



اندازه‌گیری سطح تماس با استفاده از سامانه ماشین بینایی در آزمون خواص مکانیکی محصولات کشاورزی

ایوب جعفری ملک آبادی^{۱*}، مهدی خجسته‌پور^۲، باقر عمادی^۳، محمودرضا گلزاریان^۳

۱ - دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* نویسنده مسئول: jafari.ayoub@stu.um.ac.ir

چکیده

در این پژوهش روش جدیدی برای اندازه‌گیری سطح تماس بین محصولات کشاورزی و پروب دستگاه آزمون کشش-فشار در آزمون خواص مکانیکی بر مبنای پردازش تصویر بررسی شد. انواع محصول با سه رنگ و اندازه متفاوت که دارای سه رطوبت مختلف بود مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مورد آزمون پیاز زرد (رطوبت بافت زیاد-اندازه متوسط)، فلفل دلمه (رطوبت بافت کم-اندازه بزرگ) و آلو قرمز (رطوبت بافت متوسط-اندازه کوچک) بود. نتایج نشان داد، که اندازه‌گیری مساحت در همه شرایط امکان‌پذیر بود. محصول با رطوبت بیشتر بهترین شرایط برای اندازه‌گیری مساحت بود. با نورپردازی درست، رنگ محصولات در اندازه‌گیری سطح تماس تاثیر نداشت و همواره مساحت قابل اندازه‌گیری بود.

واژه‌های کلیدی: آزمون کشش-فشار، بینایی ماشین، محصول کشاورزی، مساحت سطح تماس.

مقدمه

اندازه‌گیری دقیق و سریع خواص فیزیکی و خصوصیات هندسی و ثقلی در هنگام فرآوری محصولات کشاورزی، طراحی دستگاه‌ها، و غیره بسیار حائز اهمیت است. برای مثال شکل و ابعاد فیزیکی برای غربال کردن مواد جامد و درجه بندی میوه‌ها مورد نیاز است. برای این کار از روش دستی استفاده می‌شود و با استفاده از کولیس یا خط کش ابعاد اندازه‌گیری می‌شوند و با قرار دادن در فرمول‌های مربوطه، پارامترها محاسبه می‌شود (رضوی و همکاران، ۱۳۸۵). این روش در صورتی که تعداد محصول و یا تکرار در انجام آزمایشات زیاد باشد، بسیار وقتگیر و سخت است.

از طرفی خواص مکانیکی امکان پیشگویی رفتار نیرو-تغییر شکل محصولات کشاورزی را فراهم کرده و در طراحی تجهیزات فرآوری این محصولات نقش مهمی ایفا می‌کنند (Arnold and Robert, 1969; Kang *et al.* 1995). اندازه‌گیری خواص مکانیکی، مفاهیم کرنش، تنش، نیرو، مدول الاستیسیته، مدول حجمی، نسبت پواسون و ...، توسط دستگاه‌های آزمون کشش-فشار و روش‌های گوناگونی حاصل می‌شود ولی این گونه دستگاه‌ها به خاطر نوع طراحی دارای محدودیت‌هایی برای محصولات کشاورزی هستند که محققین را وادار به اعمال محدودیت‌ها و در نظر گرفتن فرض‌هایی برای به نتیجه رسیدن، می‌کنند. به عنوان مثال در رابطه تنش، مساحت سطح تماس باید مشخص باشد و در صورت تغییر هر کدام از مولفه‌ها در طول زمان دیگر مولفه‌ها نیز دستخوش تغییرات می‌گردند. تنها بخشی که به راحتی توسط دستگاه‌های یاد شده قابل اندازه‌گیری می‌باشد، مولفه نیرویی است و سطح مقطع با ارائه فرض‌هایی از جمله ثابت بودن و ناچیز بودن تغییرات در حین آزمون در نظر گرفته می‌شود که این فرض‌ها با تغییر ماهیت نمونه از فاز جامد به مایع نادرست‌تر می‌شوند و خطای چشمگیری را خواهد داشت. همچنین در روش دیگر، نمونه‌ای با شکل استوانه یا مکعب از داخل محصول که دارای سطح مشخص باشد، استخراج می‌شود (صدرنیا و همکاران، ۱۳۹۰، سیدآبادی و همکاران، ۱۳۸۹). این روش یک روش مخرب می‌باشد و در مورد بسیاری از محصولات استخراج نمونه امکان پذیر نیست. قرار دادن یک کاغذ سفید یا شطرنجی و آغشته نمودن جسم مورد آزمایش با جوهر، روش دیگری است که اثر سطح تماسی نمونه با کاغذ را در لحظه‌ای خاص بدست می‌آورد. شمارش تعداد خانه‌های سیاه شده و یا استفاده از پلانیمتر برای بدست آوردن سطح تماسی، کاری وقت گیر، طاقت فرسا است و فقط مساحت تماسی را در لحظه‌ای خاص می‌توان اندازه گرفت که این روش همراه با خطاست و به صورت ناقص انجام می‌شود. محققین در تحقیقی خواص برنج را با در نظر گرفتن مساحت سطح تماس بررسی کردند. در این پژوهش سطح تماس با استفاده از کاغذهای حساس به فشار اندازه‌گیری شد. این کاغذها بین محصول و پروب قرار داده می‌شدند و پس از اسکن به کامپیوتر منتقل شده و با استفاده از نرم افزار مساحت محاسبه می‌شد (Shitanda *et al.*, 2002). در مطالعه ای دیگر، محققین خواص مکانیکی پرتقال را بررسی کردند و سطح تماس را با استفاده از پردازش تصویر بدست آوردند. نتایج نشان داد که این روش در اندازه‌گیری سطح تماس و خواص مکانیکی عملکرد خوبی داشت (Pallottino *et al.*, 2011).



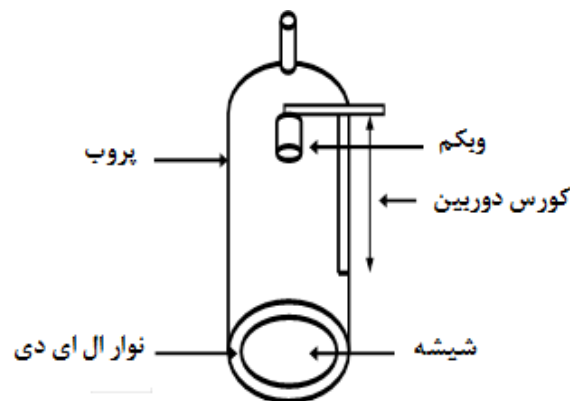
تصویر برداری و پردازش تصویر می‌تواند روش مناسبی برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی و مکانیکی باشد. در این پژوهش سامانه-ای ساخته شده است که با استفاده از روش پردازش تصویر مشکلات فوق را حل نماید. اطلاعات حاصل از تصویربرداری به کامپیوتر منتقل می‌شود و با استفاده از نرم‌افزارهای پردازش تصویر سطح تماس موثر محصول مورد آزمایش با پروب (استوانه انجام آزمون توسط دستگاه)، اندازه‌گیری می‌شود تا پارامترهای خواص فیزیکی و مکانیکی مورد نظر که به مساحت مربوط هستند را بتوان محاسبه نمود. محصول با سه رنگ و اندازه متفاوت که دارای سه رطوبت مختلف بودند مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مورد آزمون پیاز زرد (رطوبت بافت زیاد-اندازه متوسط)، فلفل دلمه (رطوبت بافت کم-اندازه بزرگ) و آلو قرمز (رطوبت بافت متوسط-اندازه کوچک) بود.

مواد و روش‌ها

ساخت پروب

دو پروب از جنس آلومینیوم با صفحات شیشه‌ای که در اطراف آن LED و داخل آن دوربین Farassoo2370 نصب شده بود، ساخته شد. همچنین روبروی دستگاه آزمون کشش-فشار دوربین دیگری قرار داده شد. شکل ۱ شماتیک پروب ساخته شده را نشان می‌دهد. برای استفاده از روش پردازش تصویر نیاز به نورپردازی می‌باشد، بدین منظور با توجه به محدودیت فضای کاری و همچنین شرایط پایدار نوری از تعدادی نوار LED سه رنگ RGB، بهره‌برده شد. بسته به اینکه نمونه مورد آزمون چه رنگی باشد، رنگ لامپ‌های LED را تغییر می‌دهیم.

سامانه از طریق یک میله به نیروسنج دستگاه آزمون کشش-فشار (UTM) آزمایشگاه خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، متصل شد. با انجام آزمایش و تماس سطح شیشه با نمونه مورد آزمایش ردی پدیدار شد که قابل مشاهده بود و همان مساحت واقعی تماس پروب با نمونه می‌باشد. این مساحت توسط دوربین که درون استوانه قرار دارد ضبط شد.



شکل ۱. شماتیک پروب ساخته شده



سامانه نورپردازی، رنگ پس زمینه، رنگ لامپ‌های LED

عموما برای استفاده از روش پردازش تصویر نیاز به نورپردازی می‌باشد. همچنین به منظور حذف انعکاس زمینه انتخاب پس زمینه مناسب ضروری است. از طرفی باید در انتخاب رنگ مناسب لامپ LED سه رنگ RGB، در اطراف شیشه‌ها دقت کرد تا بیشترین تضاد رنگی ایجاد شود و بهترین خروجی تصویر برای اندازه گیری مساحت را داشته باشیم. جزئیات دقیق تر مربوط به سامانه نورپردازی و انتخاب رنگ پس زمینه و لامپ LED در پژوهش جعفری ملک‌آبادی و همکاران (۱۳۹۴) آورده شده است. اطلاعات استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

محصولات کشاورزی مورد آزمایش

برخی از عملیات پردازش تصویر مربوط به کار بر روی رنگ تصاویر می‌شود. از آنجایی که جداسازی تصویر و بخشی از محصول که با پروب در تماس است به عنوان مساحت، حاصل بخش‌بندی و تعیین آستانه‌گذاری رنگی است، پس نوع رنگ پوست محصولات می‌تواند ویژگی (پارامتر) مهمی در نحوه عملکرد این سامانه باشد. البته در کنار این ویژگی، مطالب مذکور در بخش (۲-۲) نیز مهم می‌باشد که جزئیات آن در پژوهش دیگر ذکر شده است (جعفری ملک‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۴).

فاصله پروب بالا از پروب پایین در این سامانه مهم است. اهمیت این موضوع تنها به این دلیل است که در کنار هر دو پروب لامپ LED قرار داده شده است. هنگامی که پروب بالا به پروب پایین نزدیک می‌شود، نور لامپ‌های LED پروب بالا و پایین در هم ترکیب شده و تشخیص مرز محصول در هنگام پردازش تصاویر بسیار سخت و یا حتی تشخیص محصول غیر ممکن می‌شود. از طرفی این فاصله به ابعاد محصول و میزان جابجایی^۱ آن در هنگام آزمون بستگی دارد. بنابراین اندازه محصولات می‌تواند پارامتر مهم دیگری در نحوه عملکرد این سامانه باشد.

با انجام آزمایش و تماس سطح پروب با نمونه مورد آزمایش ناحیه ای با تضاد رنگی و نوری نسبت به اطراف آن پدیدار می‌گردد که قابل مشاهده است. این ناحیه مشخص کننده سطح واقعی تماس پروب با نمونه می‌باشد. اثر ایجاد شده مربوط به دو چیز است: یکی تفاوت رنگ ایجاد شده در بخش چسبیده شده به پروب به علت تفاوت شدت نور تابیده شده از لامپ LED بر روی آن و دیگری رطوبت بافت محصول که اثری از آن به علت فشار بر روی سطح شیشه ای پروب نمایان می‌شود. در مورد علت اول (لامپ LED و رنگ محصول) در بخش‌های قبل توضیح ارائه شد. بنابراین علت دوم، یعنی تاثیر رطوبت بافت محصول بر کیفیت تشخیص مساحت، به عنوان پارامتر سوم مهم در عملکرد سامانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در نتیجه، محصول با سه رنگ و اندازه متفاوت که دارای سه سطح رطوبت مختلف بودند مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مورد آزمون پیاز زرد، فلفل دلمه و آلو قرمز بود که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

¹ - Deformation

جدول ۱. مشخصات محصول و شرایط انجام آزمون

محصول	پیاز زرد	فلفل دلمه سبز	آلو قرمز
پس زمینه	مشکی	سفید	سفید
نورپردازی	لامپ LED از بالا	لامپ LED از بالا	لامپ LED از بالا
نور لامپ LED	بالا قرمز، پایین سبز	بالا قرمز، پایین آبی	بالا سبز، پایین آبی
اندازه	متوسط	بزرگ	کوچک
رطوبت	زیاد	کم	متوسط

بحث و نتایج

به منظور بررسی اثر رنگ پوست محصولات کشاورزی بر روی عملکرد سامانه برای جداسازی تصویر و اندازه‌گیری سطح تماس، سه نوع محصول با رنگ پوست متفاوت ارزیابی شد. محصولات علاوه بر رنگ متفاوت، با اندازه و رطوبت بافت مختلف نیز انتخاب شدند تا اثر اندازه محصول یا به عبارت دیگر فاصله پروب بالا از پروب پایین و همچنین اثر رطوبت در اندازه‌گیری سطح تماس بررسی شود. تصویربرداری توسط وب کم و کنترل تصویربرداری و پردازش تصاویر تهیه شده در آزمایش‌های مختلف بصورت بلادرنگ (real-time) توسط نرم افزار MATLAB انجام شد. ابتدا آستانه مناسب برای جداسازی رنگ اندازه‌گیری شده و بر روی تصاویر اعمال شد. سپس عملیات مرفولوژی برای اضافه کردن بخش‌های متصل به یکدیگر و حذف بخش‌های اضافی انجام شد. شکل‌های ۲-۴ نتایج بررسی را نشان می‌دهد.

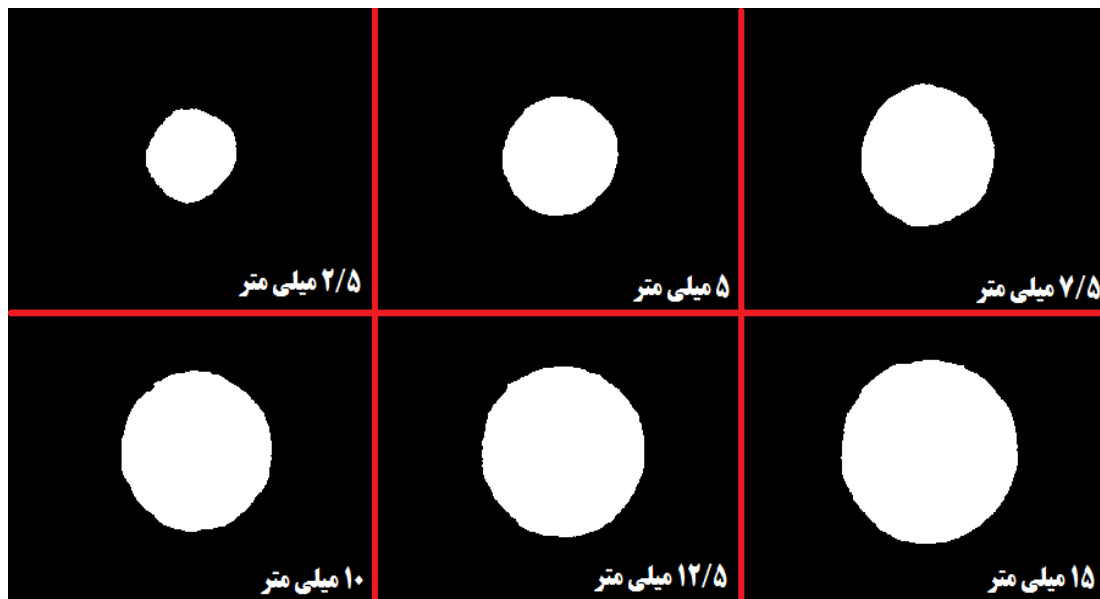
همانطور که از شکل‌ها مشخص است، در هر سه نوع محصول، رنگ پوست در تعیین سطح تماس تاثیری نداشت و امکان اندازه‌گیری وجود داشت. تنها تفاوت در اندازه‌گیری این سه محصول، آستانه‌گذاری رنگ برای جداسازی محصول و تشخیص سطح تماس است. خطاهای موجود در اندازه‌گیری، مربوط به پارامترهای دیگر می‌شود که در ادامه بحث خواهد شد. البته همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، در کنار پارامتر رنگ پوست محصولات، نکات مذکور در بخش (۲-۲) نیز مهم می‌باشد و نتایج مناسب این پژوهش با در نظر گرفتن این نکات بدست آمده است.

در پردازش تصاویر مربوط به پیاز (شکل ۲) هیچگونه خطایی مشاهده نشد. رطوبت و اندازه مطلوب محصول در کنار نورپردازی خوب، علت این تشخیص سطح مناسب است. اما پردازش تصاویر مربوط به فلفل دلمه (شکل ۴) که دارای رطوبت کم هستند دارای مقدار کمی خطا در اندازه سطح تماس می‌باشد. رطوبت کم باعث شد که اثر مناسب بر روی سطح پروب ایجاد نشود. به عبارت دیگر تضاد رنگ که باید در هنگام آستانه‌گذاری باعث جداسازی سطح شود، ایجاد نشد و اختلاف رنگ بین نقاط چسبیده به پروب و نقاطی که فاصله کمی از آن داشتند کم بود. بنابراین این نقاط به عنوان سطح تماس در نظر گرفته شدند. اگر آستانه بزرگتر

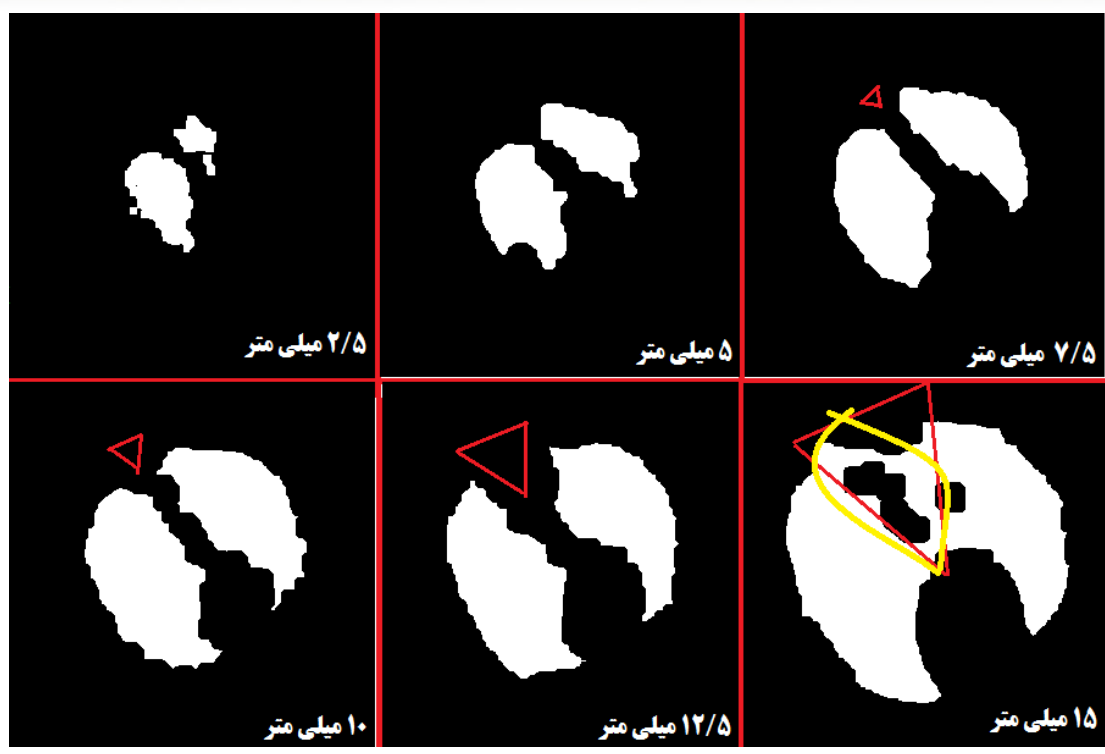


در نظر گرفته شود، آنگاه سطح تماس واقعی کوچکتر و یا حذف می‌شود. این خطا در شکل ۴ با دایره‌های قرمز مشخص شده است. ناحیه‌های جدا شده و نشان داده شده داخل دایره زرد خطای دیگری را نشان می‌دهد. در این قسمت، سطح تماس در نظر گرفته نشده است. در صورتی که این قسمت بخشی از سطح تماس است. این خطا به علت شکست محصول در میزان جابجایی قبل از ۱۵ میلی‌متر، اتفاق افتاد. ذکر ۲ نکته در مورد این دو خطا ضروری است.

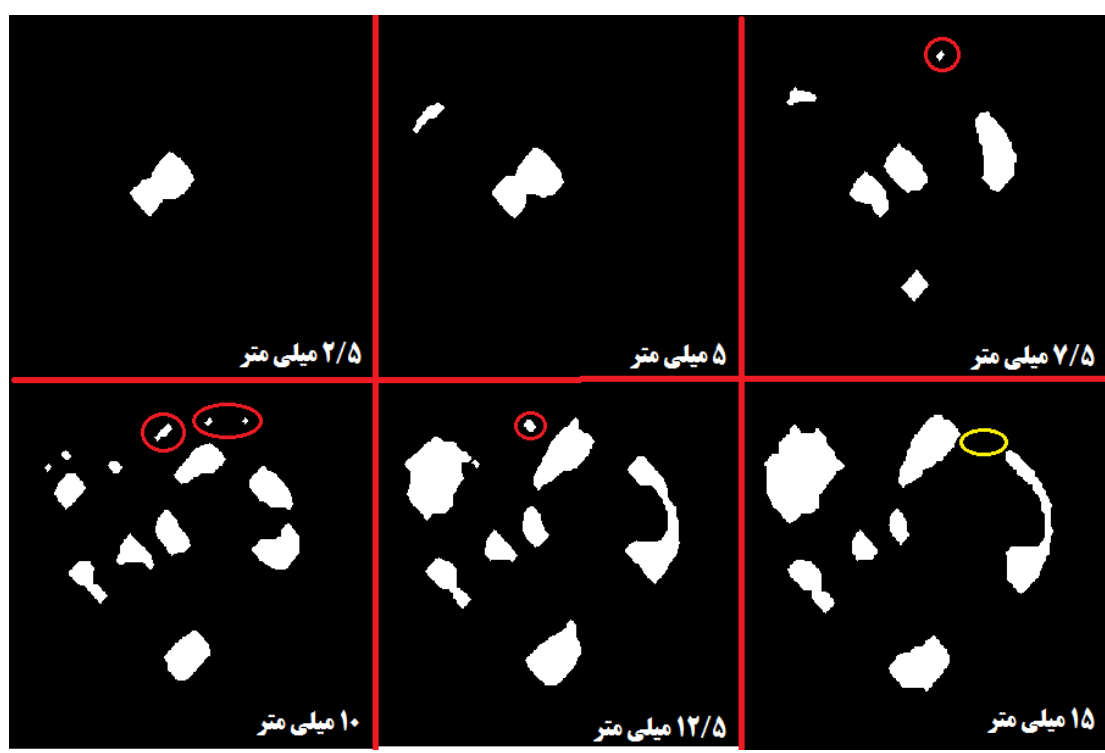
در مورد خطای پس از شکست (قسمت مشخص شده با منحنی بسته زرد رنگ در شکل ۴)، به این نکته باید توجه کرد که خواص مکانیکی محصولات کشاورزی عموماً در ناحیه الاستیک بررسی می‌شود. این ناحیه قبل از رسیدن به شکست بیولوژیکی محصولات است. بنابراین نیاز به دانستن مساحت سطح قبل از ناحیه شکست داریم. پس این خطا در اکثر تحقیقات اتفاق نخواهد افتاد. در مورد خطای رطوبت کم (نواحی سفید رنگ داخل دایره‌های قرمز) نیز ذکر این نکته مناسب است که معمولاً خواص مکانیکی محصول در یک مقدار جابجایی ثابت اندازه‌گیری می‌شود. به عنوان مثال، محصول به اندازه ۱ میلی‌متر جابجایی پروب تحت فشار قرار داده می‌شود و سپس خواص آن اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین با اعمال یک آستانه بر روی یک تصویر نسبت به اعمال آن بر روی چند تصویر، نتایج مناسب‌تری بدست می‌آید. همچنین در مواقعی که نیاز به محاسبه آبی وجود نداشته باشد، کاربر می‌تواند با دقت بیشتر این جداسازی را انجام دهد و نتایج بهتری کسب نماید.



شکل ۲. سطح موثر بین پروب و پیاز زرد با اندازه متوسط و رطوبت زیاد در جابجایی‌های متفاوت



شکل ۳. سطح موثر بین پروب و آلو قرمز با اندازه کوچک و رطوبت متوسط در جابجایی‌های متفاوت. مثلث‌های قرمز: ناحیه شکست محصول.



شکل ۴. سطح موثر بین پروب و فلفل دلمه سبز با اندازه بزرگ و رطوبت کم در جابجایی‌های متفاوت. دایره‌های قرمز: تشخیص نادرست سطح تماس به علت رطوبت کم، دایره زرد: عدم تشخیص سطح تماس به علت شکست محصول.

در پردازش تصاویر مربوط به آلو قرمز (شکل ۳)، خطای موجود نیز از نوع خطای پس از شکست می‌باشد. اما یک تفاوت بین این خطا و خطای شکل ۴ وجود دارد. در شکل ۴، بخشی که جزء سطح تماس بود، به عنوان سطح تماس در نظر گرفته نشد. اما در شکل مربوط به آلو قرمز، بخشی که جزء سطح تماس نبود، به عنوان سطح تماس در نظر گرفته شد. این خطا در جابجایی ۱۵ میلی‌متر و زمانی اتفاق افتاد که شکست محصول زیاد شد و رطوبت زیاد محصول به ناحیه سطح تماس رسید. بنابراین این قسمت به عنوان بخشی از سطح تماس اندازه‌گیری شد. توجه به نکته ای که در پاراگراف قبل ذکر شد، مهم است. یادآور شدیم که خواص مکانیکی محصولات کشاورزی عموماً در ناحیه الاستیک بررسی می‌شود. این ناحیه قبل از رسیدن به شکست بیولوژیکی محصولات است. بنابراین نیاز به دانستن مساحت سطح قبل از ناحیه شکست داریم. پس این خطا در اکثر تحقیقات اتفاق نخواهد افتاد. نتیجه قابل توجه دیگری که در این شکل مشخص است این که، برای محصولاتی که رطوبت مناسب دارند، حتی در لحظه شکست و پس از شکست تا زمانی که شکست وارد ناحیه سطح تماس نشده، مساحت سطح تماس قابل اندازه‌گیری است. این مساحت می‌تواند برای اندازه‌گیری پارامترهای لحظه شکست و یا مدلسازی ترک در محصولات کشاورزی استفاده شود.

نتیجه‌گیری

دانستن مساحت سطح تماس محصول با پروب در آزمون تست کشش-فشار به منظور محاسبه خواص مکانیکی محصولات کشاورزی، ضروری است. به علت ندانستن این پارامتر، از روش‌هایی که مستقل از مساحت سطح تماس هستند مانند روش ارائه شده در استاندارد ASABE (۲۰۰۸)، استفاده می‌شود. همچنین در برخی پژوهش‌ها از رنگ کردن سطح محصول، قرار دادن کاغذ حساس به فشار بین حصول و پروب و ... استفاده شده است. در این پژوهش سامانه‌ای ساخته شد که با استفاده از روش پردازش تصویر سطح تماس را اندازه‌گیری می‌کرد. محصول با سه رنگ و اندازه متفاوت که دارای سه رطوبت مختلف بودند بررسی شد. نمونه‌های مورد آزمون پیاز زرد (رطوبت بافت زیاد-اندازه متوسط)، فلفل دلمه (رطوبت بافت کم-اندازه بزرگ) و آلو قرمز (رطوبت بافت متوسط-اندازه کوچک) بود.

نتایج ارزیابی نشان داد که با نورپردازی و آستانه‌گذاری مناسب، سامانه همواره توانایی اندازه‌گیری سطح تماس را بطور مناسب دارد و رنگ پوست و اندازه محصول تاثیری در نتیجه ندارد. هر چه رطوبت بافت محصول بیشتر باشد، نتایج با کیفیت‌تری بدست می‌آید و جداسازی سطح تماس بهتر انجام می‌شود. برای محصولاتی که رطوبت مناسب دارند، حتی در لحظه شکست و پس از شکست تا زمانی که شکست وارد ناحیه سطح تماس نشده، مساحت سطح تماس قابل اندازه‌گیری است.

منابع

جعفری ملک‌آبادی، ا.، م.، خجسته‌پور، ب.، عمادی و م.ر.، گلزاریان. ۱۳۹۴. سامانه نورپردازی برای اندازه‌گیری خودکار ابعاد و مساحت سطح تماس در آزمون خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی. نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی تهران، کرج. ایران.
رضوی، س.م.ع.، و اکبری، ر. ۱۳۸۵. خواص بیوفیزیکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. چاپ اول.

سیدآبادی، ا.، م.، خجسته‌پور، ح.، صدرنیا، م.ح.، سعیدی راد. ۱۳۸۹. مطالعه خواص مکانیکی میوه طالبی به منظور کاهش تلفات آن. اولین همایش ملی مکانیزاسیون و فناوری های نوین در کشاورزی. اهواز.

صدرنیا، ح.، ب.، عمادی، ع.، رجبی پور، و جوس دی بیارد میکر. ۱۳۹۰. شبیه سازی کامپیوتری لهیدگی موضعی میوه سیب رقم رد دلشیز. مجله مهندسی بیوسیستم ایران. (۴۹). ۱. ۶۹-۷۸.

Arnold, P.C., and Robert, A. 1969. Fundamental aspects of load deformation behaviour of wheat grains. Trans. ASAE., 12: 104–108.

Kang, Y.S., Spilman, C.K., and Chung, G.D. 1995. Mechanical properties of wheat. Trans. ASAE., 38: 573–578.

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, 308–316.

Shitanda, D., Nishiyama, Y., and Koide, S. 2002. Compressive strength properties of rough rice considering variation of contact area. Journal of Food Engineering. 53: 53–58.