

ارزیابی مدل‌های مختلف محاسبه ویژگی‌های مکانیکی میوه نارنج تحت آزمون فشرده‌سازی به کمک پردازش تصویر

فاطمه کاظمی کرجی^۱ و سامان آبدانان مهدی‌زاده^{۲*}

چکیده

خصوصیات مهندسی محصولات کشاورزی مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده استانداردهای مناسب برای طراحی، تبدیل، پردازش و سیستم‌های بسته‌بندی هستند. به‌منظور تعیین ویژگی‌های مهندسی در محصولات کشاورزی (مدول یانگ و ضریب پواسون) روش‌های متعددی ارائه شده که در آن‌ها ویژگی‌های مهندسی محصولات کشاورزی اندازه‌گیری نشده است و صرفاً تخمین زده می‌شوند. لذا هدف از این پژوهش ساخت سامانه‌ای به‌منظور اندازه‌گیری تنش و نیروهای وارد بر میوه نارنج با استفاده از پردازش تصویر است. سطح تماس مؤثر میوه در معرض فشرده‌سازی با تحلیل تصاویر تعیین و با دیگر روش‌ها مقایسه شده است. مطابق نتایج، مساحت در روش ASABE در کرنش ۶ درصد با خطا ۷٪ اختلاف معنی‌داری با روش پردازش تصویر نداشت. نسبت پواسون و استحکام نمونه‌ها در مراحل کرنش به‌ترتیب افزایش و کاهش یافتند. E_x در کرنش ۳ درصد و E_y تا کرنش ۶ درصد در روش پردازش تصویر با ASABE اختلاف معنی‌داری نداشتند. به‌علاوه در کرنش ۳ درصد در مقادیر E_z بین روش‌های کپسول، پردازش تصویر و جعبه محدود اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. تفاوت معنی‌داری بین مقدار تنش در کرنش ۳ درصد بین روش‌های کپسول، پردازش تصویر، ASABE و جعبه محدود یافت نشد. از بین روش‌های ذکر شده، روش ASABE با کمترین خطا در کرنش ۶ درصد در مقایسه با پردازش تصویر به‌عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد.

واژه‌های کلیدی: پردازش تصویر، مساحت سطح تماس، نسبت پواسون، ویژگی‌های مکانیکی.

ارجاع: کاظمی کرجی ف. و آبدانان مهدی‌زاده س. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل‌های مختلف محاسبه ویژگی‌های مکانیکی میوه نارنج تحت آزمون فشرده‌سازی به کمک پردازش تصویر. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۹(۱): ۱۱۳-۱۲۴.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.

۲- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.

* نویسنده مسئول: s.abdanan@asnrkh.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۹

مقدمه

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده استانداردهای مناسب برای طراحی، تبدیل، پردازش و سیستم‌های بسته‌بندی به شمار می‌روند؛ خواص فیزیکی و مکانیکی شامل شکل، اندازه، تراکم، تخلخل، حجم توده میوه‌ها، مقاومت مکانیکی و نیروی شکست است (Akar & Aydin, 2005) علاوه بر ویژگی‌های یاد شده، استحکام میوه، ضخامت پوست و گوشت آن نیز از پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت میوه‌ها بوده که در صنایع غذایی حائز اهمیت است. اصولاً مقاومت کم میوه در برابر فشرده‌شدن منجر به تغییر شکل دائمی به خصوص بعد از زمان حمل و نقل می‌شود. در حال حاضر ارزیابی ثبات و استحکام محصولات کشاورزی، به‌صورت دستی یا خودکار با به‌کارگیری آزمون مگس تیلور¹ یا آزمون فشاری انجام می‌شود (Abdanan Mehdizadeh & Nadi, 2016).

از روش‌های بسیار پرکاربرد در تعیین ویژگی‌هایی مانند استحکام محصول می‌توان به استفاده از روش‌های شبیه‌سازی المان محدود (FEM)² و اجزای گسسته (DEM)³ اشاره نمود. روش المان محدود و اجزای گسسته روش‌های عددی هستند که به‌طور گسترده‌ای برای حل مشکلات پیچیده مهندسی مورد استفاده قرار گرفته که از آن جمله می‌توان به تعیین استحکام خربزه (Nourain et al., 2005) استحکام (Lu et al., 2006) و کیودی میوه سیب (Lewis et al., 2007)، پیش‌بینی آسیب مکانیکی در گوجه فرنگی تحت آزمایش فشرده‌سازی (Li et al., 2013)، اشاره نمود.

روش‌های عددی یاد شده نیازمند دریافت ویژگی‌های مهندسی محصولات کشاورزی هستند که می‌بایست اندازه‌گیری شود و به‌عنوان ورودی به این مدل‌ها داده شود. لذا محققین از دیرباز به دنبال روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های محصولات کشاورزی بوده‌اند که از آن جمله می‌توان از روش پردازش تصویر و بینایی ماشین نام برد. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به تعیین اندازه (Brodie & Schwoebel, 1994)، رنگ، شکل، و یا رسیدگی و جداسازی (Orak & Abdanan Mehdizadeh, 2017; Abdanan Mehdizadeh & SoltaniKazami,

2016)، تخمین حجم هندوانه با استفاده از تقریب بیضوی (Koc, 2007) و تعیین زمان بهینه تلخی زدایی در زیتون (SoltaniKazami et al., 2017) تعیین ویژگی‌های فیزیکی و آیرودینامیکی برخی ارقام گندم، جو، نخود و عدس (Gürsoy & Guzel, 2010)، تعیین ویژگی‌های فیزیکی- مکانیکی پس از برداشت پوست و میوه پرتقال در شرایط یخچال و محیط (Singh & Reddy, 2010) اشاره نمود. کاهش تلفات و حفظ کیفیت محصولات کشاورزی در صورتی ممکن است که ویژگی‌های محصول در طراحی اولیه ماشین‌ها در نظر گرفته‌شوند. شناخت محصولات کشاورزی این امکان را فراهم می‌سازد تا ماشین‌های جدید و سیستم‌های فرآوری با مشخصات کیفی اصلاح شده طراحی شوند، بنابراین ضایعات محصولات کشاورزی کاهش یافته و بهره‌وری افزایش می‌یابد. به‌منظور تعیین ویژگی‌های مهندسی در محصولات کشاورزی (مدول یانگ و ضریب پواسون) روش‌های متعددی ارائه شده که در این روش‌ها، ویژگی‌های مهندسی محصولات کشاورزی اندازه‌گیری نشده و صرفاً تخمین‌زده می‌شوند. از طرف دیگر روش‌های اندازه‌گیری به‌صورت (روش‌های مخرب) مستقیم مانند بارگذاری فشاری با فرض ثابت بودن مساحت محل اعمال نیرو و ثابت بودن تنش در ۳ جهت، به تخمین این پارامترهای می‌پردازند که فرضی کاملاً نادرست است. تمامی روش‌های ارزیابی مستقیم بر پایه دانش تجربی یا رابطه آماری بین خواص فیزیکی و بافت میوه هستند. به این ترتیب توسعه روشی به‌منظور تعیین ویژگی‌های مکانیکی میوه‌ها به‌صورت مستقیم از اهمیت بسزایی برخوردار است. لذا با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، و موفقیت پردازش تصویر در ارزیابی محصولات مختلف کشاورزی و غذایی، هدف از این پژوهش، طراحی و ساخت یک سامانه به‌منظور اندازه‌گیری تنش‌ها و نیروهای واردشده به میوه نارنج است که با استفاده از پردازش تصویر انجام شده است. بدین‌منظور سطح تماس مؤثر میوه در معرض نیروی فشرده‌سازی با تحلیل تصاویر تعیین شد و سپس با روش‌های ASABE، فرض ثابت بودن حجم میوه، جعبه محدود و کپسول مقایسه شده و نهایتاً نزدیک‌ترین روش به پردازش تصویر مشخص شد.

1- Magnes-Taylor (MT)

2- Finite Element Method

3- Discrete Element Method

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه

تعداد ۳۰۰ نمونه از نارنج‌های موجود در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان تهیه و سپس به یخچال منتقل شده و مورد آزمایش قرار گرفت. برای محاسبه تغییرات با توجه به شکل، اندازه، سن و ساختار سلولی میوه نارنج، به پیشنهاد استاندارد ASABE^۱ (2008) اندازه‌گیری هر یک از پارامترهای مورد آزمایش در ۲۰ تکرار انجام شد. آزمایش‌ها در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام پذیرفت.

آزمایش بارگذاری فشاری تک محوری میوه

برای انجام این آزمایش از دستگاه آزمون مواد (سرووالکتریکال، ساخت شرکت سنتام، ایران) استفاده شد. اندازه‌گیری نیرو در این دستگاه از طریق بارسنج‌های^۲ کرنش‌سنج‌دار s شکل انجام شده است. در این تحقیق از بارسنج ۵۰ نیوتن برای انجام آزمایشات استفاده شد. مطابق با تئوری هرتز^۳ و بر اساس استاندارد ASABE که برای اجسام کروی هست، آهنگ بارگذاری در این آزمایش ثابت و معادل ۱۵ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد (ASABE, 2008).

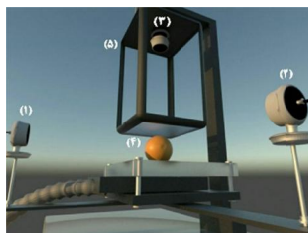
توسعه دستگاه آزمون مواد و تجهیز آن به سامانه

اخذ و تحلیل تصویر

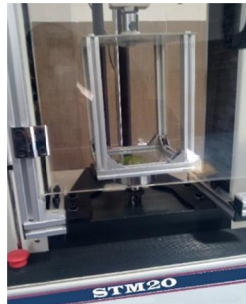
به منظور اندازه‌گیری تنش در محصولات کشاورزی، تعیین سطح تماس هنگام بارگذاری تک محوری لازم است. بدین منظور دستگاه آزمون با ساخت بخشی که امکان اضافه شدن آن به دستگاه موجود را داشت مجهز شد. بخش ساخته شده شامل سه وبکم به ترتیب در راستای محور های x، y و z و سامانه نورپردازی به منظور اخذ سه تصویر جداگانه در این سه راستا از میوه تحت آزمایش بود (شکل ۱). دوربین موجود در راستای محور z (Logitech، مدل e930e HD، تایوان) برای تصویربرداری برخط مساحت در خلال اعمال بار مکانیکی در نظر گرفته شد؛ دو دوربین دیگر (مدل viera VI-1101) در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از نمونه‌ها نصب شده و علاوه بر تصویربرداری

تغییرات مساحت به صورت برخط، میزان جابجایی در راستای x و y را نیز تصویربرداری می‌کردند. صفحه بالایی محل قرارگیری وبکم بود و صفحه پایینی از جنس شیشه شفاف با ضخامت ۳ میلی‌متر ساخته شد تا سطح تماس دقیق هر میوه را به راحتی تصویربرداری کند.

قسمت بالای جعبه به اندازه قطر پیچ دستگاه سنتام رزوه شد به صورتی که پیچ دستگاه درون آن قرار گرفت و محکم شد، همچنین دوربین در راستای z زیر آن و به وسیله چسب قرار گرفت. ارتفاع جعبه ۳۰ سانتی‌متر و طول و عرض آن ۲۰ سانتی‌متر بود. سامانه نورپردازی در بالای صفحه شیشه‌ای شفاف قرار داشت و یک صفحه سفید روی فک پایین دستگاه برای جداسازی بهتر نمونه از پس زمینه قرار گرفت.



الف



ب

شکل ۱- (الف) شماتیک دستگاه مورد استفاده؛ (۱، ۲ و ۳) دوربین در راستای x، y و z؛ (۴) نمونه؛ (۵) ساختار مستطیلی؛ (ب) شکل واقعی دستگاه

پردازش تصویر و تعیین مساحت تماس

سامانه‌ی بینایی ماشین طوری طراحی شده است که قادر به حذف اطلاعات غیرضروری و انجام پیش‌پردازش به صورت برخط است. در سامانه طراحی شده بعد از گسترش هیستوگرام و بهبود درجه‌ی تباين^۴ تصاویر، این تصاویر از RGB به خاکستری تبدیل شدند. سپس با آستانه‌گذاری تطبیقی (Amraee et al., 2017) بر روی

1- American Society of Agricultural and Biological Engineers

2- Load cell

۳- توضیحات در بخش پیش‌بینی منطقه تماس با استفاده از روش ASABE ذکر شده است.

برش داده شده و به کمک دوربین در راستای Z عکس‌برداری صورت گرفت. سپس مساحت تصاویر بر حسب پیکسل به حسب میلی‌متر مربع محاسبه شد. مجموع مساحت این اشکال باید با مساحت واقعی جسم برابر باشد. بر اساس نتایج به دست آمده خطای پردازش تصویر در محاسبه مساحت ۰/۰۸٪ حاصل شد.

تعیین کرنش در محصولات بارگزاری شده

هر نارنج با استفاده از صفحه مستطیلی با سرعت ثابت ۱۵ میلی‌متر بر ثانیه در راستای محور Z (عمود بر محور میوه) فشرده شد و جابه‌جایی در راستای محورهای x، y و z در راستای فشرده شد و کرنش محصول (E) از معادله (۲) به دست آمد (Kubík & Kažimírová, 2015):

$$e = \frac{\Delta_i}{D_{i0}} = \frac{D_i - D_{i0}}{D_{i0}} \quad (2)$$

که در این معادله D_i و D_{i0} به ترتیب ارتفاع اولیه و لحظه‌ای هر نمونه و Δ_i تغییر شکل عمودی آن است.

تعیین منطقه تماس با تجزیه و تحلیل عکس و جعبه

محدود

در این روش پس از اخذ عکس‌ها با استفاده از دوربین z کوچک‌ترین مستطیلی که می‌تواند این مساحت سطح تماس را محاط کند روی آن قرار می‌گیرد. برای به دست آوردن مستطیل، یک الگوریتم جستجو در ۴ جهت شکل را جست‌وجو کرده و نقاط برخورد به اولین پیکسل سفید را به دست می‌آورد. در نهایت پس از یافتن نقاط، قطر بزرگ و قطر کوچک به دست می‌آید. مستطیلی که روی شکل قرار می‌گیرد و ناحیه مورد نظر را محاط می‌کند، به‌عنوان نماینده مساحت در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این ترتیب شعاع محور اصلی (a_{BB}) و فرعی (b_{BB}) از منطقه تماس به دست آمده و ناحیه تماس A_{BB} بر اساس معادله (۳) حاصل می‌شود (ASABE, 2016).

$$A_{BB} = \pi a_{BB} b_{BB} \quad (3)$$

پیش‌بینی منطقه تماس با استفاده از روش ASABE

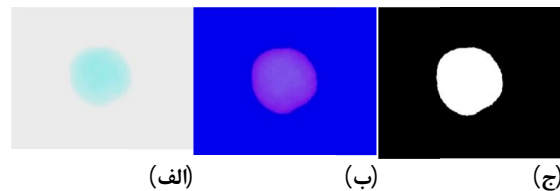
روش ASABE (ASABE, 2016) به‌عنوان یک روش عینی برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی مواد غذایی با شکل محدب است، که علاوه بر شعاع انحنا سطوح محدب در تماس با صفحه بالایی و پایینی به ضریب پواسون ظاهری مواد غذایی در حال فشرده‌سازی نیز بستگی دارد.

تصاویر خاکستری مساحت تماس تعیین و جداسازی شد. پس از بخش‌بندی، تصویر باینری برای یافتن منطقه مساحت تماسی، که تعداد پیکسل‌های سفید در تصاویر باینری است، پردازش شد. نهایتاً تمام ابعاد طولی از طریق تبدیل پیکسل به میلی‌متر، با استفاده از یک مرجع استاندارد متریک شدند.

به‌منظور استخراج سطح تماس ابتدا تصاویر از فضای RGB (شکل ۲- الف) به فضای HSV (شکل ۲- ب) منتقل شدند. سپس با اعمال آستانه‌گذاری سه‌بعدی (معادله (۱)) بر روی تصاویر، جداسازی سطح تماس صورت گرفت (شکل ۲- ج). نهایتاً با شمارش پیکسل‌های سفید در تصاویر باینری مساحت ناحیه تماس تعیین شد.

$$I_A = \begin{cases} 0.333 < H < 0.999 \\ 0.005 < S < 0.351 \\ 0.921 < V < 0.923 \end{cases} \quad (1)$$

که در این معادله H، متوسط فام رنگ [۰،۳۶۰]، S متوسط اشباع رنگ [۰،۱] و V متوسط مقدار رنگ [۰،۱] هستند.



شکل ۲- مراحل جداسازی منطقه تماس؛ (الف) تصویر در فضای RGB؛ (ب) تصویر در فضای HSV (ج) تصویر باینری

کالیبراسیون مساحت

برای تبدیل مساحت به واحد متریک از چند شاخص با مساحت‌های مشخص استفاده شد. بعد از جداسازی تصاویر از پس‌زمینه و شمارش تعداد پیکسل‌های سفید، مساحت بر حسب پیکسل مربع تعیین شد. سپس ضریب کالیبراسیون با تقسیم مساحت واقعی به مساحت بر حسب پیکسل محاسبه شد. نهایتاً به‌منظور محاسبه مساحت سطح تماس بر حسب میلی‌متر مربع، این شاخص در مساحت‌های اندازه‌گیری شده ضرب شد.

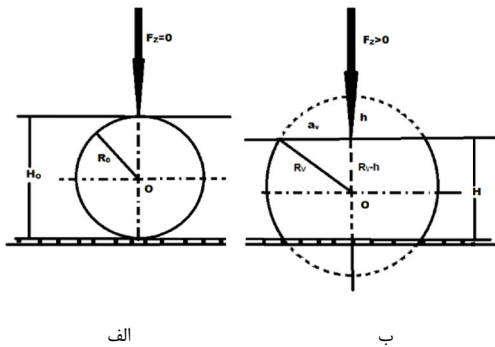
تعیین دقت پردازش تصویر در محاسبه مساحت

به‌منظور اعتبارسنجی روش پردازش تصویر در محاسبه مساحت، دایره‌هایی با مساحت ۲۸، ۱۶، ۲۱/۹۸ سانتی‌متر مربع ایجاد شده است. سپس دایره‌ها به‌صورت غیرهمگن

نخورده و سالم انتخاب می‌شود و سپس با قرار دادن آن بین دو صفحه موازی نیرو با سرعت ثابت اعمال می‌شود.

پیش‌بینی مساحت منطقه تماس با فرض ثابت بودن حجم میوه

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، زمانی که میوه نارنج در حال بارگزاری بین دو صفحه است (که یکی از آنها ثابت و دیگری با سرعت ثابت v در حال حرکت است) شکل اصلی آن تقریباً کره‌ای است (شکل ۳-الف) و با میانگین اولیه ارتفاع (H_0) قرار است به‌صورت محوری از بالا به سمت پایین فشرده شود و در نتیجه، کره فشرده شده ممکن است به دو بخش شبه کره‌ای متقارن که شعاع انحنای یکی R_v و شعاع انحنای بخش دوم a_v (شکل ۳-ب) است، معادل شود.



شکل ۳- نحوه تغییرات حجمی نمونه با قطر متوسط معادل (D_{eo})، در ابتدا (الف)، در طول بارگذاری (ب)

با فرض اینکه شکل کل حجم میوه با داشتن قطر اولیه $D_{eo}=H_0$ ، به ارتفاع لحظه‌ای H تغییر می‌کند ($H = D_{eo} - 2h$) و h تغییر طول عمودی است) که H ثابت و برابر با مقدار اولیه $V_0 = \pi/6 D_{eo}^3$ است، به کمک روابط (۶)-(۱۳) می‌توان مساحت ناحیه تماسی را به دست آورد (Pallottino *et al.*, 2011).

$$\frac{p}{6} D_{eo}^3 = \frac{1}{3} p (R_v - h) * [3R_v^2 + 3a_v^2 + (R_v - h)^2] \quad (۶)$$

شعاع لحظه‌ای R_v و a_v از دو دایره پایه به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$R_v = z - p / (3z) \quad (۷)$$

$$a_v^2 = h(2R_v - h) \quad (۸)$$

با استفاده از تئوری هرتز، ضریب کشسانی میوه به کمک معادله (۴) محاسبه شد (Malekabadi *et al.*, 2013):

$$E = \frac{0.338 K^{\frac{3}{2}} F (1 - m^2)}{D^{\frac{3}{2}}} \quad (۴)$$

$$* \left[K_U \left(\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R'_U} \right)^{\frac{1}{3}} + \left[K_L \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R'_L} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

که در آن R_U و R'_U شعاع‌های انحنای نمونه‌های منحنی شکل در نقطه تماس با صفحه بالایی، R_L و R'_L شعاع‌های انحنای نمونه‌های منحنی شکل در نقطه تماس با صفحه پایینی، R_U و R_L شعاع‌های انحنای کمینه در نقطه تماس و R'_U و R'_L شعاع‌های انحنای بیشینه در نقطه تماس هستند. همچنین در رابطه فوق K_U و K_L پارامترهایی بدون بعد هستند که از جداول موجود در استاندارد ASABE برداشت شده‌اند. F نیروی وارده بر حسب نیوتن، μ نسبت پواسون و D تغییر شکل بر حسب میلی‌متر هستند. در این روش با استفاده از معادلات اساسی، که از تئوری منطقه تماس بین سطوح محدب مواد الاستیک (ASABE, 2016) اقتباس شده، تنش در ۳ راستا و مدول الاستیک (E_s) به دست آمد. تئوری مورد استفاده بر این اصل استوار است که مواد راست محور^۱ دارای سه صفحه راست تقارن هستند. قانون هوک برای یک ماده راست محور به‌صورت معادله (۵) به دست می‌آید (Boresi *et al.*, 1993).

$$\begin{bmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ 2e_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{n_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{n_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ -\frac{n_{zx}}{E_z} & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{xx} \\ s_{yy} \\ s_{xy} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

در این رابطه E_i مدول یانگ در راستا محور i ، G_{ij} مدول برشی در راستا z در صفحه‌ای که بردار عمود بر سطح آن در راستای i است، همچنین v_{ij} ضریب پواسون است برای فشردگی در راستای z هنگامی که در راستای i کشیدگی داشته باشد. در صفحه تنش $\sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{yz} = 0$ است. در این روش نمونه تحت آزمایش، از میان نمونه‌های دست

که $b_c = D_{Y0}/2$ به ترتیب نصف محور اصلی و فرعی در امتداد محور x و y است و t_{min} حداقل ضخامت پوسته با توجه به چهار مقدار اندازه‌گیری شده در چهار راستاست. تحلیل‌ها و محاسبات با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده است.

طراحی رابط گرافیکی و محاسبه ویژگی‌های مکانیکی

شکل ۴ رابط کاربری سیستم اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی میوه نارنج در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. در این رابط گرافیکی با فشردن کلید start یا stop دوربین‌ها در راستای x ، y و z روشن یا خاموش می‌شوند. در بخش Record با فشردن هر کدام از کلیدهای webcam x، webcam y و webcam z ذخیره فیلم در سه دوربین شروع می‌شود. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است در وبکم x تصویر در راستای x و در وبکم y تصویر در راستای y نمونه‌ها ذخیره کرده و قطر اصلی و فرعی را در راستای x و y اندازه‌گیری می‌کند. دوربین در راستای z نیز مساحت سطح تماس را به دست می‌آورد. در نهایت روند تغییرات ویژگی‌های ذکر شده در نمودارها نمایش داده می‌شود. بعد از اتمام بارگزاری و ذخیره داده‌های استخراج شده از دستگاه در فایل مربوطه، با فشردن کلید Analysis ویژگی‌های تنش، کرنش، نسبت پواسون، استحکام، مدول الاستیسیته در راستای x ، y و z محاسبه و در یک فایل اکسل ذخیره می‌شوند.

$$z = \sqrt[3]{\frac{-q \pm \Delta}{2}} \quad (9)$$

$$p = -(3/2)h^2 \quad (10)$$

$$q = \frac{1}{2}h^3 - D_{eo}^3/8 \quad (11)$$

$$\Delta^2 = q^2 + 4p^3/27 \quad (12)$$

بنابراین برای هر کرنش فشاری اعمال شده (ϵ_z) منطقه تماس (A_v) برابر است با:

$$A_v = p(a_v)^2 \quad (13)$$

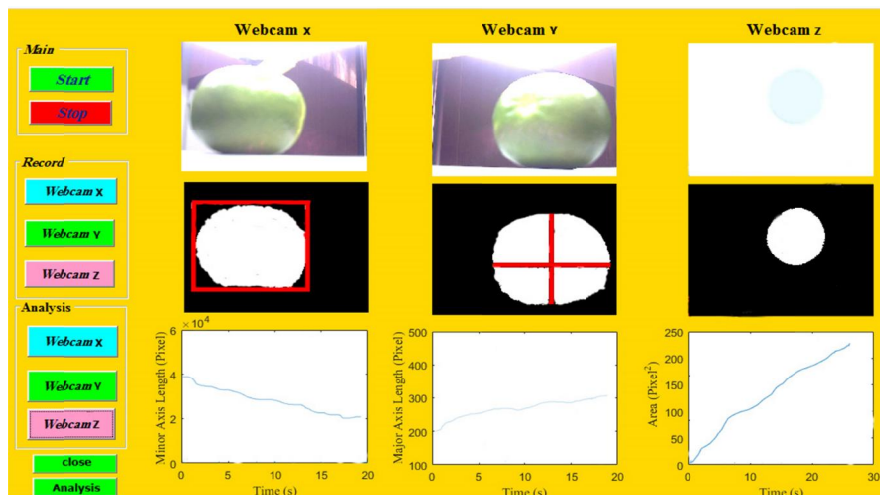
پیش‌بینی منطقه تماس با استفاده از مدل کپسول

در این روش نارنج به صورت یک کپسول، که ساختار داخلی آن با مایع غیرمترکم کاملاً پر و به وسیله غشای غیر قابل نفوذ، الاستیک، همگن و ایزوتروپیک محصور شده، شبیه‌سازی می‌شود. در این روش که بر این فرض استوار است که نیروی فشرده‌سازی (F_z) بر روی مقطع افقی استوایی پوست تأثیر می‌گذارد سطح تماس و محیط پوسته بیرونی از معادلات (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شود (Pery et al., 1963):

$$A_F = C_F t_{min} \quad (14)$$

$$C_F = 2p \sqrt{\frac{a_c^2 + b_c^2}{2}} \quad (15)$$

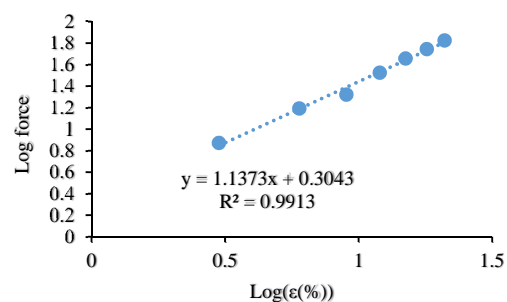
در این معادلات C_F محیط پوسته بیرونی بیضی است و طبق فرمول اوپلر تقریب زده می‌شود $a_c = D_{X0}/2$ و



شکل ۴- رابط کاربری سیستم اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی در آزمون فشرده‌سازی

نتایج و بحث

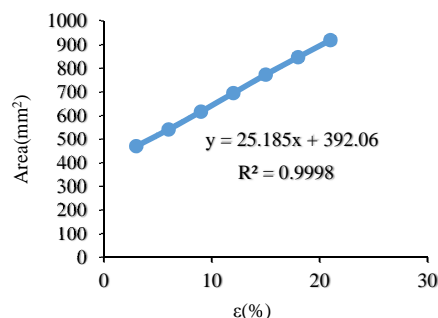
بر اساس توصیه Fridley *et al.* (1968) اعتبار مدل توسعه یافته به وسیله استاندارد ASABE نیاز به ارزیابی دارد. بدین منظور لگاریتم نیروی اعمالی ($\log(f)$) به عنوان یک تابع از لگاریتم تغییر شکل ($\log(\epsilon)$) ترسیم شده است. در یک مدل معتبر شیب این خط می‌بایست برابر با $1/5$ باشد (Fridley *et al.*, 1968). این موضوع با ترسیم شکل ۴ و رگرسیون خطی بررسی و مقدار ضریب محاسبه شده $1/14$ به دست آمد که نشان از صحت محاسبات مربوط به روش ASABE است.



شکل ۴- لگاریتم میانگین مقادیر نیرو ($\log(f)$) در آزمون فشرده‌سازی نسبت لگاریتم مراحل کرنش ($\log(\epsilon)$)

ارزیابی مساحت سطح تماس

به منظور ارزیابی هر مدل، ابتدا مساحت سطح تماس (A_T) برای هر نمونه با استفاده از تصاویر دوربین Z به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است با افزایش جابجایی سطح تماس نمونه روندی افزایشی از خود نشان داد به طوری که این افزایش دارای ارتباط خطی قوی ($R^2=0.999$) با کرنش در راستای محور Z بود.



شکل ۶- میانگین منطقه تماس در مراحل کرنش در روش پردازش تصویر

سپس با توجه به اینکه تعیین مساحت یک از اصلی‌ترین پارامترها در تعیین ویژگی‌های مکانیکی مانند تنش و مدول الاستیسیته است و روش‌های مختلف مفروضات مختلفی برای تعیین این پارامتر داشته‌اند مقادیر میانگین مساحت با روش‌های مختلف (پردازش تصویر، استاندارد ASABE، جعبه محدود، کپسول و فرض ثابت بودن حجم) در کرنش‌های ۳ تا ۲۱ درصد محاسبه و بررسی شد (جدول ۱-۲).

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است علی‌رغم تغییرات میانگین مقادیر سطح تماس تخمین زده شده در همه روش‌ها، تغییرات مساحت به صورت خطی با افزایش ϵ_z دارای روند افزایشی است. بر اساس نتایج بین مقادیر مساحت محاسبه شده با استفاده از روش استاندارد ASABE در کرنش ۶ درصد و مساحت محاسبه شده به روش پردازش تصویر تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ($p > 0.05$). به علاوه، میانگین درصد خطا در این روش حدود ۴۸٪ بود که کمترین خطا در کرنش ۶ درصد و بیشترین خطا در کرنش ۲۱ درصد مشاهده شد. در روش فرض ثابت بودن حجم با توجه به بارگذاری و با اندازه‌گیری قطر اولیه معادل و به کمک معادله (۱۶) سطح مقطع تماس نمونه با صفحه بارگذاری در حجم ثابت به عنوان تابعی از کرنش فشاری محاسبه شد. مساحت محاسبه شده در این روش کمتر از مقدار واقعی سطح تماس به دست آمد، به طوری که میانگین خطای مناطق تماس تخمینی با مناطق به دست آمده از روش پردازش تصویر حدود ۹۰٪ تفاوت داشت. در روش جعبه محدود مساحت محاسبه شده بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده شد و اختلاف میان روش‌های مختلف با روش پردازش تصویر با میانگین درصد خطایی در حدود ۱۳۶٪ بود. دلیل این مساله هم تخمین مساحت سطح تماس به وسیله یک مستطیل است؛ در حالی که مساحت واقعی شکل هندسی مشخصی ندارد. نهایتاً، در روش کپسول نسبت به روش پردازش تصویر مساحت به دست آمده میانگین درصد خطای حدود ۵۹٪ داشت که بعد از روش استاندارد ASABE کمترین خطا را نسبت به روش پردازش تصویر دارد.

جدول ۱- میانگین درصد خطا و مساحت محاسبه شده در روش‌های جعبه محدود، فرض ثابت بودن حجم، استاندارد ASABE و کپسول نسبت به روش پردازش تصویر در آزمون فشرده‌سازی در مراحل کرنش مختلف

مساحت در کرنش‌های مختلف (درصد خطا)							روش
۳٪	۶٪	۹٪	۱۲٪	۱۵٪	۱۸٪	۲۱٪	
۱۱۶۱/۵۵ ^{Ag}	۱۳۲۱/۳ ^{Af}	۱۴۷۱/۸ ^{Ae}	۱۶۳۰/۰۳ ^{Ad}	۱۷۹۰/۱ ^{Ac}	۱۹۳۸/۵ ^{Ab}	۲۰۸۳/۲ ^{Aa}	جعبه محدود
(%۹۶)	(%۹۳)	(%۹۱)	(%۸۹)	(%۸۸)	(%۸۸)	(%۸۷)	حجم ثابت
۱۸/۵۷ ^{gD}	۳۶/۵۹ ^{fD}	۵۳/۶۵ ^{eC}	۶۹/۸۶ ^{dE}	۸۵/۱۸ ^{cD}	۹۹/۷۵ ^{bC}	۱۱۳/۶۲ ^{cC}	ASABE
(%۳۴)	(%۷)	(%۳۹)	(%۶۲)	(%۷۹)	(%۹۰)	(%۹۷)	کپسول
۳۰۷/۹ ^{gC}	۵۸۰/۹ ^{fB}	۸۵۹/۶ ^{eAB}	۱۱۲۵/۴ ^{dB}	۱۳۸۵/۳ ^{cB}	۱۶۱۲/۲ ^{bA}	۱۸۱۶/۷ ^{aA}	تصویربرداری
(%۵۱)	(%۵۴)	(%۵۷)	(%۶۰)	(%۶۲)	(%۶۴)	(%۶۶)	
۲۲۹/۵ ^{eC}	۲۴۸/۵ ^{dC}	۲۶۳/۷ ^{dC}	۲۷۵/۵ ^{cD}	۲۸۶/۷ ^{bcD}	۲۹۸/۵ ^{abC}	۳۰۶/۱	
۴۶۹/۶ ^{gB}	۵۴۰/۶ ^{fB}	۶۱۶/۳ ^{eBC}	۶۹۴/۶ ^{dC}	۷۷۲/۹ ^{cC}	۸۴۶/۷ ^{bB}	۹۱۸/۷ ^{aB}	

حروف کوچک مربوط به مقایسه درون گروه‌ها و حروف بزرگ مربوط به مقایسه بین گروه‌ها در سطح احتمال ۵٪ است.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های مکانیکی تحت تأثیر مراحل کرنش

میانگین مربعات (MS)															درجه آزادی	درصد کرنش								
AS ^σ	BS	استحکام	نیرو	μ _y	μ _x	A _{AS}	A _B	A _C	A _s	A _l	E _C	E _S	E _{AS.Y}	E _{AS.X}	E _B	E _Z	E _Y	E _X	c ^σ	σ ^σ	σ ^s	خطا		
8/9×10 ^{11**}	5/5×10 ^{10**}	266/34 ^{**}	307555/2 ^{**}	1/04 ^{**}	1/08 ^{**}	3/2×10 ^{5**}	2/9×10 ^{10**}	2/2×10 ^{5**}	8/7×10 ^{7*}	7/4×10 ^{6**}	5/6×10 ^{13**}	1/6×10 ^{14**}	1/27 ^{ns}	0/802 ^{**}	4/8×10 ^{12**}	3/06×10 ^{13**}	2/1×10 ^{19ns}	5/5×10 ^{18*}	2/9×10 ^{12**}	2/7×10 ^{11**}	9/4×10 ^{9**}	2/2×10 ⁹	۱۹۵۹	۶
1/3×10 ¹²	46×10 ⁷	9/08	471/02	0/25	0/34	665/3	46×10 ⁷	7979/5	64169477/02	55538/7	1/6×10 ¹²	1/2×10 ¹²	0/95	0/006	1/2×10 ¹¹	4/3×10 ¹¹	1/8×10 ¹⁹	2/1×10 ¹⁸	9/2×10 ⁹	2/1×10 ⁹	2/2×10 ⁹	۱۹۵۹	خطا	

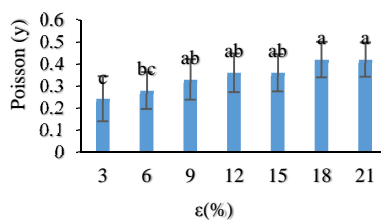
*، ** و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ۱ درصد و عدم معنی‌داری را نشان می‌دهد.

شکل ۷ تأثیر مراحل کرنش بر ویژگی‌های مکانیکی را نشان می‌دهد. با داشتن مقادیر کرنش در امتداد محور x و z، نسبت پواسون در امتداد محور x و y را می‌توان محاسبه کرد. نسبت پواسون در راستای x در مرحله آخر دارای بیشترین مقدار بود و با کرنش ۱۸ و ۱۵ درصد اختلاف معنی‌داری نداشت. بین کرنش‌های ۳ تا ۱۵ درصد نیز تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و در کرنش ۳ درصد دارای کمترین مقدار بود (۰/۱۹). روند تغییرات ضریب پواسون در راستای y تقریباً مشابه ضریب پواسون در راستای x بود. کمترین مقدار در کرنش ۳ درصد مشاهده شد که با کرنش ۶ درصد تفاوت معنی‌داری نداشت (p>۰/۰۵). بین کرنش‌های ۶ تا ۱۵ درصد و همچنین ۹ تا

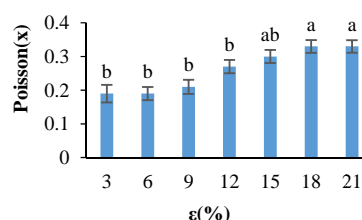
نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های مکانیکی در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر مراحل کرنش به جز مدول الاستیسیته محاسبه شده به روش استاندارد ASABE در راستای Y (E_{AS.Y}) بر تمامی ویژگی‌های مکانیکی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده است؛ همچنین اثر مراحل کرنش بر ویژگی E_x در سطح پنج درصد معنی‌دار است. (Pallottino et al. (2011) نیز در گزارشی اعلام کرده‌اند که اثر مراحل کرنش بر ویژگی‌های مکانیکی میوه پرتقال معنی‌دار بوده است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات ویژگی‌های استخراج شده آنالیز میانگین آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

توجه به مقدار نسبت پواسون ظاهری نارنج می‌توان نتیجه گرفت که نارنج یک محیط ایزوتروپ است. بنابراین در تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی می‌بایست به این نکته توجه نمود. نسبت پواسون در حالت طولی بیشتر از مقادیر به دست آمده در حالت عرضی بود که این می‌تواند مربوط به نحوه رشد نباتات باشد (Malekabadi *et al.*, 2013). در پژوهشی Malekabadi *et al.* (2017) نسبت پواسون را در امتداد محور x و y به ترتیب $0/39$ و $0/37$ به دست آوردند. همچنین Cakir *et al.* (2002) مقدار نسبت پواسون را در محدوده $0/15$ تا $0/44$ به دست آوردند. محدود بودن دامنه تغییرات در روش پردازش تصویر به دلیل دقت این سیستم است. با وجود تغییرات زیاد در کرنش در امتداد محور x و y ، ضریب پواسون عملاً همزمان بود ($0/30$ و $0/36$). این موضوع تأییدکننده رفتار تقریباً همگن نمونه‌های مورد بررسی است.

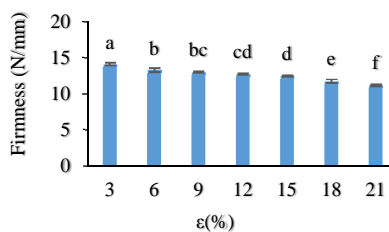
۲۱ درصد نیز تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد مشاهده نشد. ضریب پواسون در راستای y در کرنش ۲۱ درصد دارای بیشترین مقدار بود ($0/42$). با افزایش کرنش مقدار نسبت پواسون ظاهری نیز افزایش یافت؛ زیرا با افزایش جابه‌جایی، نمونه به سمت شکست نزدیک شده و با جابه‌جایی طولی کم، جابه‌جایی عرضی زیاد می‌شود. به عبارت دیگر بر اثر جابه‌جایی‌های اولیه در طول بارگذاری، کرنش عرضی آن بیشتر از کرنش طولی می‌شود (JafariMalekabadi *et al.*, 2014). در پژوهشی Malekabadi *et al.* (2013) نسبت پواسون را برای پیاز زرد و قرمز به ترتیب $0/36$ و $0/34$ به دست آوردند. در مطالعه‌ی انجام شده، نسبت پواسون ظاهری برای نارنج کمتر از پیاز بود این امر می‌تواند ناشی از تفاوت در بافت این دو نمونه باشد زیرا نارنج بافت نرم‌تری نسبت به پیاز دارد. بعلاوه با توجه به اینکه در مواد غیرایزوتروپیک نسبت پواسون بیشتر از یک است (Mohsenin, 1986)، با



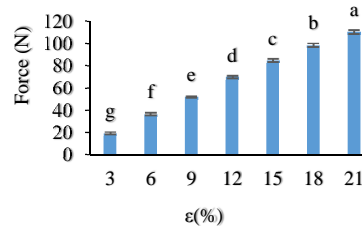
ب



الف



د



ج

شکل ۷- نتایج آنالیز آماری چند دامنه‌ای دانکن: اثر زمان مراحل کرنش بر ویژگی‌های مکانیکی؛ (الف) ضریب پواسون x ، (ب) ضریب پواسون y ، (ج) نیرو، (د) استحکام

نمونه‌ها طی مراحل کرنش کاهش یافت و بیشترین و کمترین مقدار آن در کرنش ۳ درصد و ۲۱ مشاهده شد (۱۴ و ۱۱/۲۶). Baritelle & Hyde (2001) اثبات کردند که با کاهش فشار درون سلولی، سفتی بافت کاهش می‌یابد و کاهش سفتی در سیب و سیب‌زمینی موجب افزایش کرنش شکست و همچنین کشش بافت می‌شود. در پژوهشی Mazidi *et al.* (2016) گزارش دادند که

اندازه‌گیری سفتی بافت میوه یک رویکرد مناسب برای نظارت بر نرم شدن میوه و پیش‌بینی خسارت ناشی از کوفتگی در طول برداشت و پس از برداشت است. عمدتاً اندازه‌گیری سفتی مکانیکی بافت میوه بستگی به فشار اسموز^۱ و مقاومت مکانیکی دیواره سلولی دارد (Ahmadi & Bariklo, 2016). مطابق با شکل ۷ مقدار استحکام

شفیع‌آبادی ۹/۱۴ و برای رقم گلاب کوهناز ۷/۷۹ نیوتن بر میلی‌متر گزارش شده است (Chakespari *et al.*, 2010). مقدار این پارامتر برای نارنج ۱۴ نیوتن بر میلی‌متر است که به میوه پرتقال با توجه به شباهت بافت نزدیک‌تر است.

میزان فشرده‌سازی تأثیر معنی‌داری بر استحکام پرتقال نداشته‌است. از آنجا که میزان فشرده‌سازی نشان‌دهنده خاصیت ویسکوز است، بنابراین این نتیجه نشان می‌دهد که خاصیت ویسکوز پرتقال هیچ تأثیری در آسیب داخلی میوه ندارد. میانگین مقدار استحکام برای سیب رقم

جدول ۳- مقایسه میانگین مقادیر مدول الاستیسیته در راستای X و Y در روش پردازش تصویر با استاندارد ASABE و مقایسه مدول الاستیسیته در راستای Z در روش‌های جعبه محدود، فرض ثابت بودن حجم، پردازش تصویر و کپسول

مدول الاستیسیته X							
درصد کرنش / روش	۳	۶	۹	۱۲	۱۵	۱۸	۲۱
ASABE	۰/۰۱۹ ^{Aab}	۰/۰۱۷ ^{Ba}	۰/۰۱۴ ^{Ca}	۰/۰۱۳ ^{Da}	۰/۰۰۹ ^{Ea}	۰/۰۰۶ ^{Fa}	۰/۰۰۳ ^{Gb}
تصویربرداری	۰/۰۳۴ ^{Aa}	۰/۰۰۷ ^{Bb}	۰/۰۰۴ ^{Bb}	۰/۰۰۵ ^{Bb}	۰/۰۰۷ ^{Bb}	۰/۰۰۴ ^{Bb}	۰/۰۰۴ ^{Ba}
مدول الاستیسیته Y							
ASABE	۰/۰۱۸ ^{Aa}	۰/۰۱۶ ^{Bb}	۰/۰۱۴ ^{Ca}	۰/۰۰۱ ^{Da}	۰/۰۰۹ ^{Ea}	۰/۰۰۶ ^{Fa}	۰/۰۰۳ ^{Ga}
تصویربرداری	۰/۰۰۷ ^{Aa}	۰/۰۱۲ ^{Ab}	۰/۰۰۶ ^{Ab}	۰/۰۰۲ ^{Ab}	۰/۰۰۱ ^{Ab}	۰/۰۰۰۷ ^{Ab}	۰/۰۰۰۷ ^b
مدول الاستیسیته Z							
جعبه محدود	۰/۶۵ ^{Ac}	۰/۵۱ ^{Bcd}	۰/۴۲ ^{Ccd}	۰/۳۹ ^{CDcd}	۰/۳۴ ^{CDcd}	۰/۳۰ ^{CDcd}	۰/۲۷ ^{CDcd}
حجم ثابت	۴۳/۰۷ ^{Aa}	۱۹/۷ ^{Ba}	۱۲/۳ ^{Ca}	۹/۶ ^{CDa}	۷/۷ ^{CDa}	۶/۴ ^{Da}	۵/۴ ^{Da}
تصویربرداری	۱/۵ ^{Abc}	۱/۲۳ ^{Bc}	۰/۹۹ ^{Cc}	۰/۹۱ ^{CDc}	۰/۸۰ ^{DEc}	۰/۷۱ ^{EFc}	۰/۶۳ ^{Fc}
کپسول	۳/۰۶ ^{Ab}	۲/۶ ^{Bb}	۲/۲ ^{Cb}	۲/۱ ^{CDb}	۲/۰۴ ^{DEb}	۱/۹ ^{EFb}	۱/۷ ^{Fb}
تنش							
جعبه محدود	۱۹۶۷۰/۸ ^{Fc}	۳۰۸۶۴ ^{Ec}	۳۸۶۰۶/۶ ^{Dc}	۴۸۲۳۰/۱ ^{Cc}	۵۱۸۶۴/۳ ^{Bc}	۵۵۶۸۷/۹ ^{Ac}	۵۸۱۱۹/۵ ^{Ac}
حجم ثابت	۱۲۹۴۹۱۹ ^{Aa}	۱۱۸۲۲۷۰ ^{Aa}	۱۱۲۶۵۲۹ ^{Aa}	۱۱۵۶۷۴۰ ^{Aa}	۱۱۶۰۹۰۶ ^{Aa}	۱۱۵۹۷۷۵ ^{Aa}	۱۱۴۵۱۰۸ ^{Aa}
ASABE	۷۳۹۷۴/۷ ^{Abc}	۷۲۵۸۲/۲ ^{Ac}	۶۶۴۶۱/۲ ^{Ac}	۵۶۲۷۵/۳ ^{Bc}	۶۸۶۰۰/۳ ^{Ac}	۶۸۴۱۰/۹ ^{Ac}	۶۶۸۶۸/۱ ^{Ac}
تصویربرداری	۴۷۳۶۲/۴ ^{Gbc}	۷۳۸۳۵/۸ ^{Fc}	۹۱۴۳۹/۵ ^{Ec}	۱۰۹۹۰۵ ^{Dc}	۱۲۰۸۹۳ ^{Cc}	۱۲۸۸۱۵ ^{Bc}	۱۳۲۵۴۴ ^{Ac}
کپسول	۹۲۰۸۴/۲ ^{Fb}	۱۵۹۳۱۶ ^{Eb}	۲۰۸۴۷۷ ^{Db}	۲۶۵۳۰۶ ^{Cb}	۳۰۹۰۹۳ ^{Bb}	۳۴۵۳۶۸ ^{Ab}	۳۷۸۰۶۱ ^{Ab}

حروف کوچک مربوط به مقایسه بین گروه‌ها و حروف بزرگ مربوط به مقایسه درون گروه‌ها در سطح احتمال ۵٪ است.

درصد بین دو روش تفاوت معنی‌دار شد و مدول الاستیسیته در روش پردازش تصویر کمتر از استاندارد ASABE تخمین زده شد. مطابق نتایج مدول الاستیسیته در امتداد محور Z در روش ثابت بودن حجم بیشترین مقدار را داشت که اختلاف چشم‌گیری با مقدار نرمال در مدول الاستیسیته مرکبات دارد. در کرنش ۳ درصد بین روش کپسول و پردازش تصویر همچنین بین روش‌های پردازش تصویر و جعبه محدود اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. مدول الاستیسیته در روش جعبه محدود کمترین مقدار را داراست که با روش پردازش تصویر اختلاف معنی‌داری نداشت. در ضمن مقادیر میانگین ویژگی‌های تنش محاسبه شده در روش‌های پردازش تصویر، استاندارد ASABE، جعبه محدود، کپسول و فرض ثابت بودن حجم در کرنش‌های ۳ تا ۲۱ درصد با یکدیگر مقایسه شدند.

در روش پردازش تصویر سه مدول الاستیسیته در راستای X، Y و Z محاسبه شد؛ در حالی که در روش استاندارد ASABE با توجه به وابستگی روابط این روش به نسبت پواسون دو مدول الاستیسیته و در روش‌های دیگر تنها یک مدول الاستیسیته در امتداد محور Z (جهت بارگذاری) قابل محاسبه است (Malekabadi *et al.*, 2017). لذا مدول الاستیسیته در راستای X و Y در روش استاندارد ASABE با روش پردازش تصویر مقایسه شد. مطابق با جدول ۳ در کرنش ۳ درصد تفاوت معنی‌داری در مدول الاستیسیته در راستای X بین دو روش مشاهده نشد و پس از آن تا کرنش ۲۱ درصد E_x در روش استاندارد ASABE بزرگ‌تر از روش پردازش تصویر بود و باهم اختلاف معنی‌دار داشتند. مقدار مدول الاستیسیته در راستای Y در کرنش ۳ و ۶ درصد در دو روش اختلاف معنی‌داری نداشتند. از کرنش ۹ تا ۲۱

4. Akar, R. and Aydin, C. 2005. Some physical properties of gumbo fruit varieties. *Journal of Food Engineering*, 66(3): 387-393.
5. Amraee, S. Abdanan, S. and Salari, S. 2017. Broiler weight estimation based on machine vision and artificial neuralnetwork. *British Poultry Science*, 58(2): 200-205.
6. ASABE. 2016. Compression tests of food materials of convex shape, ASAE S368.1,3, 585-592.
7. ASABE. 2008. Compression tests of food materials of convex shape, ASAE S368.1,3, 585-592.
8. Baritelle, A. L. and Hyde G. M. 2001. Commodity conditioning to reduce impact bruising. *Postharvest Biology and Technology*, 21: 331-339.
9. Boresi, A. P. Richard, J. S. and Omar, M. S. 1993. *Advanced mechanics of materials*. 1-768. Vol. 6. New York: Wiley.
10. Brodie, I. and Schwoebel, P. R. 1994. Vacuum microelectronic devices. *Proceedings of the IEEE*, 82(7): 1006-1034.
11. Cakir, E. Alayunt, F. and Ozden, K. 2002. A study on the determination of Poisson's ratio and modulus of elasticity of some onion varieties. *Asian Journal of Plant Sciences*, 1(4): 376-378.
12. Chakespari, A. G. Rajabipour, A. and Mobli, H. 2010. Strength Behavior Study of Apples (cv. Shafi Abadi and Golab Kohanz) under Compression Loading. *Modern Applied Science*, 4(7): 173.
13. Fridley, R. B. Bradley, R. A. Rumsey, J. W. and Adrian, P. A. 1968. Some aspects of elastic behavior of selected fruits. *Transactions of the ASAE*, 11(1): 46-0049.
14. Gürsoy, S. and Güzel, E. 2010. Determination of physical properties of some agricultural grains. *Research journal of applied sciences, engineering and technology*, 2(5): 492-498.
15. Jafari Malekabadi, A. Khojastehpour, M. Emadi, B and Golzarian, M. 2014. Determination of Poisson's Ratio and Modulus of Elasticity in Different Loading Conditions of Two Iranian Onion Cultivars. *Agricultural Machinery*, 6(1): 114-125. (In Farsi)
16. Koc, A. B. 2007. Determination of watermelon volume using ellipsoid approximation and image processing. *Postharvest Biology and Technology*, 45(3): 366-371.
17. Kubík, L. and Kažimírová, V. 2015. Determination of mechanical properties of apple cultivar Golden Delicious. *Journal on processing and energy in agriculture*, 19(1): 17-20.

مطابق جدول ۳ مقدار تنش در روش فرض ثابت بودن حجم تفاوت معنی‌داری در تمامی مراحل کرنش با روش‌های دیگر دارد. اختلاف معنی‌داری در مقدار میانگین تنش در مرحله ۳ درصد کرنش بین روش‌های کیسول، پردازش تصویر، استاندارد ASABE و جعبه محدود مشاهده نشد. به‌علاوه روش‌های پردازش تصویر، استاندارد ASABE و جعبه محدود در محاسبه تنش نیز اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. مطابق جدول ۳ تفاوت معنی‌داری بین مقدار تنش در کرنش‌های ۶ تا ۲۱ درصد، در روش‌های جعبه محدود، استاندارد ASABE و پردازش تصویر وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از بین روش‌های بررسی شده، روش استاندارد ASABE نسبت به روش پردازش تصویر دارای خطای کمتری است؛ به‌علاوه این روش در کرنش ۶ درصد اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ با روش پردازش تصویر در محاسبه مساحت سطح تماس نداشته‌است (خطای محاسبه ۷٪) که این مساله حاکی از دقت بیشتر ASABE نسبت به دیگر روش‌هاست. لذا می‌توان در کرنش ۶ درصد از روش ASABE به‌عنوان روشی جایگزین برای پردازش تصویر استفاده نمود.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان قدردانی می‌نمایند.

منابع

1. Abadan Mehdizadeh, S and Soltaniakazemi, M. 2016. Design and evaluation of a bee mass density detection system inside a hive using machine vision. *Iranian Biosystems Engineering*, 47 (1): 29-21. (In Farsi)
2. Abdanan Mehdizadeh, S. and Nadi, F. 2016. Experimental and Numerical Analysis for Prediction of Mechanical Properties of Eggshell. *International Journal of Food Engineering*, 12(3): 287-293.
3. Ahmadi, E. and Barikloo, H. 2016. Investigation of Mechanical Properties of Apricot Fruit under Quasi-Static and Dynamic Loading, *Biological Journal of Agricultural Machinery*, 6(1):139-152. (In Farsi)

- black mulberry (*Morus nigra* L.) using visible-infrared spectroscopy and genetic algorithm. *International Journal of Food Properties*, 1-11.
18. Lewis, R. Yoxall, A. Canty, L. A and Romo, E. R. 2007. Development of engineering design tools to help reduce apple bruising. *Journal of food engineering*, 83(3): 356-365.
 19. Li, Z. Li, P. Yang, H. and Liu, J. 2013. Internal mechanical damage prediction in tomato compression using multiscale finite element models. *Journal of Food Engineering*, 116(3): 639-647.
 20. Lu, R. Srivastava, A. K. and 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.
 21. Malekabi, A. J. Khojastehpour, M. Emadi, B. and Golzarian, M. R. 2017. Development of a machine vision system for determination of mechanical properties of onions. *Computers and electronics in agriculture*, 141: 131-139.
 22. Mazidi, M. Sadrnia, H. and Khojastehpour, M. 2016. Evaluation of orange mechanical damage during packaging by study of changes in firmness. *International Food Research Journal*, 23(2): 899.
 23. Mohsenin, N. N. 1986. *Physical properties of plant and animal materials*. 1-891. (No. 581.1 M64 1986).
 24. Nourain, J. Ying, Y. B. Wang, J. P. Rao, X. Q. and 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.
 25. Orak, H. and Abadanan Mehdizadeh, S. 2017. Detection of knots and internodes in sugarcane stems in line with machine-assisted vision. *Iranian Biosystems Engineering*, 48 (2): 272-263. (In Farsi)
 26. Pallottino, F. Costa, C. Menesatti, P. and Moresi, M. 2011. Assessment of the mechanical properties of Tarocco orange fruit under parallel plate compression. *Journal of Food Engineering*, 103(3): 308-316.
 27. Pery-Thorne, A., and Chamberlain, J. E. 1963. Transition Probabilities in the Spectra of Neutral Neon, Argon and Krypton. *Proceedings of the Physical Society*, 82(1): 133
 28. Shmulevich, I. Galili, N. and Howarth, M. S. 2003. Nondestructive dynamic testing of apples for firmness evaluation. *Postharvest Biology and Technology*, 29(3): 287-299.
 29. Singh, K. K. and Reddy, B. S. 2006. Post-harvest physico-mechanical properties of orange peel and fruit. *Journal of food engineering*, 73(2): 112-120.
 30. Soltanikazemi, M. Abadanan Mehdizadeh, S. and Heydari, M. 2017. Non-destructive evaluation of the internal fruit quality of