

## برآورد حجم سیب‌زمینی با استفاده از پردازش تصویر

جعفر امیری پریان، محمدهادی خوش تقاضا، احسان‌الله کبیر و سعید مینایی \*

\* به ترتیب دانشجوی سابق دکتری دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشیار دانشگاه تربیت مدرس؛ استاد؛ و دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، نشانی: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ص. پ. ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵، تلفن: ۴-۴۴۱۹۴۹۱۱ (۰۲۱). پیام‌نگار: khoshtag@modares.ac.ir  
تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۹/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۵/۱۳

### چکیده

محاسبه حجم محصولات کشاورزی به روش ریاضی، به دلیل شکل هندسی نامنظم آنها چندان دقیق نیست. یکی از راه‌حل‌های ممکن، پردازش تصویر در ماشین‌های جداساز پیوسته بر اساس بینایی ماشین است. هدف از این تحقیق، یافتن روشی مناسب برای برآورد حجم سیب‌زمینی با استفاده از پردازش تصویر است. به کمک یک دوربین دیجیتال و یک آینه تخت، از هر نمونه تنها یک تصویر از دو نمای آن تهیه شد. با کاربرد نرم‌افزار MATLAB®، تصاویر پردازش و ابعاد سیب‌زمینی بر حسب موقعیت لبه در ماتریس تصویر اندازه‌گیری شد. در این پژوهش حجم سیب‌زمینی پس از تصویربرداری، با دو روش برآورد شد: روش اول، تعیین رابطه تجربی مبتنی بر برآورد حجم بر اساس سه قطر اصلی و روش دوم، تقسیم تصویر به قطعات کوچک‌تر به شکل مخروط ناقص با مقطع بیضی و برآورد حجم از مجموع حجم قطعات. اندازه سه قطر اصلی و طول قطعات مخروط ناقص، با پردازش تصویر تعیین شدند. با اندازه‌گیری حجم واقعی سیب‌زمینی از طریق جابه‌جایی آب، میزان خطای هر دو روش محاسبه و مقایسه شد. در این تحقیق، ۵۰ عدد سیب‌زمینی (رقم مارفونا) به‌عنوان نمونه‌های مورد آزمایش انتخاب شدند. نتایج نشان داد که روش تقسیم تصویر به ۶۴ قسمت، حجم را با دقت بسیار بالاتری (خطای حدود ۸/۱۵ درصد) نسبت به روش رابطه تجربی (خطای ۲۰/۵ درصد) برآورد می‌کند. بنابراین، برای درجه‌بندی سیب‌زمینی بر اساس حجم، روش تقسیم تصویر به عنوان روش کاربردی پیشنهاد می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

بینایی ماشین، درجه‌بندی، قطر اصلی، مخروط ناقص

### مقدمه

کلی در درجه‌بندی محصولات دو منظور اصلی نهفته است، یکی بازارپسندی است که با یکنواختی و یکدست‌کردن محصول، مطلوبیت آن بیشتر می‌شود و دیگری از لحاظ تکنولوژی است زیرا یکنواخت بودن محصول، باعث افزایش کارایی بسیاری از فرایندهای صنعتی می‌شود. برخی از ماشین‌های صنعتی برای اندازه‌های خاصی از محصولات طراحی شده‌اند. به عنوان مثال، دستگاه‌های پوست‌گیری سیب، آب‌گیری پرتقال، و هسته‌گیری هلو اغلب برای میوه‌هایی به قطر

یکنواخت شدن مشخصه‌های ظاهری محصولات کشاورزی یکی از اهداف مهم در درجه‌بندی این محصولات به ویژه میوه‌ها و سبزی‌هاست. قیمت این محصولات عموماً وابسته به اندازه آنهاست. در کشور ما بیشتر محصولات کشاورزی عرضه‌شده به بازار مصرف جداسازی و طبقه‌بندی نمی‌شوند و در نتیجه، همراه با ضایعاتشان به بازار وارد می‌شوند که نارضایتی مصرف‌کنندگان را به دنبال دارد. به طور

۵-۶ سانتی متر ساخته شده‌اند و برای میوه‌های کمتر از ۵ یا بیشتر از ۱۰ سانتی متر مناسب نیستند (Hesari, 2003). امروزه کاربرد سیستم‌های بینایی ماشین در حیطه درجه‌بندی میوه‌ها بر اساس مشخصه‌های داخلی و خارجی رو به افزایش است. بینایی ماشین ابزاری غیر مخرب برای درجه‌بندی و جداسازی است که دقت و یکنواختی روند کنترلی از مزیت‌های عمده استفاده از این سیستم‌ها در کنترل کیفیت محصولات غذایی است. در این روش، بخش عمده‌ای از سیستم کنترل خودکار کیفیت به عهده حسگر بینایی است که در بازرسی و درجه‌بندی میوه‌ها و محصولات کشاورزی کاربرد گسترده‌ای دارد. به علت عدم تمرکز عامل انسانی، این امکان وجود دارد که نمونه‌هایی از محصولات آسیب‌دیده، حتی در مدت زمانی کوتاه تشخیص داده نشوند. در حالی که سیستم بینایی ماشین تضمین‌کننده استفاده از کل بازه زمانی برای بررسی محصولات است. این سیستم قابلیت خودکارسازی درجه‌بندی دستی و استانداردسازی آن را داراست و کار خسته‌کننده بازرسی میوه‌ها را توسط انسان برطرف می‌کند (Brosnan & Sun, 2002).

توجه به این نکته ضروری است که درجه‌بندی میوه‌ها بر اساس خصوصیات خارجی، معرفی و با اندازه‌گیری قطر سیب از روی تصاویر گرفته‌شده و تعیین مساحت و محیط آن با فرض کروی بودن جداسازی کرده‌اند. حجم، مشخصه‌ای مناسب برای درجه‌بندی محصولات کشاورزی است، زیرا به کمک حجم و جرم محصولات، چگالی آن‌ها محاسبه می‌شود و از این طریق می‌توان به عیوب داخلی آنها نیز پی برد. اگر چگالی محصولات ثابت فرض شود، می‌توان جرم را با توجه به حجم آنها تعیین کرد. تعیین سطح و حجم برخی مواد غذایی، در صنایعی مثل پخت مواد یا انجماد آنها، بسیار مهم است. دو و سان (Du & Sun, 2006) در بررسی‌های خود سطح و حجم قطعات کوکتلی بیضوی گوشت خوک را به کمک تصویربرداری و پردازش تصویر، محاسبه کردند. در این تحقیق، قطر بزرگ و کوچک جسم پس از پیش‌پردازش اندازه‌گیری و از رابطه بیضی‌گون منتظم برای برآورد سطح و حجم قطعات کوکتل استفاده شده است. میلر و همکاران (Miller et al., 1988)، با اندازه‌گیری قطر متوسط پرتقال، حجم این میوه را با فرض کروی بودن محاسبه کردند. در این تحقیق، قطر متوسط برابر با میانگین ۸ قطر اندازه‌گیری‌شده در چرخش‌های متوالی ۲۲/۵ درجه گرداگرد تصویر میوه است. نتیجه برآورد حجم با این

۵-۶ سانتی متر ساخته شده‌اند و برای میوه‌های کمتر از ۵ یا بیشتر از ۱۰ سانتی متر مناسب نیستند (Hesari, 2003). امروزه کاربرد سیستم‌های بینایی ماشین در حیطه درجه‌بندی میوه‌ها بر اساس مشخصه‌های داخلی و خارجی رو به افزایش است. بینایی ماشین ابزاری غیر مخرب برای درجه‌بندی و جداسازی است که دقت و یکنواختی روند کنترلی از مزیت‌های عمده استفاده از این سیستم‌ها در کنترل کیفیت محصولات غذایی است. در این روش، بخش عمده‌ای از سیستم کنترل خودکار کیفیت به عهده حسگر بینایی است که در بازرسی و درجه‌بندی میوه‌ها و محصولات کشاورزی کاربرد گسترده‌ای دارد. به علت عدم تمرکز عامل انسانی، این امکان وجود دارد که نمونه‌هایی از محصولات آسیب‌دیده، حتی در مدت زمانی کوتاه تشخیص داده نشوند. در حالی که سیستم بینایی ماشین تضمین‌کننده استفاده از کل بازه زمانی برای بررسی محصولات است. این سیستم قابلیت خودکارسازی درجه‌بندی دستی و استانداردسازی آن را داراست و کار خسته‌کننده بازرسی میوه‌ها را توسط انسان برطرف می‌کند (Brosnan & Sun, 2002).

تنوع زیاد شکل، اندازه، و نیز آسیب‌پذیری محصولات کشاورزی جداسازی مکانیکی این محصولات را مشکل می‌سازد. از این رو استفاده از روش‌های الکترونیکی برای تعیین شکل و اندازه این محصولات مفید به نظر می‌رسد (Mc Rae, 1985). اندازه، یکی از مشخصه‌های ظاهری برای درجه‌بندی محصولات است که در بینایی ماشین با استفاده از سطح، حجم، محیط، یا قطر مشخص می‌شود. قطر میوه برای محاسبه سطح، حجم، یا محیط میوه، معمولاً قطر آن در قسمت میانی (استوایی) اندازه‌گیری می‌شود که بستگی به شکل میوه دارد

برآورد حجم سیبزمینی با استفاده از...

منظم هندسی دیگر شبیه نیست. بنابراین، برآورد حجم این محصول به راه‌حل‌های خاص خود نیاز دارد. هدف از این تحقیق، کاربرد و مقایسه روش رابطه تجربی با روش تقسیم تصویر در برآورد حجم سیبزمینی با استفاده از پردازش تصویر است.

### مواد و روش‌ها

#### انتخاب نمونه و تعیین پارامترهای مؤثر در

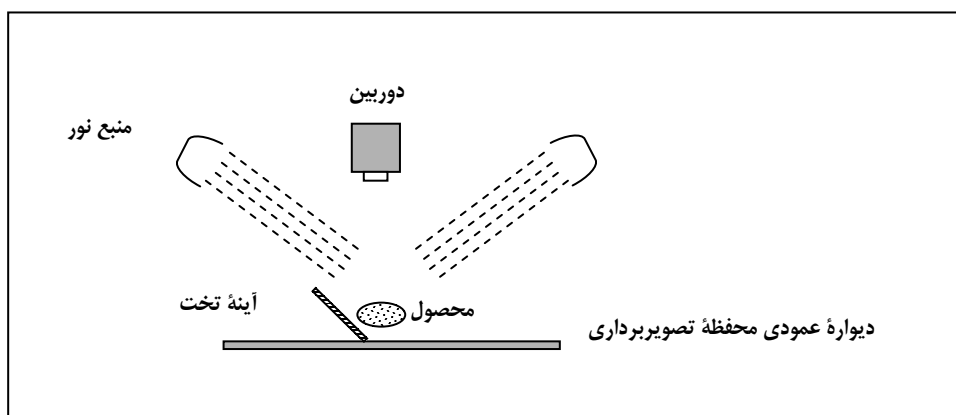
#### تصویربرداری

پنج‌جای عدد سیبزمینی رقم مرفونا به طور تصادفی به عنوان نمونه انتخاب شد. نمونه‌ها کاملاً شسته شدند و در جای مناسبی قرار گرفتند تا آب سطحی آن‌ها تبخیر شود. از نمونه‌ها در یک سامانه بینایی ماشین متشکل از محفظه تصویربرداری، دوربین، بخش نورپردازی، و آینه تخت تصویربرداری شد. دوربین روبه‌روی نمونه‌ها قرار گرفته بود. برای کاهش ایجاد سایه، نور در راستای دوربین و عمود بر آن به نمونه‌ها تابیده می‌شد که برای ایجاد آن از لامپ‌های مهتابی سفید استفاده شد. شکل ۱ طرحواره سامانه بینایی ماشین را نشان می‌دهد. در این شکل محل قرارگیری اجزای آن از نمای بالا نشان داده شده است. از هر نمونه، یک تصویر از دو نمای عمود بر هم با کاربرد آینه تخت با زاویه قرارگیری ۴۵ درجه نسبت به خط عمود بر راستای دوربین تهیه شد (شکل ۲-الف). رنگ سیاه برای زمینه تصاویر، با به کارگیری کاغذ باستلی اشتنباخ انتخاب شد. مزیت این کاغذ، مات بودن رنگ سیاه آن است. دوربین دیجیتال BenQ مدل DC-1300 و ابعاد تصاویر گرفته شده در این تحقیق ۶۴۰×۴۸۰ پیکسل است.

روش، مقداری بیشتر از حجم اندازه‌گیری شده با روش جابه‌جایی مایع گزارش شده است.

مرچنت (Marchant, 1990)، با گرفتن تصاویری از سیبزمینی‌های غلتان روی نقاله حامل در یک سیستم پیوسته، رابطه‌ای را برای برآورد وزن آن‌ها براساس مجذور میانگین مساحت سطح تصویر و بیشینه قطر ۱۲ تصویر ارائه کرد. فاربز (Forbes, 2000)، با استخراج ۱۴ ویژگی از هر تصویر مربوط به پرتقال، گلابی، لیمو، و سیبزمینی و آموزش شبکه عصبی، حجم آن‌ها را برآورد کرد. او با قراردادن نمونه‌های مورد آزمایش در اتاقک مخصوص تصویربرداری متشکل از ۳ آینه (به صورت قسمتی از یک هشت‌ضلعی منتظم) و زاویه تصویربرداری ۴۵ درجه نسبت به افق، از هر نمونه در ۶ جهت مختلف و در مجموع ۲۴ تصویر با قراردادن آن‌ها در مرکز آینه‌ها تهیه کرده است.

به نظر می‌رسد، در بیشتر تحقیقات انجام شده به جز دو مورد اخیر، حجم محصولات با فرض منتظم بودن شکل هندسی آن‌ها برآورد شده است. در تحقیق مرچنت (Marchant, 1990) مستقیماً حجم سیبزمینی محاسبه نشده است و فاربز (Forbes, 2000) نیز از روشی برای تعیین حجم محصولات بهره گرفته که اولاً بار محاسباتی بالایی داشته باشد (استخراج ۱۴ ویژگی از هر ۲۴ تصویر به‌طور جداگانه و آموزش شبکه عصبی با آن‌ها) و ثانیاً استفاده از چنین روشی در سیستم‌های جداسازی پیوسته، احتمالاً ناممکن است و اگر مقدور باشد هزینه بالایی دارد. سیبزمینی یکی از محصولات مهم و پرمصرف است که از لحاظ شکل، بسیار نامنظم است و بر خلاف بیشتر محصولات دیگر مثل پرتقال (شبه کره)، گلابی (شبه کره در قسمت بزرگ‌تر و مخروط ناقص در قسمت کوچک‌تر)، یا سیب درختی (شبه مخروط ناقص یا کره)، به هیچ شکل



شکل ۱- طرحواره سامانه بینایی ماشین و محل قرارگیری اجزای آن (نمای بالایی)

این کار باید تصاویر رنگی به دوسطحی<sup>۱</sup> تبدیل شوند (شکل ۲). در ابتدا با سعی و خطا مشاهده شد که مؤلفه قرمز تصویر اصلی (سه رنگ) گویاتر از دو مؤلفه دیگر (سبز و آبی) است. بنابراین با انتخاب این بخش، کار محاسبات به یک سوم کاهش یافت (شکل ۲-ب). تبدیل مؤلفه قرمز تصویر به دوسطحی، با انتخاب آستانه<sup>۲</sup> (ضریبی از مقدار بیشینه روشنایی تصویر) صورت گرفت و تمام پیکسل‌های تصویر با شدت رنگ کوچک‌تر یا مساوی آن، به صفر و بیشتر از این مقدار به یک، تبدیل شدند. در تصویر دوسطحی، صفر معرف رنگ سیاه و یک معرف سفید است.

برای تعیین آستانه، ابتدا از روش اتسو<sup>۳</sup> استفاده شد. این روش، آستانه را بر اساس کمینه‌سازی اختلاف از میانگین<sup>۴</sup> دو رنگ سفید (۲۵۵) و سیاه (صفر) انتخاب می‌کند (Gonzalez & Wintz, 1979). اما با مقدار آستانه به دست آمده از این روش (۰/۶) مقدار بیشینه روشنایی تصویر، سطح کامل نمونه‌ها مشخص نمی‌شد. زیرا در تصویر اصلی، قسمت‌هایی از سطح محصول، خصوصاً مرز، به دلیل کمبود نور، ایجاد سایه، و یا وجود آفت روی پوست، تیره‌تر از مرکز نمونه بود که با آستانه‌گیری از آن با

برای واسنجی و تعیین میزان بزرگنمایی تصویر، از یک گوی کروی با قطر ۴۰ میلی‌متر استفاده شد. سه تصویر از این گوی، در شرایط مشابه تهیه شد. مساحت سطح تصویری گوی در تصویر دوسطحی، با شمارش پیکسل‌های تشکیل‌دهنده آن محاسبه شد. مساحت واقعی سطح تصویر گوی با استفاده از رابطه مساحت دایره‌ای با قطر ۴۰ میلی‌متر تعیین شد و پس از آن برای یافتن ضریب واسنجی، از رابطه ۱ استفاده شد.

$$CC = \sqrt{\frac{A_{real}}{A_{view}}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $CC$  = ضریب واسنجی؛  $A_{real}$  = مساحت واقعی سطح تصویری گوی؛ و  $A_{view}$  = مساحت سطح تصویر گوی در هر نمای تصویر دوسطحی است.

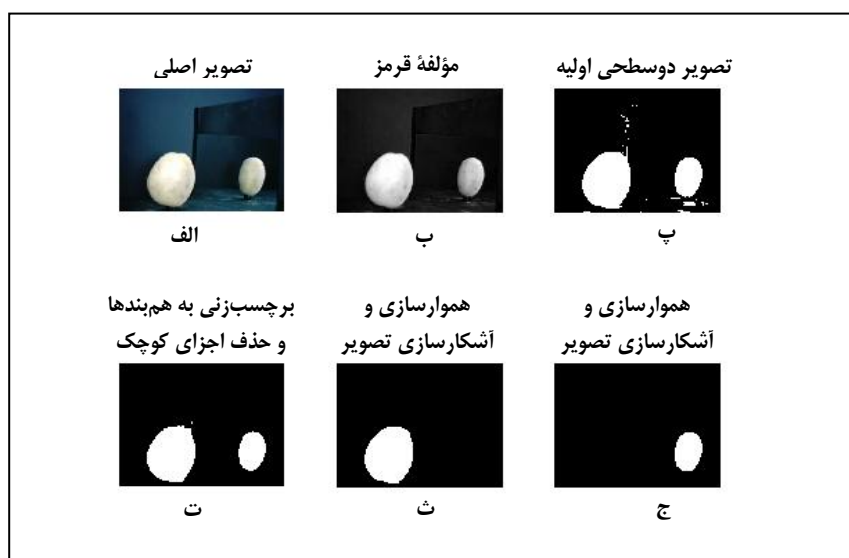
### پیش پردازش

برای اندازه‌گیری مشخصه‌های تصویری سیب‌زمینی، لازم است لبه تصویر گرفته‌شده آشکارسازی شود، که برای

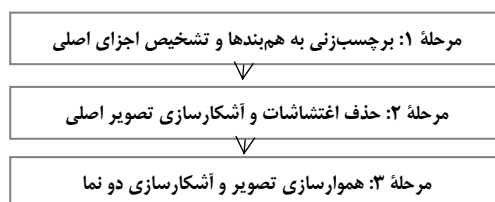
برآورد حجم سیب زمینی با استفاده از...

آستانه  $0/3$  انتخاب شد. این مقدار، حد آستانه بهینه برای آشکار شدن مرز نمونه‌ها و کمترین اغتشاش نسبت به سطوح آستانه کوچک‌تر از این مقدار بود. تصویر حاصل، به دلیل وجود اغتشاش‌های طبیعی و ناشی از انتخاب حد آستانه اختیاری، قابل استفاده نبود. برای حذف اغتشاشات، الگوریتم شکل ۳، به کار گرفته شد.

مقدار حاصل، در تصویر دوسطحی حذف و به عبارت دیگر زمینه محسوب می‌شد. بنابراین، آستانه‌های پایین‌تر از حد به دست آمده قبلی به کار گرفته شد تا مرز نمونه‌ها به خوبی آشکار شود که البته این کار با ایجاد مقداری اغتشاش ناخواسته همراه بود (شکل ۲- پ). برای آشکارسازی مرز کامل نمونه‌ها با سعی و خطا، مقدار



شکل ۲- آشکارسازی دو نمای تصویر سیب زمینی



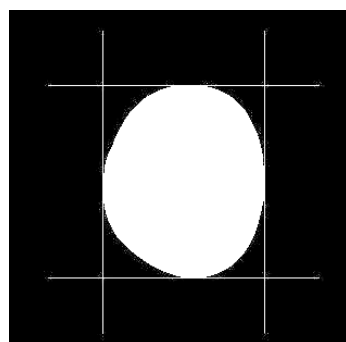
شکل ۳- نمودار روندنمای آشکارسازی دو نمای تصویر سیب زمینی

برای این کار، به هر یک از اجزای همبند تصویر، عددی نسبت داده شد (برچسب‌زنی). تعداد پیکسل‌های تشکیل‌دهنده هر برچسب، شمارش شد و سپس اجزای به هم پیوسته‌ای (همبند) انتخاب شدند که حداقل از

در مرحله ۱، با حذف اجزای کوچک (تک‌پیکسل‌ها و یا اجزای غیر اصلی که اغتشاش به حساب می‌آمدند) اجزای بزرگ در تصویر باقی گذاشته شد و شکل‌های کوچکی که نمی‌توانستند جسم اصلی باشند حذف شدند.

آشکارسازی شدند (شکل ۲- ث و ج). همانطور که گفته شد از هر نمونه سیب زمینی، یک تصویر از دو نمای عمود بر هم تهیه و هر یک از این تصاویر به تصویر دوسطحی تبدیل شد. در هر نما، روی هر محور در مختصات کارتیزین (بدون توجه به جهت قرارگرفتن محصول)، نقاط ابتدایی و انتهایی مرز جسم مشخص می‌شد. با داشتن این نقاط، ناحیه مورد نظر<sup>۵</sup> با مستطیل محیطی با ابعادی برابر با تفاضل نقاط ابتدایی و انتهایی در هر محور در نظر گرفته می‌شد (شکل ۴). در اجرای هر یک از مراحل ذکرشده برای پیش پردازش تصاویر، زمان لازم برای محاسبه به عنوان بار محاسباتی عمل مورد نظر ثبت می‌شد.

۱۰۰۰۰ پیکسل تشکیل شده بودند. با توجه به شرایط تصویربرداری، ۱۰۰۰۰ پیکسل انتخاب شد. در مرحله<sup>۲</sup>، حذف اغتشاشات با مقداردهی اجزای کوچک به صفر، انجام و تصویر اصلی سیب زمینی نمایان شد (شکل ۲- ت). در این تصویر ناهمواری‌هایی روی مرز سیب زمینی باقی مانده بود. برای هموارسازی آن در مرحله<sup>۳</sup>، بازکردن<sup>۱</sup> تصویر با یک عنصر ساختاری<sup>۲</sup> دیسکی با قطر ۲۰ پیکسل انجام شد. دلیل انتخاب عنصر ساختاری دیسکی، هماهنگی آن با نوع تصویر سیب زمینی بود. بازکردن عبارت است از سایش<sup>۳</sup> و سپس فراخس<sup>۴</sup> تصویر با یک عنصر ساختاری مشخص (Gonzalez & Wintz, 1979). پس از اجرای مراحل فوق، تصاویر دو نمای محصول



شکل ۴- تعیین ناحیه مورد نظر

که هیچ تماسی با جداره بشر نداشتند. هنگامی که ترازو به حالت پایدار درمی‌آمد، جرم نشان داده شده توسط ترازو، حجم نمونه در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از ایجاد خطا به دلیل تغییر مقدار چگالی آب، پس از اندازه‌گیری حجم هر ۵ نمونه، آب درون بشر تعویض شد. برآورد حجم سیب زمینی به دو روش، (یکی روش رابطه تجربی و دیگری روش تقسیم تصویر)، در زیر توضیح داده خواهد شد.

پس از تصویربرداری از نمونه‌ها، حجم واقعی آن‌ها با روش مقدار آب جابه‌جا شده اندازه‌گیری شد. برای این کار، تقریباً چهارپنجم یک بشر ۵۰۰ سی‌سی از آب خالص (چگالی تقریباً برابر با یک) پر شد. بشر روی ترازوی رقمی<sup>۶</sup> با ظرفیت اندازه‌گیری حداکثر ۶۱۰۰ گرم و با دقت ۰/۰۱ گرم قرار داده و ترازو در این حالت روی عدد صفر تنظیم شد. پس از آن، هر یک از نمونه‌ها با یک رشته نخ باریک درون آب به طور معلق قرار داده می‌شدند به طوری

1- Opening  
4- Dilation

2- Structuring Element  
5- Region of Interest

3- Erosion  
6- Sartorius Aggottingen, Germany

برآورد حجم سیبزمینی با استفاده از...

و به کمک رگرسیون خطی با استفاده از نرم‌افزار Excel 2002، ضرایب رابطه ۲ مشخص شد. پس از به دست آوردن این رابطه، با اندازه‌گیری سه قطر اصلی نمونه‌ها در سه تکرار به کمک پردازش تصویر، حجم سیبزمینی محاسبه شد. برای این کار در هر تصویر با یافتن مرکز مستطیل محیطی و چرخش ۱۸۰ درجه‌ای، فاصله نقاط متقارن روی مرز نسبت به مرکز با شمارش پیکسل‌ها به منظور تعیین بیشترین و کمترین قطر جسم، اندازه‌گیری می‌شد. سپس طبق تعریف سه قطر اصلی در محصولات کشاورزی (Stroshine, 1998)، بزرگ‌ترین قطر از بزرگ‌ترین سطح تصویری برابر با  $a$ ، کوچک‌ترین قطر از کوچک‌ترین سطح تصویری برابر با  $c$  و کوچکترین قطر از بزرگ‌ترین سطح تصویری برابر با  $b$  در نظر گرفته شد.

#### ب) تقسیم تصویر

در این روش حجم سیب زمینی، به حجم‌های کوچک‌تری که هندسه منظم‌تری دارند تقسیم شد (شکل ۵). برای یافتن تعداد مقطع بهینه برای برآورد حجم با دقت مناسب، ۸ حالت برای تقسیم تصویر ( $2^1$  تا  $2^8$  مقطع) با توجه به اندازه تصاویر ( $640 \times 480$ ) انتخاب شد. بدین معنی که بزرگ‌ترین بعد تصویر ( $640$  پیکسل) در کمترین تعداد مقطع به ۲ قسمت و در بیشترین حالت به ۲۵۶ قسمت تقسیم شد. دلیل کاربرد توان ۲، تسریع در رسیدن به حالت بهینه بود. هر قسمت به صورت یک مخروط ناقص با مقطع بیضی در نظر گرفته شد (شکل ۵-ب). حجم هر یک از این قطعات از رابطه ۳ و سپس به کمک رابطه ۴ حجم کل از مجموع حجم‌های کوچک‌تر محاسبه شد.

#### برآورد حجم

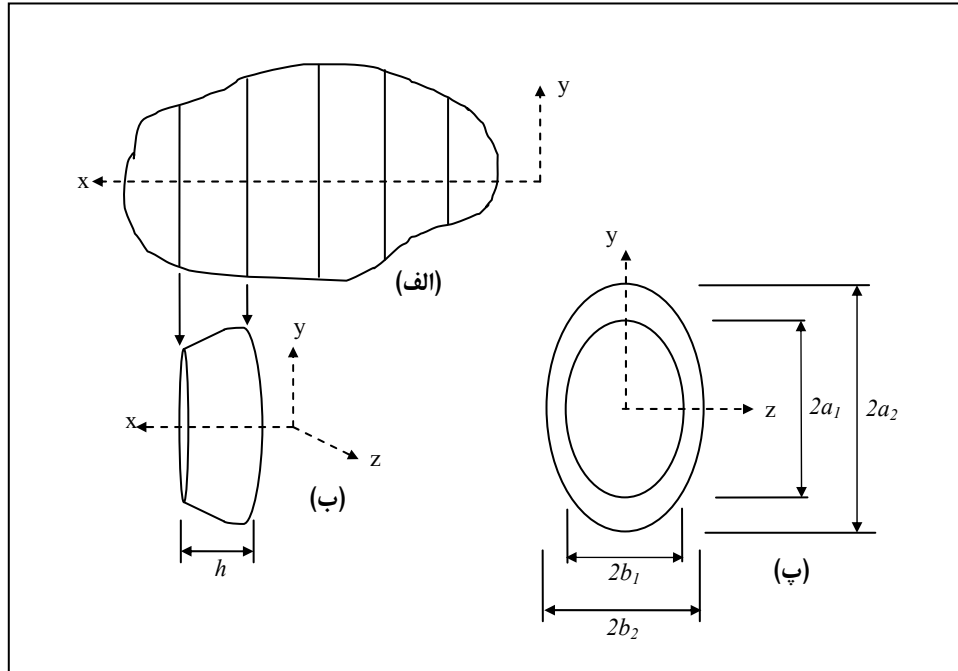
در این پژوهش حجم سیبزمینی پس از تصویربرداری، با دو روش برآورد شده است؛ روش اول، تعیین رابطه تجربی مبتنی بر برآورد حجم بر اساس سه قطر اصلی با فرض بیضی‌گون بودن شکل سیبزمینی و روش دوم، بر اساس تقسیم تصویر به قطعات کوچک‌تر به شکل مخروط ناقص با مقطع بیضی و برآورد حجم از مجموع حجم قطعات. اندازه سه قطر اصلی و طول قطعات مخروط ناقص، به کمک پردازش تصویر تعیین می‌شوند. دلیل کاربرد دو روش فوق، برآورد حجم بر اساس محاسبه ساده‌ترین ویژگی تصویر یعنی فاصله دو نقطه از تصویر (در روش اول سه قطر اصلی و در روش دوم طول ابعاد قطعات) است. فاصله دو نقطه در تصویر، از لحاظ محاسباتی کم‌هزینه‌ترین ویژگی تصویر است که سرعت محاسبه آن نسبت به ویژگی‌های پیچیده بسیار بالاتر است (Forbes, 2000).

#### الف) رابطه تجربی

در این روش، از رابطه ۲ برای برآورد حجم سیبزمینی با فرض بیضی‌گون بودن شکل آن استفاده شد:

$$V = M a^{m_1} b^{m_2} c^{m_3} \quad (2)$$

در این رابطه،  $V$  = حجم؛  $a$  = قطر بزرگ؛  $b$  = قطر متوسط؛  $c$  = قطر کوچک؛ و  $M$ ،  $m_1$ ،  $m_2$  و  $m_3$  = ضرایب ثابت هستند. برای تعیین ضرایب این معادله، از تبدیل آن به رابطه خطی با لگاریتم‌گیری طبیعی استفاده شد. سه قطر اصلی (با کولیس)، و حجم واقعی (به روش مقدار آب جابه‌جا شده) مربوط به ۵۰ نمونه سیبزمینی، اندازه‌گیری



شکل ۵- نمایش الف) تصویر سیب زمینی، ب) تقسیم آن به قطعاتی به شکل مخروط ناقص با مقطع بیضی و پ) پارامترهای مربوط

۳- مقادیر قطر بیضی‌های دو قاعده، واقع در صفحه  $y-z$  اندازه‌گیری می‌شوند به گونه‌ای که مقادیر  $a_1$  و  $a_2$  از یک نما و  $b_1$  و  $b_2$  از نمای دیگر به دست می‌آیند (شکل ۵-پ).

۴- با قراردادن مقادیر به دست آمده در رابطه ۳، حجم هر قطعه ( $v_i$ ) محاسبه و پس از جای‌گذاری حجم قطعات محاسبه شده در رابطه ۴ حجم کل سیب‌زمینی ( $V_{t(n)}$ ) در تعداد تقسیم تصویر مشخص ( $n$ ) به دست می‌آید. شکل ۶ نمونه‌ای از کاربرد عملی این الگوریتم را روی تصویر دو نمای یک نمونه سیب‌زمینی نشان می‌دهد.

$$v_i = \frac{\pi h_i}{6} (2a_{1i}b_{1i} + a_{1i}b_{2i} + a_{2i}b_{1i} + 2a_{2i}b_{2i}) \quad \text{و} \quad i = 2^n \quad (n=1 \dots 8) \quad (3)$$

$$V_{t(n)} = \sum_{i=1}^{2^n} v_i, \quad (n=1 \dots 8) \quad (4)$$

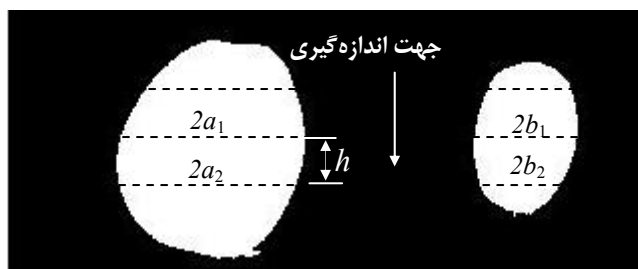
الگوریتم محاسبه حجم محصول به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- ابتدا تصویر به تعداد مقاطع مورد نظر تقسیم می‌شود (شکل ۵-الف).

۲- در هر مقطع، مقدار  $h$  از تقسیم طول تصویر واقع بر محور  $x$  بر تعداد کل تقسیم تصویر محاسبه می‌شود (شکل ۵-ب).



برآورد حجم سیبزمینی با استفاده از...



شکل ۶- روش اندازه گیری ابعاد در دو نمای تصویر

## ارزیابی مدل

برای تعیین میزان درصد خطای برآورد حجم ( $ER$ ) در هر مدل برآورد حجم، رابطه ۵ به کار برده شد (Forbes, 2000).

$$ER = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{RV_i - EV_i}{RV_i} \right)^2}{N}} \times 100 \quad (5)$$

خطاست.

## نتایج و بحث

جدول ۱، مشخصات سه قطر اصلی و حجم نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. پس از تعیین ضرایب رابطه ۲، با سه قطر اصلی و حجم واقعی ۵۰ نمونه سیبزمینی، رابطه ۶ به دست آمد.

$$V = 1.853 a^{0.539} b^{1.476} c^{0.451} \quad (6)$$

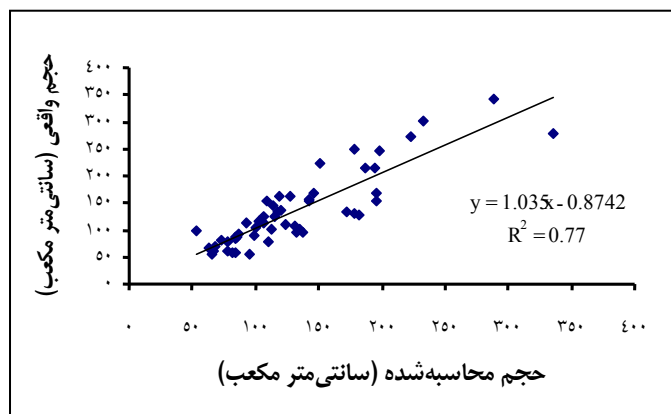
در این رابطه،  $RV$ ، حجم واقعی و  $EV$ ، حجم برآورد شده و در واقع ریشه میانگین نسبت مجذور

جدول ۱- مشخصات سه قطر اصلی و حجم واقعی نمونه‌های سیبزمینی مورد مطالعه

مشخصه	مقدار			
	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
قطر بزرگ ( $a$ ) (سانتی‌متر)	۶/۷۷	۱/۳۷	۵/۱۷	۹/۹۹
قطر متوسط ( $b$ ) (سانتی‌متر)	۵/۶۲	۱/۰۴	۴/۲۳	۸/۶۷
قطر کوچک ( $c$ ) (سانتی‌متر)	۴/۶۶	۰/۴۹	۳/۵۶	۵/۴۹
حجم (سانتی‌متر مکعب)	۱۳۴/۵۷	۶۸/۰۵	۵۳/۶۳	۳۴۳/۱۰

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، محدوده مناسبی از اندازه‌های مختلف سیبزمینی برای مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۷، نمودار حجم محاسبه‌شده (با رابطه ۶) را در مقابل حجم واقعی نمونه‌ها (از جابه‌جایی مایع) نشان می‌دهد. پس از محاسبه حجم با این روش، بهترین برازش برای نقاط، خط مستقیمی با شیب ۱/۰۳۵ و عرض از مبدأ برابر با ۰/۸۷۴۲- با مقدار ضریب همبستگی ( $R^2 = 0/77$ ) است. در این برازش، بین مقادیر محاسبه‌شده

و واقعی ضریب همبستگی خوبی وجود ندارد که نشان‌دهنده عدم همگرایی خوب نقاط نسبت به خط برازش است. در ارزیابی مدل رابطه تجربی، طبق رابطه ۵ میانگین خطا در برآورد حجم حدود ۲۰/۵ درصد محاسبه شد.



شکل ۷- نمودار حجم محاسبه شده در مقابل حجم واقعی

در برآورد حجم به روش تقسیم تصویر، حجم هر نمونه در ۸ حالت محاسبه شد. برای بررسی نتایج، از طرح پایه کاملاً تصادفی در سه تکرار استفاده شد. نتایج آماری اختلاف معنی‌داری را بین خطای حجم برآورده در تعداد تقسیمات مختلف تصویر در سطح احتمال  $(\alpha=0/01)$  نشان داد که برای مقایسه میانگین از آزمون چنددامنه‌ای دانکن استفاده شد. جدول ۲، مقایسه میانگین خطای برآورد حجم را نشان می‌دهد. در این جدول، نتیجه مقایسه میانگین، خطای تقسیم تصویر را به پنج گروه از a تا e گروه‌بندی کرده است. بین میانگین‌های بالاتر از ۳۲ قسمت، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد و تعداد تقسیم تصویر به ۶۴ قسمت، کم‌ترین مقطع و نزدیک‌ترین را به حجم واقعی، با دقت مناسب و بار محاسباتی حداقل، نشان داد.

خطای برآورد حجم را در این روش به طور کلی می‌توان به ناهمگون بودن شکل سیب‌زمینی به صورت بیضی‌گون کامل نسبت داد. با مقایسه رابطه حجم بیضی‌گون منتظم ( $V=\pi abc$ ) با رابطه حاصل از این روش و خطای به دست آمده نسبتاً بالای آن، تفاوت در ضرایب مشهود است. به نظر می‌رسد که حجم سیب‌زمینی با توجه به پیچیدگی شکل آن، نمی‌تواند تنها بر اساس سه بعد و استفاده از یک رابطه غیرخطی تقریباً ساده به درستی برآورد شود. برآورد حجم با این روش خصوصاً با کاربرد پردازش تصویر، به دلیل محاسبه ساده‌ترین ویژگی تصویر، ساده به نظر می‌رسد اما خطای زیاد این روش، کاربرد آن را ناممکن می‌سازد. بنابراین، روش دیگری برای برآورد حجم به کار گرفته شد که در بخش قبلی به شرح آن پرداخته شد. در اینجا نتایج مربوط به این روش توضیح داده می‌شود.

برآورد حجم سیب زمینی با استفاده از...

جدول ۲- مقایسه میانگین خطای برآورد حجم به روش تقسیم تصویر برای ۵۰ نمونه

در سه تکرار در سطح احتمال ۱

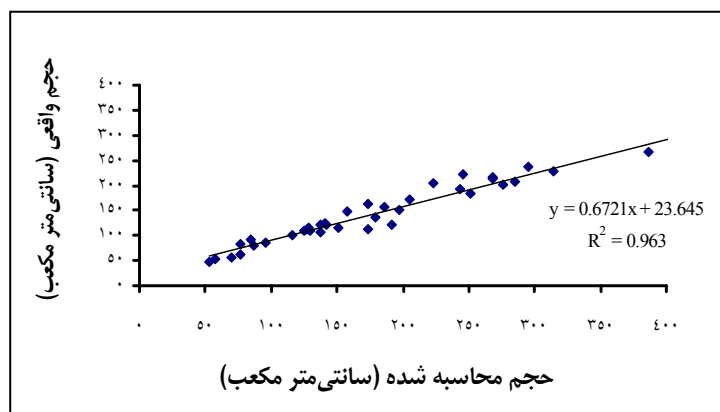
میانگین خطا (درصد)	منابع تغییر (تعداد تقسیمات تصویر)
۳۷/۳۵ <sup>e</sup>	۲
۳۱/۳۶ <sup>d</sup>	۴
۲۶/۸۹ <sup>c</sup>	۸
۱۳/۷۸ <sup>b</sup>	۱۶
۱۰/۴۵ <sup>b</sup>	۳۲
۸/۱۵ <sup>a</sup>	۶۴
۸/۱۵ <sup>a</sup>	۱۲۸
۸/۱۵ <sup>a</sup>	۲۵۶

تعداد مشاهده در هر تقسیم تصویر: ۵۰

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

محاسبه‌شده وجود دارد که بالابودن ضریب همبستگی رابطه خطی نمودار ( $R^2 = 0.96$ ) همگرایی خوب نقاط را نسبت به خط برازش نشان می‌دهد.

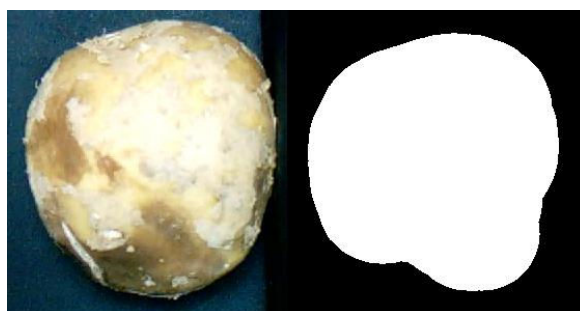
شکل ۸، نمودار حجم محاسبه‌شده را با تقسیم تصویر به ۶۴ قسمت در مقابل حجم واقعی نشان می‌دهد. در این نمودار، رابطه خطی بسیار خوبی بین حجم واقعی و حجم



شکل ۸- نمودار حجم محاسبه‌شده در تقسیم تصویر به ۶۴ قسمت در مقابل حجم واقعی نمونه‌ها

حذف شود (شکل ۹). همچنین ممکن است ابعاد متناظر، مثلاً  $a_1$  و  $b_1$ ، به دلیل پردازش‌های جداگانه دو نما و استفاده از روش بازکردن برای هموارسازی تصویر، درست در محل‌های یکسان اندازه‌گیری نشده باشند.

خطای حجم محاسبه‌شده در این روش با استفاده از رابطه ۵، ۸/۱۵ درصد محاسبه شد. دلیل بروز خطا در این روش ممکن است ناشی از خطا در اندازه‌گیری ابعاد تصاویر باشد، زیرا برخی عوامل نظیر کمبود نور، آفت روی پوست، یا سایه باعث می‌شود بعضی از قسمت‌های اصلی تصویر



شکل ۹- حذف شدن قسمت‌های اصلی تصویر به دلیل وجود آفت

روی پوست در تبدیل تصویر

(Marchant, 1990)، به طور مستقیم به برآورد حجم اشاره نشده اما به طور ضمنی می‌توان با فرض یکسان بودن چگالی سیب‌زمینی و تعیین یک ضریب واسنجی مناسب این تبدیل را انجام داد، هر چند این فرضیه در جایی که برآورد حجم برای تعیین چگالی به کار رود جایز نیست. در این روش، ۱۲ تصویر از هر نمونه غلطان روی نقاله حامل پردازش شده است که در این مورد نیز روش در پیش گرفته شده در تحقیق حاضر (پردازش تنها یک تصویر از هر نمونه در ۲۸۲ میلی‌ثانیه) نسبت به روش مرجنت بار محاسباتی بسیار کمتری دارد.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که برآورد حجم سیب‌زمینی به روش تقسیم تصویر به مقاطع مخروط ناقص با مقطع بیضی، دقت بسیار بالایی دارد به طوری که با تقسیم تصویر به ۶۴ قسمت، حجم سیب‌زمینی با خطای حدود ۸ درصد قابل برآورد است. همچنین، پایین بودن بار محاسباتی به دلیل پردازش تنها یک تصویر در ۲۸۲ میلی‌ثانیه و دقت مناسب، کاربردی بودن این روش را در ماشین‌های جداسازی غیرمخرب بر اساس بینایی ماشین به خوبی نمایان می‌سازد.

بار محاسباتی کلیه مراحل پیش‌پردازش و برآورد حجم هر نمونه سیب‌زمینی به کمک مدل تقسیم تصویر در پردازش به کمک نرم‌افزار MATLAB® نسخه ۷/۰ و یک رایانه با مشخصات P.IV با سرعت پردازش ۱/۷ گیگاهرتز و ۵۱۲ مگابایت حافظه برابر با ۲۸۲ میلی‌ثانیه محاسبه شد که نشان‌دهنده عملی بودن الگوریتم‌های پیشنهادی در کاربردهای عملی است. اما به طور کلی در مقایسه با دو روش انجام‌شده به وسیله مرجنت (Marchant, 1990) و فاربز (Forbes, 2000)، این نکته یادآوری می‌شود که هدف از این تحقیق یافتن روشی با کمترین بار محاسباتی و دقت مناسب به منظور کاربردهای عملی است در حالی که در روش فاربز (Forbes, 2000)، سه آینه برای تهیه تصاویر به کار رفته است و از هر نمونه مورد مطالعه، ۲۴ تصویر تهیه‌شده که پردازش آنها در صورت مقایسه با بار محاسباتی لازم برای پردازش یک تصویر از هر نمونه در پژوهش حاضر، مطمئناً دارای بار محاسباتی زیادی خواهد بود و زمان زیادی برای پردازش طلب می‌کند. همچنین، ایجاد چنین چیدمانی در کاربردهای عملی تقریباً ناممکن است یا با هزینه بسیار بالایی انجام می‌شود در صورتی که در پژوهش حاضر تنها از یک آینه استفاده شده است. در روش مرجنت

## مراجع

- Blasco, J., Aleixos, N. and Molto, E. 2003. Machine vision system for automatic quality grading of fruit. *Biosystems Eng.* 85(4): 415-423.
- Brosnan, T. and Sun, D. W. 2002. Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems- a review. *Computers and Electronics in Agric.* 36, 193-213.
- Du, C. J. and Sun, D. W. 2006. Estimating the surface area and volume of ellipsoidal ham using computer vision. *J. Food Eng.* 73(3): 260-268.
- Forbes, K. 2000. Volume estimation of fruit from digital profile image. M. Sc. Thesis of Electronic Engineering. Cape Town University. Cape Town. South Africa.
- Gonzalez, R. C. and Wintz, P. 1979. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Pub. Co.
- Hesari, J. 2003. *Canning Industry: Principles and Practices*. Tabriz University Press. Tabriz. Iran. (in Farsi)
- Leemans, V., Magein, H. and Destain, M. F. 2002. On-line fruit grading according to their external quality using machine vision. *Biosystems Eng.* 83(4): 397-404.
- Marchant, J. A. 1990. A mechatronic approach to produce grading. In Rzevski, G. (Ed.). *Mechatronics: Designing Intelligent Machines*.
- Mc Rae, D. C. 1985. A review of developments in potato handling and grading. *J. Agric. Eng. Res.* 31(2): 115-138.
- Miller, W. M., Peleg, K. and Briggs, P. 1988. Automatic density separation for freeze-damaged citrus. *Applied Eng. in Agric.* 4(4): 344-348.
- Stroshine, 1998. *Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products*. Department of Agricultural and Biological Engineering Purdue University West Lafayette. Indiana.

## **Volume Estimation of Potatoes Using Image Processing**

**J. Amiri Parian, M. H. Khoshtaghaza<sup>\*</sup>, E. Kabir and S. Minaei**

<sup>\*</sup> Corresponding Author: Associate Professor, Farm Machinery Department, Tarbiat Modares University, P. O. Box: 14155-4838, Tehran, Iran. E-mail: khoshtag@modares.ac.ir

Volume estimation of most agricultural products using mathematical methods is not accurate because of their irregular shape. An alternative method is image processing, which can be used in continuous sorting machines. The objective of this study is to find a practical method for volume estimation of potatoes using image processing. Fifty potatoes (*Marfona* variety) were selected as experimental samples. An image was captured from two perpendicular views of each potato sample using a digital camera and a flat mirror. The image was then processed with MATLAB software and the potato's dimensions were measured based on the edge position in the image index matrix. After imaging, the potato volume was estimated by two methods. In the first, volume was determined using an experimental equation based on three perpendicular diameters. In the second, the sum of calculated section volumes from image division into smaller truncated cone sections with elliptical bases was used. The size of the three perpendicular diameters and the length of the truncated cone sections were measured using image processing. After measuring the actual volume of the potato samples by water displacement, the error of the estimated volume of both methods was calculated and compared. Results showed that the image division method using 64 sections estimates potato volume more accurately (8.15% error) than the experimental equation method (20.5% error). Thus, the image division method can be recommended as a practical method for potato grading based on volume.

**Key Words:** Grading, Machine Vision, Perpendicular Diameter, Truncated Cone