچه شرایط مرزی تعریف‌شده به واقعیت نزدیک‌تر باشد، جواب‌های معتبرتری به‌دست خواهد آمد. در مسئله فشار میوه کامل بین دو سطح موازی این شرایط به نحوی است که گره‌های واقع بر میوه که در تماس با سطح پایینی هستند، در سه جهت اصلی حرکتی ندارند و گره‌های در تماس با سطح بالایی به صورت یکسان و باهم به سمت پایین در حرکت هستند؛ و در طی بارگذاری بر تعداد این گره‌ها افزوده می‌شود. چون در این تحقیق مدل‌سازی به صورت تقارن محوری انجام شده است، بنابراین شرایط مرزی در محیط دوبعدی تعریف می‌شوند. از آنجاکه صفحه فشار پایینی ثابت است، جابه‌جایی آن در دو جهت X و Y و همچنین چرخش آن حول محور Z مقید شد. همچنین گره‌های پوست و گوشت میوه که روی محور تقارن قرار دارند در جهت X (افقی) مقید شده‌اند و فقط می‌توانند در راستای Y (قائم) حرکت داشته باشند. این حالت در شکل ۶ نشان داده شده است.



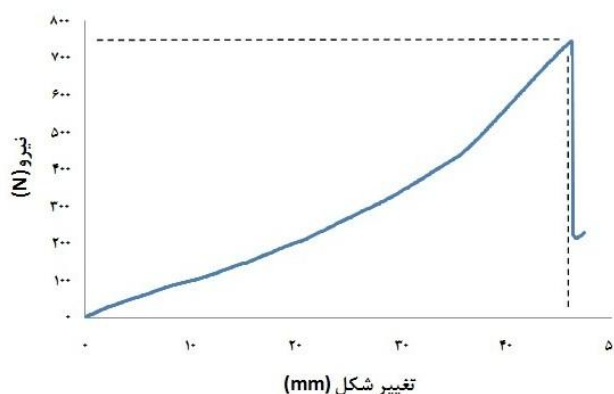
شکل ۶. شرایط مرزی تعریف‌شده برای مدل

با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس و هدف مسئله که مدل‌سازی جابه‌جایی‌های بزرگ در میوه است، بارگذاری میوه به صورت تعریف جابه‌جایی معلوم در صفحه فشار بالایی انجام شد. بارگذاری در شش مرحله (Step) انجام شد و در هر مرحله

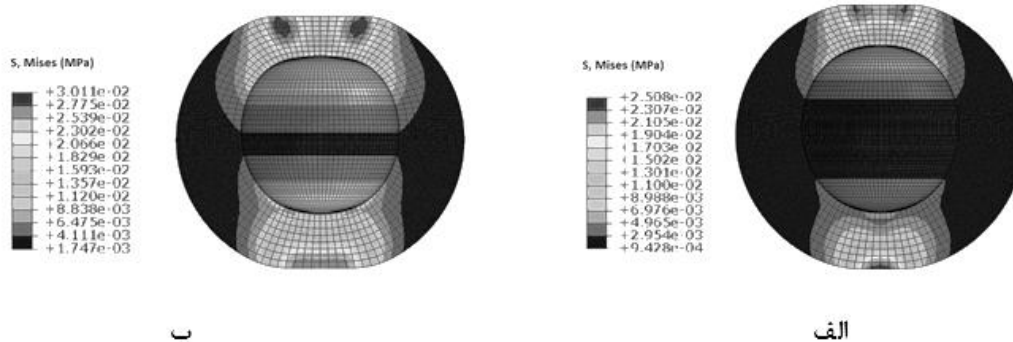
در شکل ۱۰ توزیع تنش‌های وارد بر پوست و گوشت میوه در ۳۰ درصد تغییر شکل تخریب (۱۳/۵mm) نشان داده شده است در این وضعیت از بارگذاری، حداکثر تنش وارد بر گوشت و پوست میوه به ترتیب ۳۱/۹KPa و ۱۱۷۵KPa هستند. به عبارت دیگر تنش‌های وارد بر پوست میوه هنوز به حد تسلیم نرسیده‌اند ولی قسمت‌های بیشتری از گوشت میوه دچار آسیب‌های داخلی شده‌اند.

می‌توان نتیجه گرفت که تنش‌های وارد بر پوست میوه به حد تسلیم نرسیده ولی در ۲۰ درصد تغییر شکل تخریب در بخش‌هایی از گوشت میوه تنش‌ها به حد تسلیم رسیده است و گسیختگی شروع می‌شود. با توجه به شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که ۲۰ درصد تغییر شکل تخریب در نیروی ۹۰ نیوتن اتفاق می‌افتد. این نیرو می‌تواند از وزن ۷ عدد طالبی که در جعبه روی هم قرار گرفته باشند، ایجاد شود (Seyedabadi *et al.*, 2011b).

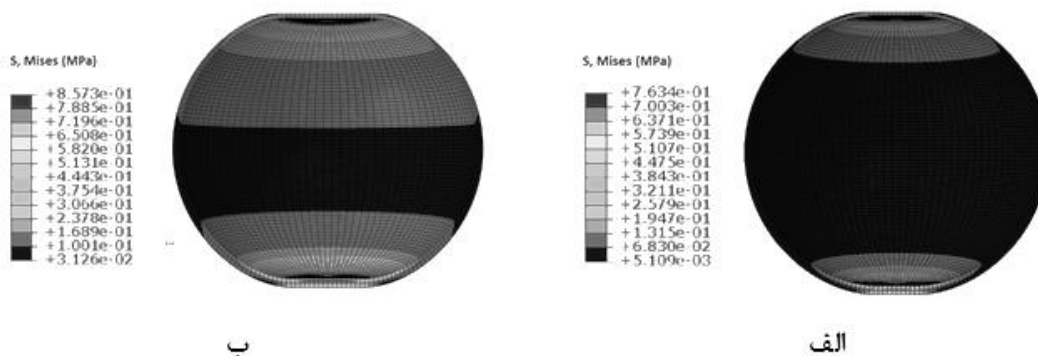
آزمایش تجربی بارگذاری میوه کامل



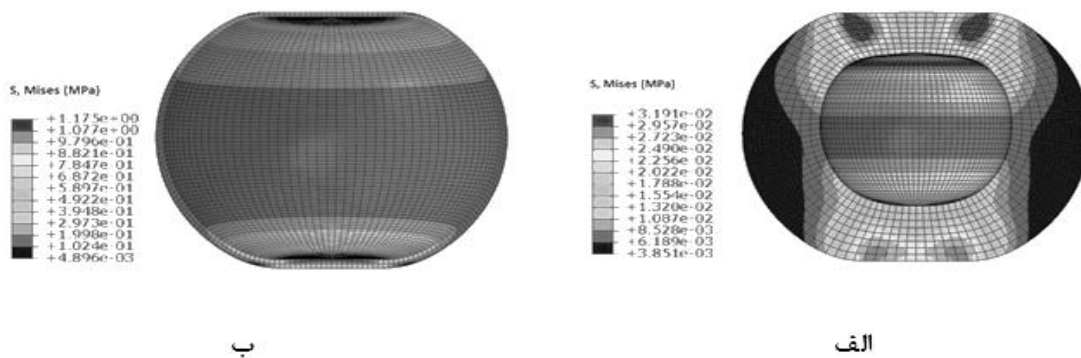
شکل ۷. آزمایش فشار میوه کامل طالبی



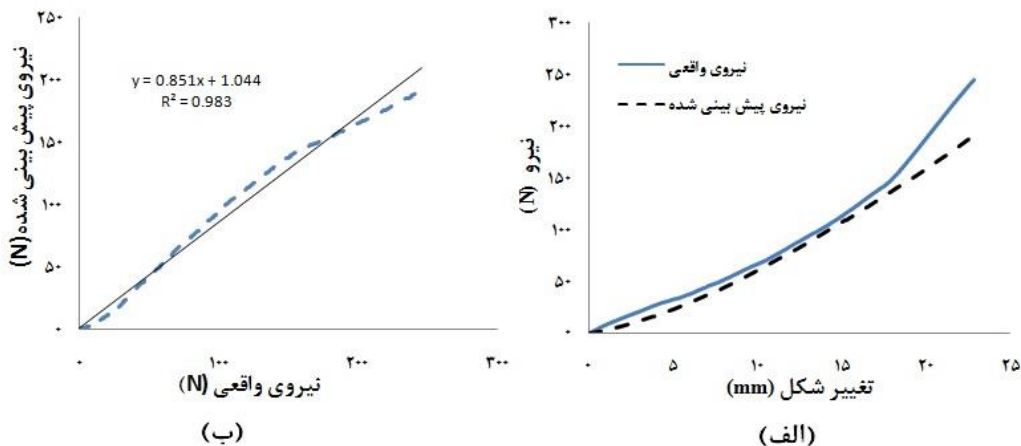
شکل ۸. توزیع تنش‌های وارد بر گوشت طالبی: الف) ۱۰ درصد تغییر شکل تخریب، ب) ۲۰ درصد تغییر شکل تخریب



شکل ۹. توزیع تنش‌های وارد بر پوست طالبی: الف) ۱۰ درصد تغییر شکل تخریب، ب) ۲۰ درصد تغییر شکل تخریب



شکل ۱۰. توزیع تنش در ۳۰ درصد تغییر شکل تخریب، الف) گوشت طالبی، ب) پوست طالبی



شکل ۱۱. الف) منحنی‌های نیرو-تغییر شکل واقعی و پیش‌بینی‌شده در بارگذاری میوه کامل طالبی، ب) رابطه نیروی پیش‌بینی‌شده توسط مدل و نیروی واقعی وارد بر میوه کامل طالبی

فشاری مجاز برای گوجه‌فرنگی را برابر ۱۰N اعلام کردند، زیرا در این وضعیت نیرویی لایه داخلی گوجه‌فرنگی (ocular gel) به حد تسلیم می‌رسد.

به‌منظور ارزیابی مدل المان محدود می‌توان از مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر شکل استفاده کرد (Emadi, 2015; Lu et al., 2006). بدین منظور تغییرات نیروی فشاری وارد بر صفحه فشار متحرک در مقابل جابه‌جایی آن از نرم‌افزار آباکوس استخراج شد. همچنین نمودار نیرو-تغییر شکل واقعی در آزمایش تجربی بارگذاری میوه قبلاً از دستگاه اینسترون تهیه شده است. شکل ۱۱-الف منحنی‌های نیرو-تغییر شکل واقعی و پیش‌بینی‌شده توسط مدل را نشان می‌دهد. مقدار نیروی پیش‌بینی‌شده توسط مدل تا ۴۰ درصد تغییر شکل تخریب (۱۸mm) با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد و خطای برآورد کمتر از ۹ درصد است. ولی در تغییر شکل‌های بعد از آن، دو منحنی از هم فاصله می‌گیرد و مقدار نیروی پیش‌بینی‌شده توسط مدل، کمتر از مقدار واقعی است. در تغییر شکل ۲۲/۵ میلی‌متر مقدار خطای برآورد به ۲۱ درصد می‌رسد. این خطا از رشته‌دانه میوه که در قسمت مرکزی آن قرار گرفته است، ایجاد می‌شود، زیرا این بخش در مدل‌سازی منظور نشده

توزیع تنش پوست و گوشت میوه در بارگذاری‌های گوناگون نشان می‌دهد که تنش‌های وارد بر گوشت میوه در ۲۰ درصد تغییر شکل تخریب به حد تسلیم می‌رسند، ولی پوست میوه حتی در ۳۰ درصد تغییر شکل تخریب به حد تسلیم نمی‌رسد. در واقع در ۲۰ درصد تغییر شکل تخریب گسیختگی داخلی میوه شروع می‌شود. هرچه بارگذاری بیشتر باشد نقاط بیشتری از گوشت میوه دچار لهیدگی می‌شوند. این نوع آسیب که لهیدگی داخلی نام دارد، در سایر میوه‌ها مثل سیب نیز دیده می‌شود با این تفاوت که در سیب محل‌های لهیده‌شده نزدیک پوست قرار دارند و بعد از گذشت چند ساعت این نقاط تغییر رنگ می‌دهند و به دلیل پوست نازک میوه دیده می‌شوند (Samim & Banks, 1992). در طالبی به دلیل بافت نرم‌تر قسمت‌های داخلی، لهیدگی در آنجا رخ می‌دهد و علاوه بر آن پوست میوه ضخامت بیشتری دارد و در نتیجه این نقاط در ظاهر دیده نمی‌شوند.

Sadrnia et al. (2008) آستانه نیرویی برای لهیدگی داخلی هندوانه را برابر ۱۰ درصد نیروی شکست آن، یا معادل ۹۲N و ۱۵۲N به ترتیب برای رقم‌های چارلستون گری و کریمسون سوئیت تعیین کردند. Li et al. (2013) حداکثر نیروی

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق بارگذاری استاتیکی میوه در نرم‌افزار آباکوس انجام شد و تنش‌های وارد بر پوست و گوشت میوه در طی بارگذاری تعیین و تحلیل شدند. نتایج نشان داد در ۲۰ درصد تغییر شکل تخریب تنش‌های وارد بر گوشت میوه به حد تسلیم می‌رسند و بافت‌های داخلی میوه گسیخته می‌شوند، درحالی‌که برای پوست میوه اتفاق خاصی نمی‌افتد. به‌منظور جلوگیری از آسیب‌رسیدن به بافت‌های داخلی میوه در حمل‌ونقل، باید نیروهای وارد به میوه در جهت طولی آن از N ۹۰ کمتر باشد. نتایج ارزیابی مدل نشان داد که روش المان محدود برای پیش‌بینی رفتار میوه در بارگذاری مفید است.

است و در تغییر شکل‌های کم، فضای خالی داخل میوه کمک می‌کند تا اثر این بخش کمتر باشد. ولی در تغییر شکل‌های زیادتر فضای خالی درون میوه کمتر و درواقع رشته‌دانه نیز فشرده می‌شود. باید توجه داشت که لهیدگی داخلی میوه در ۲۰ درصد تغییر شکل تخریب صورت می‌گیرد. بنابراین برای ساده‌سازی مدل، حذف رشته‌دانه فرض صحیحی است. شکل ۱۱-ب رابطه نیروی پیش‌بینی‌شده و نیروی واقعی را تا ۴۰ درصد تغییر شکل تخریب نشان می‌دهد. در برآزش یک خط بین داده‌ها ضریب تبیین بالا ($R^2=0/983$) نشان می‌دهد که رابطه خطی قوی بین نیروی پیش‌بینی‌شده و نیروی واقعی وجود دارد و بنابراین اعتبار مدل تأیید می‌شود.

REFERENCES

- Abbott, J.A., Lu, R., (1996). Anisotropic mechanical properties of apples. *Trans. of the ASAE*, 1451-1459.
- ASAE standard, (2008). Compression test of food material of convex shape. American Society of Agricultural Engineering, *ASAE S368.4 DEC2000* (R2008).
- Cardenas-Weber, M., Storoshine, R.L., Haghghi, K., Edan, Y. (1991). Melon material properties and finite element analysis of melon compression with application to robot gripping. *Transaction of ASAE*, 34, 920-929.
- Chen, H., DE Baerdemaeker, J. (1993). Finite element based modal analysis of fruit firmness. *Transactions of the ASAE*, 36(6), 1827-1833.
- Celik, H. K., Rennie, A. E. W., Akinci, I. (2011). Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering*, 104(2), 293-298.
- Dassault Systems Simulia corp. (2008). ABAQUS Theory manual, version 6.8, providence, RI, USA.
- FAO, (1989). Prevention of post-Harvest food losses in fruits, *vegetables and Root crops, Training Manual*. Rome, ITAIY.
- Hassanpour, A., Esmaili, M., Modarres, M. A., Rahmani, D. A., Nasiri, M., (2011). Determination of poisson's ratio and modulus of elasticity during maturation of white seedless grapes. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 6(4), 308-316. (In Farsi)
- Hernandez, L.F., Belles, P.M. (2007). A 3-D finite element analysis of the sunflower (*Helianthus annuus L.*) fruit. Biomechanical approach for the improvement of its hullability. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 861-869.
- Hurst, W. C. (1999). *Cantaloupe Specialty Melons*, The University of Georgia College of Agricultural and Environmental Sciences.
- 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.
- Khodabakhshian, R., Emadi, B. (2015). Development of a FEM model to determine mechanical behaviour of pumpkin seed. *International Journal of Food Properties*, 18(2), 231-240.
- 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 geometry. *Food Science and Technology Research*, 14(4), 329.
- Li, Z., Li, P., Yang, H., Liu, J. (2013). Internal mechanical damage prediction in tomato compression using multiscale finite element models. *Journal of Food Engineering*, 116(3), 639-647.
- Liu, M. (1989). *Mechanical properties of soybean during processing*. M.S. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Lu, R., Srivastava, A. K., Ababneh, H.A.A. (2006). Finite element analysis and experimental evaluation of bioyield probes for measuring apple fruit firmness. *Transactions of the ASABE*, 49(1), 123-131.
- Miranda, P., Pajares, A., Guiberteau, F. (2008). Finite element modelling as a tool for predicting the fracture behaviour of robocast scaffolds. *Acta Biomaterialia*, 4(6), 1715-1724.
- Mohsenin, N.N., (1970). *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach New York.
- Nourain, J., Ying, Y.B., Wang, J.P., Rao, X.Q., YU, C.G. (2005). Firmness evaluation of melon using its vibration characteristic and finite element analysis. *Journal of Zhejiang University Science*, B, 6(6), 483-490.
- Petru, M., Novak, O., Herak, D., Simanjuntak, S. (2012). Finite element method model of the mechanical behaviour of *Jatropha curcas L.* seed under compression loading. *Biosystem Engineering*, 111(4), 412-421.
- Rao, S. S. (2005) *Finite element analysis in engineering* (4th ed.). Pergamon Press, Oxford.

- Sadrnia, H., Rajabipour, A., Jafari, A., Javadi, A., Mostofi, Y., Kafashan, J., Dintwa, E., De Baerdemaeker, J. (2008). Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models. *Journal of Food Engineering*, 86(2), 272-280.
- Samim, W., Banks, N. H. (1992). Color changes in apple bruises over time. *Physiological Basis of Postharvest Technologies*. 343, 304-306.
- Seyedabadi, E., Khojastepour, M., Sadrnia, h., Saiedirad, M.H., (2011a). Determining and comparing the physical properties of two varieties of cantaloupe in Khorasan . Proceedings of 1st conference on Optimization of Production, Distribution and Consumption in the Food Industry, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Golestan, Iran, 10-11 May., (In Farsi)
- Seyedabadi, E., Khojastepour, M., Sadrnia, h., Saiedirad, M.H., (2011b). Mass modeling of cantaloupe based on geometric attributes: A case study for Tile Magasi and Tile Shahri. *Scientia Horticulturae*, 130(1), 54–59.
- Seyedabadi, E., Khojastepour, M., Sadrnia, h., Saiedirad, M.H., (2011c). Study of the mechanical properties of cantaloupe for reducing the losses. Proceedings of *1st National Conference in Agricultural Mechanization, Agriculture and Natural Resources* University of Ramin, Khuzestan, Iran, 16-18 Feb., (In Farsi)

